



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/06.16.14.12-TDI

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA CONCENTRAÇÃO
DE CLOROFILA-a ESTUDADA POR SATÉLITE NA
REGIÃO COSTEIRA DE UBATUBA, LITORAL NORTE
DE SÃO PAULO**

Gabriel Moiano Cesar

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Milton Kampel, e Natalia Rudorff Oliveira, aprovada em 18 de abril de 2023.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/49A9R6B>

INPE
São José dos Campos
2023

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/06.16.14.12-TDI

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA CONCENTRAÇÃO
DE CLOROFILA-a ESTUDADA POR SATÉLITE NA
REGIÃO COSTEIRA DE UBATUBA, LITORAL NORTE
DE SÃO PAULO**

Gabriel Moiano Cesar

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Milton Kampel, e Natalia Rudorff Oliveira, aprovada em 18 de abril de 2023.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/49A9R6B>>

INPE
São José dos Campos
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Cesar, Gabriel Moiano.

C337a Análise da variabilidade da concentração de clorofila-a estudada por satélite na região costeira de Ubatuba, litoral norte de São Paulo / Gabriel Moiano Cesar. – São José dos Campos : INPE, 2023.

xxii + 131 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/06.16.14.12-TDI)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2023.

Orientadores : Drs. Milton Kampel, e Natalia Rudorff Oliveira.

1. Clorofila-a. 2. Coeficientes de absorção. 3. Sensoriamento Remoto. 4. Plataforma continental Sudeste do Brasil. 5. Série temporal. I.Título.

CDU 528.8:581.131.1(815.6)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

DEFESA FINAL DE TESE DE GABRIEL MOIANO CESAR
REG. 110388/2018, BANCA Nº 070/2023

No dia 18 de abril de 2023, de forma online, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Doutor em Sensoriamento Remoto, com a exigência de que o trabalho final a ser publicado deverá incorporar as correções sugeridas pela Banca Examinadora, com revisão pelo(s) orientador(es).

Título: "Análise da variabilidade da concentração de clorofila-a estudada por satélite na região costeira de Ubatuba, litoral norte de São Paulo."

Membros da banca:

Dra. Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo – Presidente – INPE

Dr. Milton Kampel – Orientador – INPE

Dra. Natalia Rudorff Oliveira – Orientadora – INPE

Dr. Felipe de Lucia Lobo – Membro Externo – UFPel

Dr. Mauricio Almeida Noernberg – Membro Externo – UFPR



Documento assinado eletronicamente por **Natalia Rudorff Oliveira, Tecnologista**, em 25/04/2023, às 10:08 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Milton Kampel, Pesquisador**, em 25/04/2023, às 10:36 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **MAURICIO ALMEIDA NOERNBERG (E), Usuário Externo**, em 25/04/2023, às 11:44 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Felipe de Lucia Lobo (E), Usuário Externo**, em 26/04/2023, às 15:43 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Evlyn Marcia Leão de Moraes Novo, Pesquisador**, em 05/05/2023, às 06:34 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.mcti.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **10995574** e o código CRC **6D0CA155**.

Referência: Processo nº 01340.002921/2023-13

SEI nº 10995574

AGRADECIMENTOS

Este estudo é uma contribuição para a Rede ANTARES (ANTARES.ws), que é cofinanciada pelo Inter-American Institute for Global Change Research (IAI SGP211-209, CRN3094, US-NSF Grant GEO-1128040), International Ocean-Colour Coordinating Group (IOCCG) e Partnership for the Observation of the Global Oceans (POGO). Esse estudo também foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) (código 1). A séries temporal da estação ANTARES-Ubatuba é apoiada pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP) e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) com contribuições de outros órgãos de pesquisa federais e estaduais.

Agradeço a todos os alunos de graduação e pós-graduação, técnicos e pesquisadores que colaboraram em campanhas de trabalho de campo e análise de dados; à tripulação do R/V Veliger II; e à OBGP/NASA pelo financiamento de análises laboratoriais de HPLC.

Agradeço aos meus colegas do Laboratório Multiusuário de Monitoramento Oceânico por Satélite (MOceanS) especialmente à Aline, Amália, Andrea, Fábio, João Felipe, Luciane, Paulo Vítor, Thais e Vítor.

Agradeço à Mayza Pompeu, Mateus Chuqui e Tulia Aguilar, assim como os demais colegas do IOUSP pela parceria nos trabalhos de campo.

Agradeço aos meus orientadores, Milton Kampel e Natália Rudorff, por todas as valiosas interações, sugestões e apoio durante todas as etapas deste estudo.

Agradeço à minha família e amigos por me apoiarem nesta longa jornada e mantendo-me motivado para enfrentar os desafios e incertezas. Especialmente, Teresa, Otávio, Tiago e Victor.

RESUMO

As águas costeiras e interiores são as mais desafiadoras para a estimativa da concentração de clorofila-*a* (Cla) a partir de dados de sensoriamento remoto devido à interação com outros constituintes ópticos codominantes presentes na água. Neste estudo, foram analisados dados bio-ópticos e dados radiométricos coletados em uma estação fixa costeira na Plataforma Continental Sudeste do Brasil para caracterizar a variabilidade das propriedades bio-ópticas, avaliar o desempenho de algoritmos da cor do oceano (OC) para estimativa de Cla, avaliar a variabilidade temporal da Cla e identificar eventos de floração. A série temporal de Cla *in situ*, a absorção espectral de luz pelo fitoplâncton, detritos e matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM), reflectância de sensoriamento remoto acima da água (R_{rs}), bem como a série do sensor MODIS Aqua do produto de concentração de clorofila-*a* foram obtidos no período entre 2004 e 2019 em uma frequência de amostragem quase mensal. Nesta estação fixa, a Cla apresentou alta variabilidade, com desvio padrão duas vezes maior que a média ($1 \pm 1,83 \text{ mg m}^{-3}$), e valores variando de $0,18 \text{ mg m}^{-3}$ até $18,09 \text{ mg m}^{-3}$, durante eventos episódicos de floração. A absorção do CDOM em 440 nm foi o constituinte opticamente significativo dominante na maior parte da série temporal, sugerindo a influência de fontes continentais, embora a estação esteja localizada no limite externo da plataforma interna (40m). O CDOM desempenha, assim, um papel importante na definição dos tipos ópticos de água, que são compostos principalmente por 2 classes de águas verde-azuladas (conforme mostrado pelos espectros de R_{rs}). Apesar disso, os algoritmos empíricos OCx tiveram um desempenho razoável com viés positivo (30%). O algoritmo OC3 de 3 bandas teve o melhor desempenho selecionando a melhor razão de banda com maior influência da absorção do fitoplâncton e menor absorção do CDM (CDOM + detritos), ($R_{rs} (490/555)$). A estrutura da comunidade fitoplanctônica de águas oligo-mesotróficas, com alto coeficiente de absorção específica, também contribuiu para as superestimativas do OCx. Esses resultados sugerem que os produtos padrão de Cla de satélite podem ser usados com cautela para monitorar e estudar a dinâmica da biomassa do fitoplâncton na região. Para entender as variações de longo prazo da região foi aplicado um procedimento de decomposição temporal (Census X13) em uma série de dados de cor do oceano para caracterizar a variabilidade temporal da Cla. A decomposição realizada nos dados de Cla em escala local para a estação ANTARES-Ubatuba mostra uma dominância da contribuição da componente sazonal (41%). A componente irregular tem tipicamente maior resposta próximo a linha de costa e sugere a influência de fenômenos como ressurgências e passagem de frentes frias como mecanismos causadores da variabilidade, respondendo por 16% da variação. A componente tendência foi responsável por 33% da variabilidade, com tendências não-lineares. Os dados MODIS Aqua permitiram a caracterização do ciclo fenológico do fitoplâncton, onde o período de floração inicia-se no final do inverno (em agosto) e termina

no final da primavera (em novembro) e o número de observações acumulado foi maior em outubro.

Palavras-Chave: Clorofila-*a*. Coeficientes de absorção. Sensoriamento Remoto. Plataforma Continental Sudeste do Brasil. Série temporal.

CHLOROPHYLL-*a* CONCENTRATION VARIABILITY AT COASTAL ZONE OF UBATUBA, NORTH SHORE OF SÃO PAULO STATE

ABSTRACT

Coastal areas are the most challenging regions to retrieve chlorophyll-*a* concentration from remote sensing data because of the interaction with other co-dominant optical constituents. In this study, we analyze bio-optical remote sensing and radiometric data collected at a fixed coastal time series station in the South Brazil Bight, the ANTARES-Ubatuba station (São Paulo, Brazil), to characterize the variability of bio-optical properties, evaluate the performance of ocean color (OC) algorithms for chlorophyll-*a* retrieval, evaluate temporal variability and study algal bloom events. *In situ* Chl*a* and the spectral absorption of phytoplankton, detritus, and colored dissolved organic matter (CDOM), above-water remote sensing reflectance (R_{rs}) as well as the MODIS Aqua chlorophyll-*a* product were obtained from 2004 to 2019 at a quasi-monthly sampling frequency. In this fixed station, chlorophyll-*a* exhibited high variability, with a standard deviation twice as large as the mean ($1 \pm 1.83 \text{ mg m}^{-3}$), and values ranging from 0.18 mg m^{-3} up to 18.09 mg m^{-3} , during episodic bloom events. CDOM absorption at 440 nm was the dominant optically significant constituent over most of the time series, suggesting the influence of continental sources, even though the station is located at the external limit of the inner shelf (40m). CDOM thus plays an important role in defining the optical water types, which are composed of mainly 2 classes of blue-green waters (as shown by the spectral R_{rs}). Despite this, the empirical OCx algorithms had a reasonable performance with a positive bias (30%). The 3-band OC3 algorithm had the best performance by selecting the best band ratio with higher influence of phytoplankton pigment absorption, and lower CDM (CDOM + detritus) absorption (R_{rs} (490/555)). The phytoplankton community structure of oligo-mesotrophic waters, with a high specific absorption coefficient also contributed to the OCx overestimations. These results suggest that standard satellite chlorophyll-*a* products should be used with some caution to monitor and study the dynamics of the phytoplankton biomass within the region. To understand the long-term variations in the region, a temporal decomposition procedure (Census X13) was applied to a series of ocean color data to characterize the temporal variability of Chl*a*. The decomposition performed on the chlorophyll-*a* data on local scale for the ANTARES-Ubatuba station shows a dominance of the contribution of the seasonal component (41%). The irregular component typically has a greater response close to the coastline and suggests the influence of as upwellings and cold front events as causative mechanisms, accounting for 16% of the variation. The trend component was responsible for 33% of the variation. MODIS Aqua data allowed the characterization of phytoplanktonic bloom events, where the bloom period begins at the end of winter (in August) and

ends in spring (in November) and the number of accumulated observations was higher in October.

Keywords: Chlorophyll-*a*. Absorption coefficients. Remote sensing. Southern Brazilian Bight. Time series.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Espectros de absorção específica dos principais pigmentos.....	10
Figura 2.2 - Representação esquemática da estrutura de correntes oceanográficas atuantes na Região do Oceano Atlântico Sul.....	18
Figura 3.1 - Área de estudo.....	23
Figura 3.2 - Comparação da clorofila-a espectrofluorimétrica e derivada pelo método <i>High Performance Liquid Chromatography</i> (HPLC) na estação ANTARES-Ubatuba.....	26
Figura 3.3 - Variação temporal da concentração de clorofila-a (Cla) e temperatura da superfície do mar medidas <i>in situ</i>	37
Figura 3.4 - Coeficiente de absorção espectral do fitoplâncton (a); detritos (b) e CDOM (c), com a média e o desvio padrão destacados em preto e cinza, respectivamente.....	40
Figura 3.5 - Relação entre os coeficientes de absorção biogênicos e a Cla...	41
Figura 3.6 - Diagrama ternário da variação do coeficiente de absorção a_d , a_{cdom} e a_{ph} para 412 nm, 443 nm, 488 nm e 530 nm.....	42
Figura 3.7 - Séries temporais da contribuição proporcional dos coeficientes de absorção de a_{ph} (440), a_d (440), e a_{cdom} (440) para a absorção total biogênica em 440 nm.	43
Figura 3.8 - Valores médios sazonais do coeficiente de absorção de $a_{ph}(440)$, $a_d(440)$, e $a_{cdom}(440)$ na estação ANTARES-Ubatuba (2004-2019).....	44
Figura 3.9 - Espectros de reflectância de sensoriamento remoto <i>in situ</i> ($R_{rs}(\lambda)$), espectros de reflectância de sensoriamento remoto normalizados e espectros de absorção do CDOM ($a_{cdom}(\lambda)$).....	45
Figura 3.10 - Comparação das estimativas de Cla por OC3, OC4 e OC5 com a Cla espectrofluorimétrica.....	47
Figura 3.11 - Comparação entre a Cla modelada (OC3) e medida (N = 84), indicando as amostras com os maiores (Q4) e menores (Q1) valores de $a_{ph}^*(440)$ e $a_{cdm}/a_{nw}(440)$	48

Figura 3.12 - Cla (mg m^{-3}) (OCx) estimada pelo MODIS-Aqua e pelo VIIRS-SNPP em comparação com medições <i>in situ</i> . As cores representam as amostras com maior (Q4) e menor (Q1) $a_{ph}^*(440)$ (a) e (c), e $a_{cdm}/a_{nw}(440)$ (b) e (d).	50
Figura 4.1 - Comparação entre a clorofila-a medida <i>in situ</i> e a clorofila-a estimada pelo MODIS Aqua.....	66
Figura 4.2 - Série de dados de Cla na estação ANTARES-Ubatuba.....	67
Figura 4.3 - <i>Boxplot</i> com os valores de Cla do sensor MODIS Aqua separados por estação do ano.....	68
Figura 4.4 - Anomalia de Cla do sensor MODIS Aqua.	69
Figura 4.5 - Média sazonal da Cla (mg m^{-3}) na região da PCSB.....	71
Figura 4.6 - Decomposição temporal, obtida para a série de dados de Cla na estação fixa ANTARES-Ubatuba.....	73
Figura 5.1 - Valores médios mensais de Cla (mg m^{-3}) do MODIS Aqua ao longo da série histórica.	90
Figura 5.2 - Número de ocorrências de observações de florações algais.....	91
Figura 5.3 – Coeficiente de variação da Cla.....	92
Figura 5.4 - Espectro de reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}) e coeficiente de absorção (a_{ph}) da floração de <i>Mesodinium</i>	97
Figura 5.5 - Exemplo de Floração de dinoflagelados na Estação ANTARES-Ubatuba.....	98

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 - Faixa de variabilidade com média e desvio padrão (DP) da Cla (mg m^{-3}), TSM ($^{\circ}\text{C}$), salinidade e profundidade de Secchi (m) dos dados ANTARES- Ubatuba (2004-2019).	38
Tabela 3.2 - Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão (DP) para as propriedades bio-ópticas dos dados ANTARES-Ubatuba (2004-2019).....	39
Tabela 3.3 - Valores do coeficiente de regressão (R^2), viés médio e erro médio absoluto (MAE), calculados entre a concentração medida e estimada de clorofila-a (Cla) (mg m^{-3}) com o OC3, OC4 e OC5, usando a reflectância de sensoriamento remoto <i>in situ</i> (R_{rs}) (N = 84) do conjunto de dados ANTARES-Ubatuba (2004-2019).	47
Tabela 3.4 – Concentração média de Cla (mg m^{-3}), $a_{ph}^*(440)$ ($\text{m}^2 \text{mg}^{-1}$), $a_{cdm}/a_{nw}(440)$ e viés do OC3 (em comparação com a Cla medida), para o quartil maior (Q4), menor (Q1) e médio (Q2&Q3).	49
Tabela 3.5 – Concentração média de Cla (mg m^{-3}), $a_{ph}^*(440)$ ($\text{m}^2 \text{mg}^{-1}$), $a_{cdm}/a_{nw}(440)$ e viés do OC3 dos dados de satélite (em comparação com a Cla medida), para o quartil maior (Q4), menor (Q1) e médio (Q2&3) dos match-ups.	51
Tabela 5.1 – Estatística básica da concentração dos nutrientes inorgânicos medidos <i>in situ</i> na estação ANTARES-Ubatuba.	82
Tabela 5.2 – Estatística básica das variáveis estimadas por satélite na estação ANTARES-Ubatuba.....	84
Tabela 5.3 - Correlação entre as variáveis.....	86

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABI	- Advanced Baseline Imager
AC	- Água Costeira
ACAS	- Água Central do Atlântico Sul
APP	- Água da Pluma do rio da Prata
AT	- Água Tropical
AVW	- Apparent Visible Wavelength
BS	- Bacia de Santos
CB	- Corrente do Brasil
CCMP	- Cross-Calibrated Multi-Platform
CDM	- Colored Detrital Matter
CDOM	- Colored Dissolved Organic Matter
CI	- Chlorophyll Index
Cla	- Concentração de clorofila-a
COA	- Componente Opticamente Ativo
COCTS	- Chinese Ocean Colour and Temperature Scanner
CTD	- Conductivity-Temperature-Depth
CZCS	- Coastal Zone Color Scanner
CZI	- Coastal Zone Imager
DISC	- Data and Information Services Center
DMSO	- Dimetilsulfóxido
DP	- Desvio Padrão
ENSO	- El Niño/Southern Oscillation
EOF	- Funções ortogonais empíricas
FPS	- Frente de Plataforma Subtropical
GES	- Goddard Earth Sciences
GF/F	- Glass Fiber Filter
GOCI	- Geostationary Ocean Color Imager
GPM	- Global Precipitation Measurement
GSM	- Garvel Siegel e Maritorea
HPLC	- High Performance Liquid Chromatography
IOCCG	- International Ocean Colour Coordinating Group
K _{d490}	- Coeficiente de atenuação difusa para irradiância descendente a 490 nm
MAE	- Erro médio absoluto
MBR	- Razão máxima de banda
MERIS	- Medium Resolution Imaging Spectrometer
MODIS	- MODerate resolution Imaging Spectroradiometer
MSI	- Multispectral Instrument
NAP	- Partículas não algais
NOMAD	- NASA bio-Optical Marine Algorithm Dataset

OBPG - Ocean Biology Processing Group
OCM - Ocean Colour Monitor
OCX - Ocean Colour algorithm
OLCI - Ocean and Land Colour Instrument
PACE - Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem
PAR - Radiação fotossinteticamente disponível
PCSB - Plataforma Continental Sudeste do Brasil
POA - Propriedades ópticas aparentes
POI - Propriedades ópticas inerentes
QAA - Quase-Analytical Algorithm
RMSE - Erro médio quadrático
RPD - Diferença percentual relativa
SeaWiFS - Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor
SEVIRI - Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
SGLI - Second Generation GLobal Imager
TR - Transmitância-Reflectância
TSM - Temperatura da Superfície do Mar
VIIRS - Visible Infrared Imaging Radiometer Suite

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	- Comprimento de onda
$a_{cdm}(\lambda)$	- Coeficiente de absorção do CDM (m^{-1})
$a_{cdom}(\lambda)$	- Coeficiente de absorção do CDOM (m^{-1})
$a_d(\lambda)$	- Coeficiente de absorção do detritos (m^{-1})
$a_{nap}(\lambda)$	- Coeficiente de absorção das partículas não algais (m^{-1})
$a_{nw}(\lambda)$	- Coeficiente de absorção do material não aquoso (m^{-1})
$a_p(\lambda)$	- Coeficiente de absorção do material particulado (m^{-1})
$a_{ph}(\lambda)$	- Coeficiente de absorção do fitoplancton (m^{-1})
$a_{ph}^*(\lambda)$	- Coeficiente específico de absorção do fitoplâncton ($m^2 mg^{-1}$)
$b_{bp}(\lambda)$	- Coeficiente de retroespalhamento (m^{-1})
$R_{rs}(\lambda)$	- Reflectância de Sensoriamento Remoto (sr^{-1})
S_{cdom}	- Inclinação espectral do CDOM (nm^{-1})
S_r	- Razão de inclinação do CDOM

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	7
1.1.1 Objetivo geral	7
1.1.2 Objetivos específicos	8
1.2 Estrutura do documento.....	8
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1 Propriedades ópticas da água	9
2.2 Sensoriamento remoto da cor do oceano	12
2.3 Algoritmos para a estimativa da Cla	14
2.4 Variabilidade temporal	16
3 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES BIO-ÓPTICAS E IMPLICAÇÕES PARA A ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-a EM UBATUBA, SP	19
3.1 Introdução.....	19
3.2 Materiais e métodos.....	22
3.2.1 Área de estudo.....	22
3.2.2 Propriedades da água	25
3.2.3 Concentração da clorofila-a	25
3.2.4 Coeficientes de absorção do material particulado.....	27
3.2.5 Coeficientes de absorção do CDOM.....	27
3.2.6 Medidas radiométricas	28
3.2.7 Dados de satélite	30
3.2.8 Análise de dados.....	31
3.2.8.1 Propriedades bioquímicas e bio-ópticas	31
3.2.8.2 Tipos ópticos de água (OWT)	31
3.2.8.3 Algoritmos empíricos	33

3.2.9	Análise de incertezas	34
3.3	Resultados	36
3.3.1	Propriedades biogeoquímicas e ambientais.....	36
3.3.2	Propriedades bio-ópticas.....	38
3.3.3	AVW e classificação dos tipos de água.....	44
3.3.4	Implicações para as estimativas de Cla	46
3.3.5	Match-ups	49
3.4	Discussão	52
3.5	Conclusão.....	58
4	CARACTERIZAÇÃO DA VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-<i>a</i> SUPERFICIAL EM UBATUBA, SP	60
4.1	Introdução.....	60
4.2	Materiais e métodos.....	61
4.2.1	Clorofila- <i>a in situ</i>	62
4.2.2	Dados de satélite	62
4.2.3	Análise temporal	63
4.2.4	Análise de tendência	64
4.3	Resultados e discussão	65
4.3.1	Comparação dos bancos de dados.....	65
4.3.2	Distribuição da Cla na PCSB	69
4.3.3	Census X13.....	72
4.3.4	Análise de tendência	74
4.4	Conclusão.....	75
5	FLORAÇÕES FITOPLANCTÔNICAS NA REGIÃO COSTEIRA DE UBATUBA, SP	77
5.1	Introdução.....	77
5.2	Material e métodos	78
5.2.1	Dados <i>in situ</i>	78
5.2.2	Dados de satélite	79
5.2.3	Dados meteoceanográficos.....	80
5.2.4	Análise de correlação.....	80
5.2.5	Identificação de florações.....	81

5.3 Resultados e discussão.....	81
5.3.1 Análise de correlação.....	81
5.3.2 Identificação de florações.....	87
5.4 Conclusão.....	99
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
6.1 Conclusão.....	101
6.2 Perspectivas futuras	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105

1 INTRODUÇÃO

Os ambientes costeiros são locais estratégicos para o estabelecimento da vida nos oceanos, visto que muitas espécies se utilizam das características próprias desses ambientes, como a disponibilidade de nutrientes, para sua reprodução (DEKKER et al., 2011). Entre estas características, incluem-se a proteção oferecida por ambientes abrigados e produtivos como as praias, restingas, mangues e recifes. Nesses ambientes, a presença de águas relativamente mais quentes e rasas na interface com ambientes terrestres propicia a interação com o material carregado pelos rios que torna esta região mais complexa para estudos da cor da água (SCHALLES, 2006).

A cor da água de ambientes naturais é uma característica óptica resultante dos processos de interação da luz solar com a água pura e seus componentes opticamente ativos (COA) (PREISENDORFER, 1976; MOBLEY, 1995, 2004). Assim fornece informação espectral relativa à composição da coluna de água. As variações da cor da água são determinadas pela concentração e composição das partículas e substâncias dissolvidas que absorvem e espalham a radiação solar direta e difusa que penetra na água (KIRK, 2011; JENSEN, 2014). Um dos principais COA é o pigmento clorofila-*a* que indica a presença do fitoplâncton, composto por organismos fotossintéticos, autotróficos, microscópicos, flutuantes e que estão presentes em todos os ambientes aquáticos (O'BRIEN et al., 2017). O fitoplâncton forma a base da teia alimentar em sistemas aquáticos, convertendo a energia solar em matéria orgânica pelo processo da fotossíntese, que no tempo é referenciada como produção primária (PATTI et al., 2010; VALENTI et al., 2015).

Morel e Prieur (1977) e Gordon e Morel (1983) definiram que águas do Caso 1 são aquelas nas quais o fitoplâncton e seus produtos derivados - detritos orgânicos e matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM), do inglês *Colored Dissolved Organic Matter*, gerados pela predação do zooplâncton, exsudação ou morte natural das células algais, desempenham um papel dominante na determinação das propriedades ópticas da água, e geralmente caracterizam as águas oceânicas. As águas do Caso 2 são aquelas nas quais existe uma

contribuição importante ou dominante de sedimentos em suspensão do fundo e / ou do escoamento fluvial ou ainda da descarga urbana / industrial. Nas águas do Caso 2, ou opticamente complexas, o fitoplâncton e seus derivados podem ou não estar presentes em quantidade significativa. Esse tipo de classificação é uma simplificação generalista, mas que facilita o entendimento do estado bio-óptico dos ambientes aquáticos, e a aplicação de modelos bio-ópticos de cor do oceano. Outros trabalhos ainda detalham várias classes de água definidas pelas proporções dos COA presentes no meio (SPYRAKOS et al., 2018).

Os organismos fitoplanctônicos convertem a energia eletromagnética em matéria orgânica e durante este processo a clorofila-*a* funciona como uma antena receptora da radiação solar absorvendo seletivamente a radiação, principalmente nos comprimentos de onda do azul (~440 nm) e vermelho (~675 nm). Quando as populações fitoplanctônicas são abundantes, com altas concentrações de clorofila-*a*, a cor da água torna-se mais verde, com maior refletividade na região espectral do visível entre 500 e 590 nm, e isso é um aspecto que pode ser observado por radiômetros a bordo de satélites orbitais (O'BRIEN et al., 2017). A variação da concentração de clorofila-*a* (C_{la}) é então utilizada como proxy para valores de biomassa fitoplanctônica. O conhecimento dessa biomassa fitoplanctônica e das taxas de produção primária são fundamentais para o entendimento e gerenciamento de ecossistemas pelágicos e bênticos, pesca, aquicultura e avaliações sobre os impactos do aporte de nutrientes (MÉLIN; HOEPFFNER, 2011).

Assim, utilizando o pigmento como um bioindicador, é possível realizar o monitoramento da qualidade da água com dados de sensoriamento remoto da cor da água. As perturbações e pressões em ambientes costeiros e ecossistemas adjacentes resultantes do crescimento e da concentração da população humana nessas áreas, representam um desafio para os órgãos gestores. Os trabalhos de Goes et al. (2005) e Gomes et al. (2014) são exemplos da utilização de dados de sensoriamento remoto para a análise de mudanças nas populações fitoplanctônicas causadas por alterações antrópicas ao longo do tempo. Enquanto alguns trabalhos relatam o decaimento das populações fitoplanctônicas no último século (BOYCE; LEWIS; WORM, 2010;

ROXY et al., 2016), alguns trabalhos como os de Goes et al. (2005) e Gomes et al. (2014) mostram que o contrário acontece em regiões costeiras. Os autores afirmam que em decorrência do aumento do aporte de nutrientes causado pela poluição e alterações no ambiente, florações fitoplanctônicas (ou *bloom* em inglês) podem ser indicativas de desequilíbrio ambiental e ocasionar problemas de saúde pública e de segurança alimentar, vale ressaltar a importância das diferenças entre as escalas temporais utilizadas nesses estudos.

Desde o lançamento do sensor Coastal Zone Color Scanner (CZCS) em 1978, dispõe-se de uma base extensa de dados de satélite de cor do oceano que são amplamente utilizados em estudos ambientais. Depois do sensor experimental CZCS, uma série de outros sensores de programas ambientais e até mesmo operacionais, deram sequência ao monitoramento da cor do oceano gerando séries temporais longas, como o *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS), *MEdium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS), *MODerate resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) e *Ocean and Land Colour Instrument* (OLCI), entre outros. As diferentes configurações de resoluções espaciais, espectrais, temporais e radiométricas desses sensores proporcionam uma diversidade de aplicações dessas informações. A continuidade na obtenção de dados orbitais da cor do oceano parece assegurada com o lançamento de novos satélites como o chinês HY-1D, lançado em 2020 e o PACE (*Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem*) da NASA previsto para ser lançado em 2023, entre outros (GROOM et al., 2019). Informações reunidas sobre missões históricas, operacionais e futuras dedicadas ao sensoriamento remoto da cor do oceano podem ser obtidas a partir do portal do *International Ocean Colour Coordinating Group* – IOCCG (www.ioccg.org).

A determinação da Cla por sensoriamento remoto da cor do oceano em águas costeiras opticamente complexas (Caso 2), no entanto, não é trivial e existe uma série de desafios que restringem a utilização dos produtos globais de cor do oceano para o monitoramento ambiental nessas áreas. A mistura complexa com a dominância óptica de outros COA, além da Cla, e a variação

independente dos mesmos, é um desafio para a modelagem bio-óptica. Além disso, um outro desafio importante é em relação à correção atmosférica. Para aplicações quantitativas de dados de sensoriamento remoto óptico na superfície, os efeitos da atmosfera devem ser removidos, por procedimentos denominados como correção atmosférica. Mesmo em condições de céu limpo e ensolarado, o sinal detectado por um sensor remoto pode ser dominado (80-90% do sinal, dependendo da concentração dos COA na água) por fótons que foram dispersos por moléculas de ar ou partículas de aerossol e que não contêm informações sobre a água do mar (IOCCG, 2000). A correção para estes componentes indesejados de brilho deve ser muito precisa para evitar erros relativos nos demais componentes da água (ROBINSON, 1985; VERMOTE et al., 1997).

O espalhamento molecular é relativamente trivial de ser removido, porém o espalhamento por aerossóis é bem variável e precisa ser determinado independentemente para cada caso. Em águas oceânicas as bandas do infravermelho próximo (~765 a 865 nm) podem ser usadas para determinar a contribuição do espalhamento dos aerossóis, já que a água absorve praticamente toda a radiação nesta faixa espectral. Em águas costeiras com sedimentos em suspensão ou concentrações elevadas de fitoplâncton, a reflectância da água no infravermelho próximo não pode ser considerada nula e o modelo de correção atmosférica deve utilizar as bandas do infravermelho médio (se disponível) outra alternativa é estimar os aerossóis em outras áreas com águas claras, por exemplo, e fazer a extrapolação para todo o espectro.

Próximo a centros urbanos pode haver ainda aerossóis absorvedores que tornam o problema ainda mais complexo. Nas áreas próximas ao continente tem ainda o efeito do pixel adjacente que também causa incertezas na correção e determinação da reflectância acima da água (R_{rs}). Todos esses desafios tornam o monitoramento de águas costeiras por sensoriamento remoto uma questão complexa que ainda demanda muita pesquisa e esforços na busca de soluções práticas para cada região.

Em relação aos modelos bio-ópticos uma abordagem bastante explorada para a estimativa da Cla em sistemas aquáticos é baseada na utilização de algoritmos empíricos. Estes algoritmos se baseiam em regressões estatísticas entre medidas *in situ* e diferenças ou razões de reflectâncias de sensoriamento remoto obtidas por satélite (GORDON; MOREL, 1983; SCHALLES, 2006). Apesar de serem relativamente simples, os algoritmos empíricos apresentam relativo sucesso na estimativa da Cla no oceano aberto e em algumas regiões costeiras (O'REILLY, 2000; HU, 2009; MURAKAMI, 2016; LI et al., 2019, entre outros), mas com acurácia menor em águas costeiras opticamente complexas (LI et al., 2017). Desta forma, a aplicabilidade desses modelos pode ser limitada temporalmente ou geograficamente (WATANABE et al., 2016). Uma vantagem desta abordagem é que os algoritmos empíricos podem ser ajustados com base em dados *in situ* fornecendo estimativas mais robustas nas regiões onde os dados foram coletados e utilizados na calibração.

No Brasil, são poucas as estações de coleta de dados *in situ* úteis para a validação de algoritmos de sensoriamento remoto da cor do oceano (GROOM et al., 2019). Uma das únicas estações fixas costeiras de coleta de dados *in situ* faz parte da rede de observações latino-americana ANTARES. A estação brasileira desta rede está localizada em Ubatuba, litoral norte de São Paulo, na Plataforma Continental Sudeste do Brasil. A estação ANTARES-Ubatuba dispõe de uma série relativamente longa, com mais de quinze anos de dados coletados na região.

Trabalhos prévios na Plataforma Continental Sudeste Brasileira ou próximo a esta, demonstram que há um potencial de uso de produtos de cor do oceano para o monitoramento das águas costeiras, mas há ainda a necessidade da melhoria destes produtos para estudos mais quantitativos (RUDORFF et al., 2007; CARVALHO, 2009; VALÉRIO, 2013; CORTIVO; KAMPEL, 2017; OLIVEIRA; KAMPEL, 2019; OLIVEIRA et al., 2021). Estes trabalhos mostram que há uma certa covariação entre a Cla estimada por satélite e a medida *in situ* (R^2 de 0,4 a 0,8), mas com uma incerteza ainda relativamente alta, com erro médio quadrático de 0,02-0,9 mg m⁻³, sendo que as estimativas de satélite tendem a superestimar a Cla na maioria dos casos. As fontes de incerteza

citadas como possíveis causas de um desempenho com acurácia baixa em algumas circunstâncias dos algoritmos são as concentrações maiores de outros COA (i.e., CDOM e detritos) com o aporte de fontes externas (i.e., continentais), e desafios na correção atmosférica para a obtenção da reflectância de sensoriamento remoto acima da água. A maioria desses estudos, no entanto, foram realizadas com poucas amostras comparativas, seja por menor número de amostras *in situ* e/ou por interferência de nuvens na região, restringindo a comparação das medidas *in situ* com as de satélite.

Outro aspecto importante que pode ser observado com séries temporais de estações fixas *in situ* e com imagens de satélite, são as variações ao longo do tempo. As populações fitoplanctônicas respondem às variações sazonais (de médio-curto prazo), interanuais (e.g., El Niño e La Niña (LEÃO, 2008)) e climáticas e ambientais de longo prazo. A produção primária fitoplanctônica é afetada indiretamente por fatores climáticos, como a temperatura da água e ventos na superfície do mar, que desestabilizam a coluna d'água proporcionando um maior aporte de nutrientes à camada superficial (CASTRO; MIRANDA, 1987). A variação na cobertura de nuvens também pode reduzir ou aumentar a radiação eletromagnética disponível para a fotossíntese, afetando a produção primária (ANTHONY et al., 2004). A variação da Cl_a de uma região pode também indicar uma mudança na estrutura da comunidade fitoplanctônica devido às mudanças nos processos de ocupação de ambientes costeiros (GOMES et al., 2014). A forma mais eficiente de se estudar essa variação é com a integração de bancos de dados históricos.

Para a compreensão de como todos esses processos interagem com o fitoplâncton e como variam regionalmente, as amostragens *in situ* realizadas em trabalhos de campo periódicos, analisadas em conjunto com séries temporais de satélites são essenciais (ROBINSON, 1985; LUTZ et al., 2006). As técnicas de análise de séries temporais aplicadas à dados de sensoriamento remoto auxiliam no entendimento desses complexos processos (GARCIA; et al., 2005; VANTREPOTTE; MÉLIN, 2011; LOISEL et al., 2014; O'BRIEN et al., 2017).

Desta forma, colocam-se algumas questões à serem exploradas, como por exemplo: (i) como ocorre a variabilidade espaço-temporal da Cla em uma região costeira no litoral norte de São Paulo?; (ii) quais fatores ambientais ou variáveis meteoceanográficas podem estar condicionando esta variabilidade?; (iii) quais são os padrões temporais em relação à variação sazonal e não sazonal da Cla nessa região?

Este trabalho desenvolve um estudo sobre a variabilidade da Cla, na região costeira de Ubatuba, utilizando um conjunto de dados *in situ* do período entre 2004 e 2019 da estação ANTARES-Ubatuba e produtos de sensoriamento remoto da cor do oceano. Para isso, foi feita uma análise comparativa entre algoritmos empíricos de estimativa de Cla com medidas *in situ*, a fim de eleger o algoritmo com melhor desempenho para a região (i.e., com melhor acurácia). Os dados *in situ* também foram comparados com os dados do produto concentração de clorofila-*a* de satélite que foi utilizado para gerar uma série histórica de 15 anos, que subsidiou as análises da variabilidade temporal da Cla. Para entender as forçantes que regulam o crescimento do fitoplâncton na região, outros parâmetros meteoceanográficos medidos *in situ* e estimados por satélite foram analisados em conjunto. Além de descrever a variabilidade da Cla na região, as análises da distribuição e tendência da Cla podem contribuir com os estudos oceanográficos e servir de suporte ao gerenciamento costeiro na região.

1.1 Objetivos

Diante do exposto, foram definidos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho, como mostrado a seguir.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar os padrões de variação espacial e temporal da Cla na região costeira de Ubatuba, litoral norte de São Paulo, a partir de dados *in situ* da estação ANTARES-Ubatuba e da Cla estimada por sensoriamento remoto, a fim de compreender sua variação e os processos meteoceanográficos que podem estar associados à sua variabilidade.

1.1.2 Objetivos específicos

Para tal, os objetivos específicos do presente trabalho são:

- a) Caracterizar as propriedades bio-ópticas *in situ*, i.e., coeficientes de absorção da luz pelo fitoplâncton, CDOM e material particulado e descrever como eles influenciam a estimativa de Cla estimada com reflectância de sensoriamento remoto *in situ* por algoritmos padrões empíricos na região de estudo.
- b) Comparar os produtos de Cla estimadas por satélite com dados *in situ* da estação ANTARES-Ubatuba e com eles analisar a variabilidade espaço-temporal dos campos superficiais de Cla na região, identificando os processos meteoceanográficos que governam a distribuição do fitoplâncton e a ocorrência de eventos extremos que possam estar associados a variações na Cla.
- c) Analisar a variabilidade temporal da concentração de clorofila-*a* *in situ* em relação a outras variáveis meteoceanográficas (e.g., temperatura da superfície do mar, radiação fotossinteticamente disponível (PAR), profundidade do disco de Secchi, vento na superfície do mar, nutrientes inorgânicos dissolvidos, precipitação).

1.2 Estrutura do documento

A estrutura deste documento é baseada em capítulos independentes, mas complementares. Cada capítulo é um manuscrito submetido ou a ser submetido para publicação em revistas científicas, exceto o Capítulo 1 da Introdução, Capítulo 2 da Fundamentação Teórica e Capítulo 6 das Considerações finais. Os objetivos específicos serão atendidos pelos seguintes capítulos: (a) pelo Capítulo 3; (b) pelo Capítulo 4; e (c) pelo Capítulo 5.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Propriedades ópticas da água

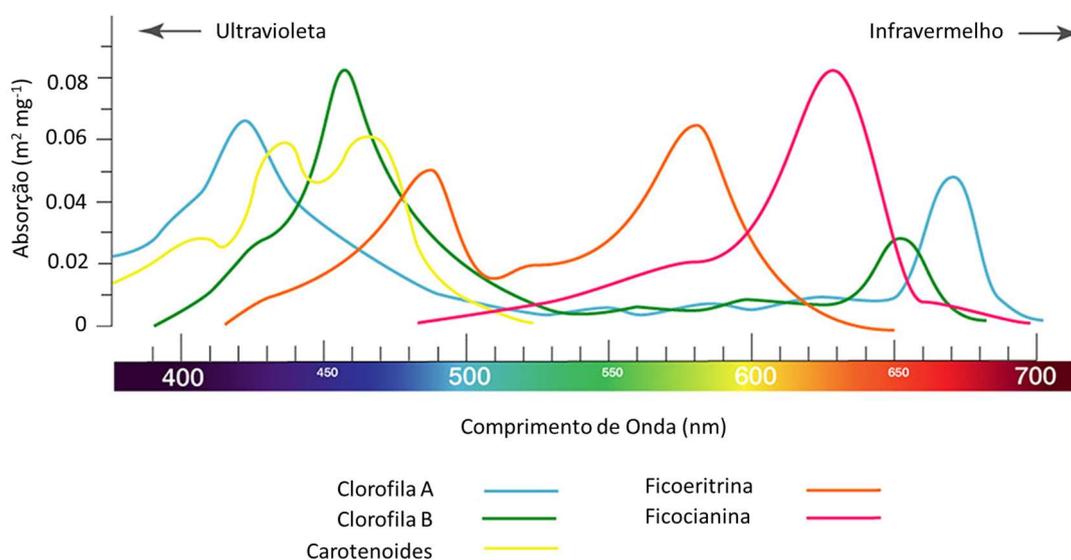
As águas naturais são compostas por água pura e várias moléculas e partículas que diferem em tamanho, forma e composição química. Além de componentes inorgânicos como sais, quartzo, minerais argilosos, óxidos metálicos e bolhas de gás de vários tamanhos, também existe uma grande variedade de organismos vivos e material orgânico degradado na maioria dos corpos d'água. Alguns constituintes afetam a composição espectral da luz refletida e isto é utilizado na determinação quantitativa desses componentes (MOBLEY, 2004; KIRK, 2011; GIARDINO et al., 2019).

As propriedades ópticas inerentes (POI) dependem somente da composição e da concentração das substâncias particuladas e dissolvidas presentes na água, além da própria água. Já as propriedades ópticas aparentes (POA) dependem tanto dos COA e suas concentrações quanto do campo de luz incidente. As POI são definidas em termos dos coeficientes de absorção, dos coeficientes de espalhamento e da função de espalhamento volumétrico, resultantes da interação da luz ao se propagar na coluna d'água (MOBLEY, 2004; KIRK, 2011).

Os principais COAs são a água pura, a matéria orgânica dissolvida, o material particulado em suspensão e o fitoplâncton (MOBLEY et al., 2017). A composição e concentração dos COA então define a cor da água. Jerlov (1968) introduziu o conceito de classificação das águas de acordo com as variações de cor e dos COA dominantes. Mais tarde, Morel e Prieur (1977) e Gordon e Morel (1983) simplificaram a classificação para dois casos, onde águas do Caso 1 são aquelas nas quais o fitoplâncton e seus produtos derivados desempenham um papel dominante na determinação das propriedades ópticas da água e as águas do Caso 2 são aquelas nas quais existe uma maior contribuição dos sedimentos em suspensão e / ou substâncias dissolvidas, provindos de fontes externas como a ressuspensão do fundo e o aporte de rios.

Por meio dos pigmentos, o fitoplâncton realiza a fotossíntese utilizando a radiação fotossinteticamente disponível (PAR, do inglês *Photosynthetically Available Radiation*), definida como sendo a radiação compreendida no intervalo de 400 a 700 nm. O pigmento fotossintetizante presente em todos os seres autótrofos é a Cla, que possui dois picos bem definidos de máxima absorção, um na região do azul (440 nm) e outro no vermelho (675 nm). Essas, portanto, são regiões espectrais exploradas no sensoriamento remoto para a determinação da Cla. Além das clorofilas (*a*, *b* e *c*), há ainda outros pigmentos fotossintetizantes presentes em diferentes espécies de fitoplâncton como os carotenoides e biliproteínas, e ainda pigmentos fotoprotetores que absorvem a luz seletivamente em diferentes comprimentos de onda, conferindo diferentes colorações para as florações de cada espécie (KIRK, 2011; IOCCG, 2014). A Figura 2.1 apresenta as características dos espectros de absorção específica dos pigmentos fitoplanctônicos.

Figura 2.1 - Espectros de absorção específica dos principais pigmentos.



Absorção normalizada por unidade de concentração dos principais pigmentos fitoplanctônicos: clorofila-*a*, clorofila-*b*, carotenoides e as biliproteínas ficoeritrina e ficocianina.

Fonte: Adaptado de Karp (2008).

Como a $Chl a$, presente em todos os organismos autotróficos, absorve mais a radiação nos comprimentos de onda do azul e vermelho, à medida que aumenta a biomassa fitoplanctônica a refletividade da água vai ficando maior nos comprimentos de onda do verde (500 a 590 nm), onde a absorção é mínima. Essa variação na cor da água pode ser então detectada por sensores radiométricos a bordo de satélites, e é usada para estimar a $Chl a$, como indicador de biomassa fitoplanctônica (O'BRIEN et al., 2017). O modelo empírico OCx, por exemplo, estima a $Chl a$ a partir da razão máxima da R_{rs} entre as bandas do azul e verde dos sensores de cor do oceano (O'REILLY et al., 1998).

Além do fitoplâncton, a matéria orgânica particulada e dissolvida também absorve a radiação seletivamente, com uma assinatura espectral parecida, aumentando exponencialmente a absorção em comprimentos de onda mais curtos – na faixa do azul ao ultravioleta (IOCCG, 2000). Quando estes componentes covariam com a $Chl a$, sendo de origem autóctone – produtos de degradação da própria comunidade fitoplanctônica, em águas Caso 1, os modelos empíricos de $Chl a$ ainda funcionam muito bem (BRICAUD et al., 1998; MOREL et al., 2007). Mas em águas Caso 2, onde os mesmos podem variar independentemente e apresentar concentrações mais elevadas, pode ser necessária a determinação do coeficiente de absorção do detritos e do CDOM separadamente ao coeficiente de absorção do fitoplâncton, com o uso de algoritmos semi-analíticos (IOCCG, 2009). Estes algoritmos se baseiam na relação de proporcionalidade entre a R_{rs} e a razão entre o coeficiente de retroespalhamento e de absorção total da água. A absorção total da água é decomposta nos termos aditivos da absorção da água pura, absorção do fitoplâncton e a absorção do detritos e CDOM. O retroespalhamento, por sua vez, é decomposto nos termos aditivos do retroespalhamento da água e das partículas em suspensão, que inclui as células de fitoplâncton, a matéria orgânica particulada, minerais inorgânicos em suspensão e ainda bolhas (MITCHELL et al., 2002).

Para monitorar os ecossistemas costeiros de águas opticamente complexas, é preciso então levar em consideração a presença de todos os componentes

presentes na água e conhecer como eles se comportam - as faixas de variação, se provêm da própria comunidade fitoplanctônica ou de fontes externas como a ressuspensão do fundo, aporte de rios ou ainda transportados por correntes de maré e correntes costeiras. Por isso é importante a caracterização bio-óptica do sistema antes de aplicar os algoritmos de cor do oceano para a determinação dos COA.

Em águas classificadas como opticamente complexas (Caso 2) com presença de altas cargas de sedimentos em suspensão (e.g., próximo a foz de rios, transportados pelas marés, ressuspensos pela ação de ondas e vento) e, por consequência, com a presença de inúmeras e diversas partículas variando sazonalmente, a penetração da luz se extingue nos primeiros metros (MOBLEY, 2004). Em contrapartida, em águas rasas e com menor concentração de partículas em suspensão, também é importante considerar, além do espalhamento e absorção da água, a influência da reflectância do fundo na determinação da reflectância marinha (ZOFFOLI, 2014; MEDEIROS et al., 2022).

2.2 Sensoriamento remoto da cor do oceano

O sensoriamento remoto da cor do oceano a partir do espaço é realizado por uma variedade de radiômetros em satélites lançados por várias nações ao redor do globo. Desde 1996, a coordenação desses estudos é realizada pelo Grupo de Coordenação Internacional da Cor do Oceano (IOCCG). A maior parte dos sensores desenvolvidos para medidas de cor do oceano estão em satélites de órbita polar, operando normalmente a altitudes de 700 e 800 km, com um tempo de revisita de 1-2 dias.

Desde o lançamento do sensor CZCS em 1978, a oceanografia conta com uma base robusta de dados de satélite de cor da água. O satélite NIMBUS-7, com o CZCS a bordo funcionou até 1985 e mais de uma década depois, em 1996, outros sistemas sensores seguiram gerando dados de cor da água. Pode-se destacar o banco de dados gerado pelo satélite SeaWiFS que funcionou entre os anos de 1997 e 2010. Pode-se citar também, as séries de dados geradas

pelo MERIS que operou de 2002 a 2012 e dos sensores MODIS, VIIRS e OLCI, que ainda estão em operação.

Os sensores mencionados operam a bordo de satélites em órbita polar. Entretanto, outra abordagem interessante para o estudo de fenômenos e processos biogeoquímicos se baseia no uso de dados de satélites geoestacionários. Esse tipo de órbita que acompanha a translação da Terra permite uma revisita frequente com intervalo de minutos para a face do globo na qual se projeta a visada do sensor (GROOM et al., 2019).

Pode-se destacar o sensor *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager* (SEVIRI) a bordo do satélite METEOSAT, que possui 12 bandas espectrais entre 600 nm e 14400 nm, com máxima resolução espacial de 1 km para uma banda com alta resolução no visível, 3 km para as outras bandas e tempo de revisita de 15-30 minutos (BELLACICCO et al., 2018). Outro exemplo de satélite que possui esse tipo de órbita é o *Geostationary Ocean Color Imager* (GOCI) que monitora florações fitoplanctônicas na região costeira do mar do Japão, com 8 bandas espectrais posicionadas entre 400 nm e 900 nm, com máxima resolução espacial de 500 m e tempo de revisita de 3 horas (LI, 2016). Em 2016 a NASA em conjunto com a NOAA lançaram o satélite geoestacionário GOES-16 com o sensor *Advanced Baseline Imager* (ABI), que possui uma banda centrada no azul (470 nm) e outra no vermelho (640 nm) que poderiam potencialmente ser exploradas para aplicações de cor do oceano (JOLLIFF et al., 2019). A maior desvantagem dos dados de satélites geoestacionários é que eles operam em uma faixa espacial específica, não atendendo toda a extensão do globo.

Os principais sensores de cor do oceano de moderada resolução espacial operacionais são apresentados na Tabela 2.1 que inclui informações sobre as respectivas agências, satélites, período de operação, faixa de imageamento (*swath*), resolução espacial, número de bandas, cobertura espectral e tipo de órbita (IOCCG, 2023).

Tabela 2.1 - Características dos sensores de cor do oceano.

Sensor	Agência	Satélite	Lançamento	Swat (km)	Resolução espacial(m)	Bandas	Cobertura espectral	Passagem
COCTS CZI	NSOAS/CAST (China)	HY-1D	11/06/2020	3000 950	1100 50	10 4	402-12,500 433-885	13:30
COCTS CZI	NSOAS/CAST (China)	HY-1C	07/09/2018	3000 950	1100 50	10 4	402-12,500 433-885	10:30
GOCHII	KARI/KIOST	GeoKompst-2B	18/02/2020	2500 x 2500	250	13	380 - 900	10x/dia
Geostationary (South Korea)								
MODIS-Aqua	NASA (USA)	Aqua (EOS-PM1)	04/05/2002	2330	250/500/1000	36	405-14,385	13:30
MODIS-Terra	NASA (USA)	Terra (EOS-AM1)	18/12/1999	2330	250/500/1000	36	405-14,385	10:30
MSI	ESA	Sentinel-2A	23/06/2015	290	10/20/60	13	442-2202	10:30
MSI	ESA	Sentinel-2B	07/03/2017	290	10/20/60	13	442-2186	10:30
OCM	ISRO (India)	Oceansat-2 (India)	23/09/2009	1420	360	8	400 - 900	12:00
OCM	ISRO (India)	Oceansat-3	26/11/2022	1420	360	13	400 - 1,010	12:00
OLCI	ESA/ EUMETSAT	Sentinel 3A	16/02/2016	1270	300/1200	21	400 - 1020	10:00
OLCI	ESA/ EUMETSAT	Sentinel 3B	25/04/2018	1270	300/1200	21	400 - 1020	10:00
SGLI	JAXA (Japan)	GCOM-C	23/12/2017	1150 - 1400	250/1000	19	375 - 12,500	10:30
VIIRS	NOAA (USA)	Suomi NPP	28/10/2011	3000	375 / 750	22	402 - 11,800	13:30
VIIRS	NOAA/NASA (USA)	JPSS- 1/NOAA-20	18/11/2017	3000	370 / 740	22	402 - 11,800	13:30
VIIRS	NOAA/NASA (USA)	JPSS- 2/NOAA-21	10/11/2022	3000	370 / 740	22	402 - 11,800	13:30

Fonte: Adaptado de IOCCG (2023).

2.3 Algoritmos para a estimativa da Cla

Os algoritmos empíricos estabelecem a relação entre as medidas ópticas e a concentração dos constituintes presentes na água verificados por meio de bancos de dados experimentais adquiridos com amostragens *in situ* (SCHALLES, 2006; VALENTE et al., 2016). A relação mais comum utilizada é a razão de bandas, que utiliza a reflectância em determinados canais espectrais, como por exemplo, os comprimentos em 443 nm, 510 nm e 555 nm (O'REILLY; WERDELL, 2019) para o cálculo dos parâmetros biogeoquímicos que estão sendo estimados. A relativa baixa acurácia que pode ser obtida com a

aplicação desse tipo de algoritmo em águas costeiras complexas, pode ser melhorada com o aumento do número de bandas espectrais empregadas. Devido à natureza regional desse tipo de algoritmo, dependendo da base de dados na qual o algoritmo foi ajustado, a utilização da razão de bandas limita a aplicabilidade em águas similares às quais o modelo empírico foi desenvolvido (LOISEL et al., 2013).

O'Reilly et al. (1998) compararam o desempenho de 17 algoritmos com o uso de dados de reflectância de sensoriamento remoto nas bandas espectrais do SeaWiFS, em relação a medidas *in situ* da Cla em estações oceânicas. Nesse caso dois algoritmos foram indicados como os de melhor desempenho. O algoritmo OC2 que utiliza as bandas espectrais 490 nm e 555 nm e o OC4, que utiliza quatro bandas espectrais em 443 nm, 490 nm, 510 nm e 555 nm.

Atualmente, o produto padrão de estimativa da Cla disponibilizado pela NASA utiliza um esquema híbrido onde é usado o algoritmo CI (*chlorophyll index*) desenvolvido por HU et al. (2012) e o algoritmo OCx (*Ocean Colour X*) desenvolvido no trabalho de O'Reilly et al. (1998), que utiliza a reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}) nas bandas do azul e do verde e os ajustes exponenciais são dependentes do sensor utilizado. Como o algoritmo gera um produto padrão para todos os tipos de águas, para valores menores que $0,15 \text{ mg m}^{-3}$, usa-se o algoritmo CI e para valores maiores que $0,2 \text{ mg m}^{-3}$, o algoritmo OCx é usado. Se a Cla for um valor intermediário, os valores devem ser combinados (*blended data*). O objetivo do CI é melhorar o desempenho do modelo empírico em águas claras reduzindo os efeitos de interferência de brilho na superfície do mar (HU et al., 2012). Apesar desses modelos serem criados para sensores específicos é possível a utilização do banco de dados *in situ* de R_{rs} e Cla para a adaptação do algoritmo aos intervalos espectrais de outros instrumentos.

Os algoritmos descritos acima são modelos de caráter empírico. Há outros, no entanto, que procuram fazer uso da proporcionalidade aproximada entre as POA, $R_{rs}(\lambda)$, e a razão das POI – coeficiente de espalhamento e absorção (MATTHEWS; ODERMATT, 2015; FAVARETO et al., 2018). Estes são

conhecidos como algoritmos semi-analíticos porque fazem uso de relações derivadas empiricamente entre a reflectância e propriedades tais como a distribuição espectral do retroespalhamento e a dependência espectral da absorção do fitoplâncton, detritos e CDOM. Um exemplo é o algoritmo CARDER, desenvolvido por Carder et al. (1999) para os dados do MODIS.

Outro algoritmo semi-analítico é o modelo GSM (GARVER; SIEGEL, 1997; MARITORENA et al., 2002), que a partir da radiância de satélite, recupera simultaneamente as estimativas da Cla, o coeficiente de absorção para materiais dissolvidos e detritos em 443 nm e o coeficiente de retroespalhamento de partículas em 443 nm. Em águas do Caso 1, o GSM estima os valores de Cla com uma precisão semelhante à dos algoritmos empíricos considerados padrão (GARCIA et al., 2006; LALIBERTÉ et al., 2018).

Outro algoritmo padrão de cor do oceano é o *Quase-Analytical Algorithm* (QAA) (LEE et al., 2002), que é implementado em diferentes etapas para recuperar as POI como o retroespalhamento das partículas (b_{bp}) e a absorção do fitoplâncton, detritos e CDOM. Primeiramente, os coeficientes de absorção total e de retroespalhamento são obtidos e então a absorção total é particionada nas contribuições do CDM (CDOM + partículas não algais - NAP) e do fitoplâncton, analiticamente.

Para esses algoritmos, no entanto, como trabalham com um número maior de variáveis, a propagação das incertezas associadas a cada variável pode ser maior. Além disso, incertezas na R_{rs} , decorrentes de falhas na correção atmosférica, por exemplo, também propagam mais nestes algoritmos que utilizam o valor integral das R_{rs} em cada banda (e não razões ou diferenças de bandas como nos modelos empíricos de Cla).

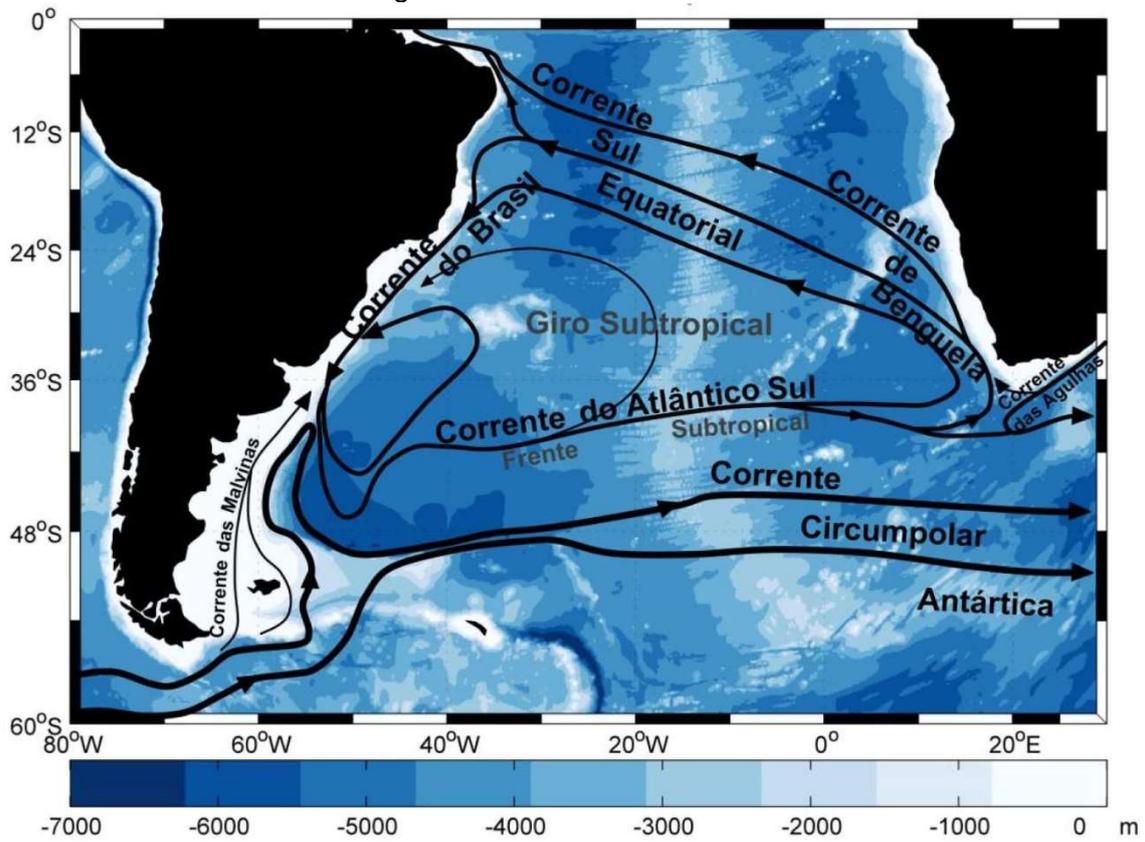
2.4 Variabilidade temporal

A região da Plataforma Continental Sudeste do Brasil é caracterizada por uma complexa estrutura de correntes (Figura 3.2) com forte variabilidade sazonal (PETERSON; STRAMMA, 1991; CARVALHO, 2009). Portanto, é necessário o entendimento desta dinâmica oceanográfica e suas feições de mesoescala que controlam a variabilidade da Cla já que o fitoplâncton tem um papel

fundamental nos ciclos biogeoquímicos, estando intimamente relacionado com processos de mudanças climáticas globais (HAYS et al., 2005). A dinâmica temporal dos processos oceanográficos também afeta a composição das comunidades fitoplanctônicas, principalmente em regiões costeiras, que também sofrem a influência da poluição causada pela urbanização dessas regiões (GOMES et al., 2014). Algumas técnicas vêm sendo utilizadas para análises de séries temporais de dados de satélites, mostrando-se bastante úteis na identificação do comportamento periódico de sinais. Dentre estas, pode-se destacar a transformada de Fourier, a transformada de ondeletas (*wavelets* em inglês), o método das funções ortogonais empíricas (EOF) e o método Census X13 (KAMPEL et al., 2008; LEÃO, 2008; VANTREPOTTE; MÉLIN, 2011; CHEN et al., 2019).

A técnica Census X13 é uma evolução do Census X11 e se baseia em um algoritmo que utiliza a iteração de filtros passa-banda. Esse método foi desenvolvido para o estudo de padrões temporais pelo *National Bureau of Economic Research* nos EUA. Vem sendo aplicada na análise de produtos de sensoriamento remoto e em estudos biogeoquímicos para análise de padrões espaço-temporais (VANTREPOTTE; MÉLIN, 2011; LOISEL et al., 2014; DELGADO et al., 2021; KEERTHI et al., 2022). Esta análise permite que a série de dados seja decomposta em termos sazonais e de ciclo de tendência, gerando informações derivadas destes componentes que podem ajudar a explicar a variabilidade regional da concentração da variável em questão, como por exemplo a concentração de clorofila-*a*.

Figura 2.2 – Representação esquemática da estrutura de correntes oceanográficas atuantes na Região do Oceano Atlântico Sul.



Fonte: Carvalho (2014).

3 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES BIO-ÓPTICAS E IMPLICAÇÕES PARA A ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-*a* EM UBATUBA, SP

3.1 Introdução

A cor da água em ambientes naturais é uma característica óptica resultante da interação entre a luz solar incidente e os constituintes opticamente ativos presentes nos corpos d'água, que são: moléculas de água, matéria orgânica dissolvida colorida (em inglês, *colored dissolved organic matter* - CDOM), partículas não algais (em inglês, *non algal particles* - NAP) (sedimentos e detritos) e fitoplâncton (IOCCG, 2000; MOBLEY et al., 2017). Assim, a cor da água pode fornecer informações biogeoquímicas sobre esses constituintes presentes na camada superficial, ou seja, na primeira profundidade óptica ou até onde a irradiância é reduzida a 37% ($1/e$) do seu valor na superfície (GORDON; MCCLUNEY, 1975; MOREL; BERTHON, 1989).

Os COA afetam a composição espectral da luz refletida, que é usada para determinar quantitativamente esses constituintes por meio de algoritmos de inversão de cor do oceano (MOBLEY, 2004; KIRK, 2011; GIARDINO et al., 2019). As propriedades ópticas inerentes (POI) dependem apenas da composição e concentração dos COA presentes na água e são definidas em termos de coeficientes de absorção e espalhamento da luz (MOBLEY, 2004; KIRK, 2011). As propriedades ópticas aparentes (POA) dependem não apenas dos COA, mas também do campo de luz incidente, como a Reflectância de Sensoriamento Remoto (R_{rs}). Essas propriedades podem ser relacionadas utilizando esquemas de inversão como algoritmos empíricos e semi-analíticos, para finalmente recuperar propriedades biogeoquímicas relevantes usando instrumentos de cor do oceano.

Nas últimas décadas, vários instrumentos de sensoriamento remoto de cor do oceano por satélite foram desenvolvidos para monitorar e estudar ambientes aquáticos. Os satélites de cor do oceano juntos fornecem 25 anos de registros desses dados contínuos em escala global. Um dos principais produtos de cor

do oceano é a concentração de clorofila-*a* (C_{la}), utilizada como índice da biomassa fitoplanctônica, que auxilia na estimativa da produção primária global e na compreensão da dinâmica das variações nas comunidades fitoplanctônicas (GOHIN, 2011; GROOM et al., 2019). A C_{la} é um parâmetro chave para estudos em ambientes aquáticos (PODDAR et al., 2019; CORREDOR-ACOSTA et al., 2020) e serve como um dado de entrada para muitos algoritmos secundários usados na estimativa de outros produtos bio-ópticos e biogeoquímicos (por exemplo, Lobanova et al. (2018)).

Os dados *in situ* são essenciais para o desenvolvimento e validação desses algoritmos e a compreensão da dinâmica e oscilações temporais dos COA, auxiliando no refinamento de algoritmos regionais e globais (WERDELL; BAILEY, 2005; BRICAUD et al., 2010; LOISEL et al., 2010). Mesmo após 3 décadas de pesquisa e aplicações dos dados de cor do oceano, a estimativa precisa de C_{la} continua sendo desafiadora, especialmente em águas costeiras, que estão sujeitas a uma maior mistura dos COA de diferentes fontes, como as descargas continentais e a ressuspensão de fundo. Nesses casos os algoritmos empíricos e semi-analíticos podem falhar ou apresentar maiores incertezas na estimativa da C_{la} (SIEGEL, 2005).

A Bacia de Santos (BS) no Atlântico Sudoeste é um ambiente marinho quase fechado onde são desenvolvidas diversas atividades marítimas e serviços ecossistêmico, incluindo a pesca, aquacultura, turismo, cabotagem, exploração *offshore* de óleo e gás, e absorção de carbono (CASTELLO et al., 2009; FERREIRA et al., 2014). O sistema é influenciado por rios de pequeno e médio porte, e há uma intrusão sazonal de águas do sul transferida por uma corrente costeira ou sobre a plataforma transportando uma mistura de águas subantárticas, da plataforma da Patagônia argentina e da pluma do rio da Prata (e outros estuários) até a BS, durante o inverno austral (MÖLLER et al., 2008). As estações da primavera e do verão são caracterizadas pela presença de células de ressurgência costeira que promovem alto crescimento fitoplanctônico e às vezes com extensas florações dentro e fora da BS (> 800 km) (OLIVEIRA et al., 2021).

Existem alguns estudos que analisaram as propriedades ópticas dentro da PCSB e avaliaram o desempenho dos algoritmos de cor do oceano e produtos de satélite. Esses estudos são espacial e temporalmente limitados, representando alguns estuários e baías, como por exemplo, Baía de Guanabara (OLIVEIRA et al., 2016), Baía de Santos (FERREIRA et al., 2014) e Paranaguá (NOERNBERG et al. 2014), *cross-shelf*, apenas para a parte sul da PCSB (GIANNINI et al., 2013; SILVA; GARCIA, 2021), e a PCSB média (CARVALHO et al., 2014; GONÇALVES-ARAUJO et al., 2019). Os estudos também estão focados na caracterização óptica (FERREIRA et al., 2014; GONÇALVES-ARAUJO et al., 2019; NOERNBERG et al. 2014) ou no desempenho de algoritmos de cor do oceano (GARCIA et al., 2005; GIANNINI et al., 2013; SILVA; GARCIA, 2021). Dentre estes, poucos apresentam análises profundas da variabilidade das IOPs e suas implicações na precisão dos produtos de OC (CARVALHO et al., 2014).

Estudos anteriores mostraram que a PCSB possui uma hidrodinâmica complexa que impulsiona a distribuição das propriedades ópticas. Os estuários e baías têm coeficientes biogênicos de absorção de luz mais elevados do que as águas *offshore*, com maior biomassa fitoplanctônica e maiores aportes continentais de CDOM e NAP (FERREIRA et al., 2014; NOERNBERG et al. 2014). Nesses ambientes costeiros, o CDOM pode ser alto ao longo do ano, especialmente durante a estação quente e úmida (verão austral), enquanto o NAP pode estar mais relacionado a fontes aditivas de ressuspensão do fundo e ao regime de marés (FERREIRA et al., 2014; NOERNBERG et al. 2014, NOERNBERG et al., 2020). Na parte sul da PCSB, o CDOM muda seu ciclo e torna-se mais alto durante o inverno, devido à intrusão da Água da Pluma do Rio da Prata (APP) (CARVALHO et al., 2014). Essas variações afetam significativamente o desempenho dos algoritmos de cor do oceano para a região e alguns trabalhos anteriores relataram a necessidade de parametrizações regionais (CARVALHO et al., 2014; GARCIA et al., 2005; GIANNINI et al., 2013). Durante o verão, intensos processos de fotodegradação ao longo da plataforma, reduzem as proporções de CDOM:DOM e contribuem para a alta variabilidade deste constituinte na região

(GONÇALVES-ARAUJO et al., 2019). O setor norte da PCSB é subamostrado em termos de propriedades bio-ópticas, e possui dinâmica oceanográfica distinta, sendo muito menos influenciado pela intrusão sazonal da APP e mais influenciado por células de ressurgência primavera-verão (OLIVEIRA et al., 2021).

A estação costeira de coleta que compõem a série temporal ANTARES-Ubatuba está localizada na porção média da PCSB, no limite das águas da plataforma interna (40 m). As amostragens, quase mensais, são realizadas desde 2004 sendo consideradas um valioso conjunto de dados para a região. No presente trabalho, analisamos este conjunto de dados para caracterizar as propriedades bio-ópticas em termos de composição, fontes e variabilidade temporal, e estudamos as implicações da variabilidade bio-óptica na estimativa da *C_{oc2}* utilizando algoritmos padrão de cor oceano. O presente estudo tem como objetivo contribuir para a caracterização ambiental e óptica da região e analisar a precisão das estimativas de cor do oceano para o monitoramento por satélite, identificando algumas possíveis fontes de incerteza. Esse capítulo é uma adaptação do conteúdo do artigo *Bio-optical properties of South Brazil Bight coastal waters and implications for satellite chlorophyll-a concentration retrieval* aceito para publicação na revista *International Journal of Remote Sensing*.

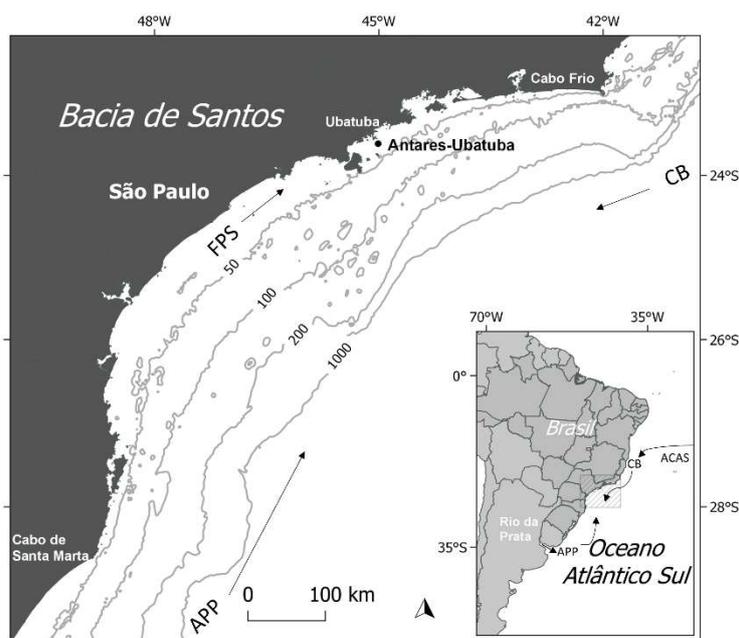
3.2 Materiais e métodos

3.2.1 Área de estudo

A estação costeira da série temporal ANTARES-Ubatuba está localizada a cerca de 18 quilômetros da costa (23,60° S, 44,96° W), ao largo da cidade de Ubatuba, no litoral norte do Estado de São Paulo (Figura 3.1). De dezembro de 2004 a julho de 2019, no horário da manhã (próximo às 11 horas) foram realizadas amostragens periódicas (quase mensais) *in situ* na estação, durante um total de 143 cruzeiros. O local está localizado próximo à isóbata de 40 m, na parte interna da PCSB, que é limitada ao norte por Cabo Frio e ao sul pelo Cabo de Santa Marta (CASTRO; MIRANDA, 1998). A PCSB é caracterizada

em sua área costeira por fortes atividades de turismo, pesca e aquicultura, com um ambiente preservado e riqueza de vida marinha (CASTELLO et al., 2009; FERREIRA et al., 2014). A plataforma costeira está sujeita a intensa atividade de pesca de arrasto, que é o principal tipo de atividade de pesca e apesar da abundante população pelágica de peixes, principalmente sardinha e tainha, desenvolveu desde 1950 a pesca de arrasto como principal categoria na região (VASCONCELLOS; GASALLA, 2001). Este habitat é o lar de uma rica biodiversidade de fauna marinha e é uma rota importante para centenas de espécimes (LODI; TARDIN, 2018; LIMA, 2020). Essas características ecológicas únicas enfatizam a necessidade de monitorizar e proteger este patrimônio marinho.

Figura 3.1 - Área de estudo.



A estação ANTARES-Ubatuba encontra-se na região costeira da Plataforma Continental Sudeste do Brasil (PCSB), 23,60° S - 44,96° O. O ponto de amostragem ANTARES-Ubatuba é exibido assim como a batimetria e o esquema de circulação. O esquema mostra a Água Central do Atlântico Sul (ACAS) e a Corrente do Brasil (CB) vinda do Norte e a Água da Pluma do rio Prata (APP) vinda do Sul. Dentro da PCSB, a dinâmica frontal é dominada pela Frente de Plataforma Subtropical (FPS).

Fonte: Produção do autor.

A dinâmica oceanográfica que impulsiona a estrutura da comunidade fitoplanctônica na PCSB é complexa (BRANDINI et al., 2018). A Água Costeira (AC), Água Tropical (AT) e a Água Central do Atlântico Sul (ACAS) são as principais massas d'água que interagem na PCSB (CASTRO; MIRANDA, 1998). A AC é caracterizada por águas menos salinas (< 36) presentes na plataforma interna e influenciadas pela drenagem continental e pela ressuspensão do fundo (CASTRO, 2014). A drenagem continental é tipicamente maior durante o verão austral (dezembro - fevereiro), que é a estação chuvosa para a região (CAVALCANTI et al., 2009). Ventos e ondas são mais intensos durante o inverno austral (junho - agosto), especialmente na região ao sul (CECILIO; DILLENBURG, 2019).

A plataforma interna também recebe uma intrusão sazonal das águas do sul da plataforma da patagônia e da pluma do Rio da Prata e outros estuários, transportadas para o norte por uma corrente costeira durante o inverno austral (SOUZA; ROBINSON, 2004). A APP é enriquecida com nutrientes promovendo o crescimento do fitoplâncton principalmente no sul da PCSB (MÖLLER et al., 2008).

A AT é caracterizada por águas oligotróficas com alto teor salino (> 36) e mais quentes ($> 20^{\circ}\text{C}$), transportadas para sul pela camada superficial (0-200 m) da Corrente do Brasil (CB) – o ramo ocidental do Giro do Atlântico Sul. A ACAS é caracterizada por possuir temperaturas mais baixas ($< 18^{\circ}\text{C}$) e águas enriquecidas com nutrientes transportadas a mais de 100-200 m pela CB no talude. Durante o verão austral, fortes ventos (N-NE) favorecem a intrusão da ACAS em subsuperfície através da plataforma interna média e até a superfície em células de ressurgência costeiras, como a célula de Cabo Frio. Essas intrusões favorecem o crescimento localizado do fitoplâncton, que podem ajudar a formar extensas florações durante eventos mais extremos (OLIVEIRA et al., 2021).

A estação ANTARES-Ubatuba está localizada no limite sul da Frente de Cabo Frio formada durante eventos de ressurgência (BRANDINI et al., 2018) e no limite norte da APP, sendo influenciada por essas massas de água

ocasionalmente. Também está localizado no limite da plataforma interna com predominância de AC e pode receber intrusões periódicas de AT e ACAS subsuperficial através de meandros e vórtices da CB que se formam através do talude em direção à plataforma interna (CASTRO, 2014). A região é influenciada apenas por rios de pequeno porte e tem um regime de mesomaráz (2 m). A mistura da coluna d'água impulsionada pelo vento também parece desempenhar um papel importante no crescimento do fitoplâncton, especialmente durante o inverno (OLIVEIRA et al., 2021).

3.2.2 Propriedades da água

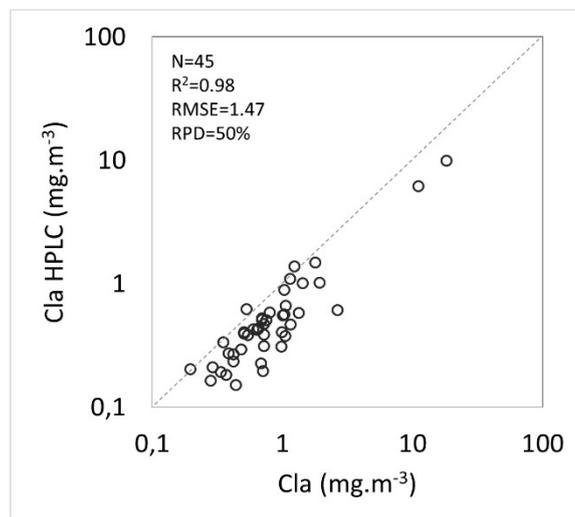
A temperatura e a salinidade da superfície marinha foram medidas na estação ANTARES-Ubatuba com a utilização de um perfilador SeaBird calibrado (em inglês, *Conductivity-Temperature-Depth* – CTD) (UNESCO, 1985). A transparência da água foi medida com a utilização de um disco de Secchi (POOLE; ATKINS, 1929).

3.2.3 Concentração da clorofila-a

Volumes de amostras superficiais de 500 mL foram coletados com garrafas de Niskin e filtrados em filtros de fibra de vidro de 25 mm (GF/F) (0,7 µm de poro nominal) sob baixa pressão (< 5 psi) e armazenados em nitrogênio líquido. A Cla foi determinada pelo método descrito em Welschmeyer (1994). Os pigmentos foram extraídos em uma solução de acetona a 90% e dimetilsulfóxido (DMSO) por 24 horas a cerca de -10 °C usando o método não acidificado e, em seguida, determinados em um espectrofluorímetro Turner 10UA. Para um período menor, de julho de 2012 a maio de 2017 (N=44), a Cla também foi determinada por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (em inglês, *High Performance Liquid Chromatography* - HPLC). Amostras de água de superfície com maior volume (2000 mL) foram coletadas e filtradas sob baixa pressão usando filtros GF/F de 25 mm. As amostras foram armazenadas em nitrogênio líquido e enviadas para análise em um laboratório da NASA nos EUA, utilizando o método descrito em Van Heukelem e Hooker (2011). As Cla obtidas por ambos os métodos foram comparadas para garantir a acurácia das

medidas espectrofluorimétricas, que foram utilizadas nas análises deste trabalho.

Figura 3.2 - Comparação da clorofila-*a* espectrofluorimétrica e derivada pelo método *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) na estação ANTARES-Ubatuba.



Fonte: Produção do autor.

Mesmo com uma alta covariação ($R^2 = 0,81$), a Cla espectrofluorimétrica apresentou um viés positivo sistemático com um erro médio quadrático (RMSE) de $1,47 \text{ mg m}^{-3}$ (Figura 3.2), padrão semelhante ao encontrado no trabalho de Werdell e Bailey (2005) com o uso de um conjunto de dados maior (NASA *bio-Optical Marine Algorithm Dataset* - NOMAD). Essas diferenças podem estar associadas à influência da sobreposição da fluorescência de outros pigmentos, por vezes presentes nas amostras, como a clorofila-*b* e/ou a feofitina (ROESLER et al., 2017), embora o método espectrofluorimétrico utilize uma técnica de banda estreita para minimizar tais efeitos (WELSCHMEYER, 1994). Por outro lado, o DMSO é conhecido por ser um poderoso solvente utilizado na extração de pigmentos do fitoplâncton, e trabalhos anteriores relataram diferenças na Cla medida usando diferentes solventes (DUNCAN; HARRISON, 1982; LUTZ et al., 2010). Assim, o uso de diferentes solventes (acetona para HPLC e DMSO para a Cla espectrofluorimétrica, nesse caso) também pode ser uma fonte da "superestimativa" espectrofluorimétrica.

3.2.4 Coeficientes de absorção do material particulado

Foram coletados 500 mL de amostras de água superficial com garrafas de Niskin, depois filtradas em filtros GF/F de 25 mm. Os filtros com as partículas retidas foram preservados em nitrogênio líquido e, em seguida analisados em um espectrofotômetro SHIMADZU UV-2450 usando uma esfera integradora. Os coeficientes de absorção do material particulado e as respectivas contribuições de partículas não algais e fitoplâncton foram determinados pelo método de Transmitância-Reflectância (TR) descrito em Tassan e Ferrari (2002). Primeiramente, a absorção total é medida para cada amostra e, em seguida os pigmentos são branqueados com algumas gotas de NaClO a 10% por 5 minutos e cuidadosamente os filtros são lavados com água do mar filtrada (TASSAN; FERRARI, 2002). Os filtros branqueados são medidos para obter a fração de absorção dos detritos (a_d (λ) em m^{-1}), e a absorção do fitoplâncton (a_{ph} (λ) em m^{-1}), após subtração do material particulado total (a_p (λ) em m^{-1}). O coeficiente específico de absorção do fitoplâncton (i.e., a_{ph}^* (λ)) foi determinado a partir dos valores de a_{ph} normalizados pela Cla (BRICAUD et al., 1995).

3.2.5 Coeficientes de absorção do CDOM

Amostras de água de superfície também foram coletadas para medir a absorção do CDOM, com o uso de filtros de membrana de policarbonato (0,2 μm). A água filtrada (100 mL) foi armazenada em frascos lavados com ácidos e esterilizados, cobertos com papel alumínio, e mantidos no escuro a cerca de 4°C até a análise laboratorial no dia seguinte. A absorção espectral da água filtrada foi medida entre 250 e 800 nm em um espectrofotômetro SHIMADZU UV-2450 de duplo-feixe com uma cubeta de 10 cm. A água Milli-Q produzida no momento da leitura foi usada para subtrair a absorção pela água pura. A absorção espectral do CDOM (a_{cdom} (λ) em m^{-1}) foi calculada da seguinte forma (MITCHELL et al., 2002):

$$a_{cdom}(\lambda) = 2,303 \times A(\lambda) / L \quad (3.1)$$

onde $A(\lambda)$ é o espectro de absorção bruto, L é o comprimento do caminho óptico da cubeta (0,1 m), multiplicado pelo fator 2,303, o logaritmo natural de 10. Um ajuste exponencial foi aplicado em todo intervalo de absorção espectral (BABIN et al., 2003) para descrever a magnitude, $a_{\text{cdom}}(440)$ em m^{-1} , e a forma espectral, S_{cdom} em nm^{-1} , da absorção do CDOM.

$$a_{\text{cdom}}(\lambda) = a_{\text{cdom}}(\lambda_0) e^{-S(\lambda-\lambda_0)} \quad (3.2)$$

onde $a_{\text{cdom}}(\lambda)$ é o coeficiente de absorção no comprimento de onda λ , $a_{\text{cdom}}(\lambda_0)$ o coeficiente de absorção no comprimento de onda de referência λ_0 e S a inclinação espectral no intervalo entre λ_0 a λ .

A inclinação espectral (S_{cdom}) foi calculada para os intervalos de 300-700 nm, 275-295 nm e 350-400 nm. Os valores de S_{cdom} para os intervalos entre 275-295 nm e 350-400 nm foram utilizados para calcular a razão de inclinação espectral (S_r), que pode indicar o peso molecular do CDOM e, assim, sua fonte (terrígena ou marinha) e estágio de fotodegradação (HELMS et al., 2008; VALERIO et al., 2018).

3.2.6 Medidas radiométricas

A reflectância de sensoriamento remoto de superfície foi determinada seguindo os protocolos de Mueller et al. (2003) e Mobley (1999) com a utilização de um radiômetro hiperespectral FieldSpec HandHeld (ASD) (325 a 1075 nm). As radiâncias da água, do céu e de uma placa lambertiana foram coletadas usando a geometria de visada do sensor com um ângulo zenital de 40 - 45° e ângulo azimutal de 90 - 135° distante do sol para minimizar os efeitos de brilho. As amostragens foram feitas em torno das 10 - 11h. Durante as coletas o estado do mar foi geralmente calmo com ~1 m de altura de onda e baixa velocidade do vento ($< 5 \text{ m s}^{-1}$). Assim, o fator de refletância da superfície do mar (ρ) (MOBLEY, 1999), era geralmente próximo a 0,028. O L_w foi calculado da seguinte maneira:

$$L_w(\theta, \Phi, \lambda) = L_T(\theta, \Phi, \lambda) - \rho(\theta, \Phi, \theta_0, W)L_{sky}(\theta, \Phi, \lambda) \quad (3.3)$$

onde θ_0 é o ângulo zenital solar e W a velocidade do vento.

A irradiância solar descendente (E_d) foi determinada usando uma placa Lambertiana Spectralon branca (L_{pl}) (refletância de 99%, ρ_{pl}) com o espectrorradiômetro usando uma geometria de visada semelhante à coleta de radiância da água, para evitar o auto sombreamento. Como poderia haver alguma degradação na refletância da placa de campo após algum tempo de uso, ao final de cada campanha a radiância da placa de campo era medida e comparada com uma placa Spectralon de referência (L_{pl_ref}) em um laboratório de radiometria, usando uma fonte de luz halógena de 650W (em uma sala escura). Um fator de correção (k) da razão entre L_{pl}/L_{pl_ref} foi então usado para corrigir a degradação do campo L_{pl} . E_d foi determinado da seguinte forma:

$$E_d(\lambda) = L_{pl}(\theta, \Phi, \lambda) \times \rho_{pl} \times k \times \pi \quad (3.4)$$

A R_{rs} foi finalmente determinada pela normalização de L_w por E_d . Como valores positivos de R_{rs} ainda eram comumente observados no infravermelho próximo (> 750 nm), embora a estação não tenha contribuições significativas de sedimentos em suspensão, sendo suficientemente profunda (40 m) e distante de pequenas fontes fluviais (> 20 km), uma correção da contaminação residual do sol e do brilho do céu foi aplicada subtraindo o valor de R_{rs} a 750 nm de todo o espectro (MUELLER et al., 2003). Durante cada campanha, a R_{rs} foi determinada usando medições sequenciais de L_T , L_{pl} , e L_{sky} . Essas sequências foram repetidas 3 vezes no início da série temporal e 10 vezes a partir de 2011. Portanto, cada campanha teve de 3 a 10 réplicas de R_{rs} , e a R_{rs} final foi calculado pela média de todas as réplicas. Um controle de qualidade também foi feito antes de calcular a média das réplicas, primeiro excluindo visualmente medições espúrias (por exemplo, com características espectrais incomuns) e, em segundo lugar, excluindo as réplicas com um coeficiente de variação

superior a 10% em 400 nm, conforme descrito em Rudorff et al. (2014). Isso foi feito para evitar o uso de espectros contaminados, como aqueles causados por condições de luz que mudam rapidamente durante as medições sequenciais (de L_T , L_{pl} , e L_{sky}).

Muitos métodos alternativos foram propostos para medir e processar a R_{rs} acima da água (GROETSCH et al. 2017; LEE et al. 2010), no entanto, nenhum deles provou ser superior em condições de céu claro, o que é obrigatório para o exercício de match-ups com imagens de satélite (IOCCG, 2018). Foi testado um método alternativo proposto por Kutser et al. (2013) para corrigir o brilho do sol e do céu. Embora a magnitude da R_{rs} espectral tenha apresentado valores mais próximos dos match-ups com os dados do MODIS, as razões de banda tiveram uma relação muito pior, em comparação com a abordagem de Mobley (1999). Portanto, a correção aparente do brilho do sol e do céu com métodos alternativos também pode introduzir alguns erros espectrais não correlacionados que podem impactar negativamente os algoritmos de cor do oceano com base em razões de banda. É por isso que foi escolhida a abordagem de Mobley (1999), conforme recomendado pelo protocolo do IOCCG (IOCCG, 2018).

3.2.7 Dados de satélite

Os produtos de cor de oceano de satélite de nível 2 (R_{rs} e Cla), obtidos pelo MODIS a bordo do Aqua e pelo VIIRS a bordo da *Suomi National Polar-orbiting Partnership* (SNPP), foram baixados do repositório da NASA (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) e reprojeto graficamente para o Nível 3 usando o SeADAS v. 8.1, com resolução espacial nominal de 1 km. Para a análise de match-up, foram consideradas imagens do mesmo dia do calendário e foi extraído o valor médio de uma janela espacial de 3x3 pixels centrada na estação ANTARES-Ubatuba. Valores com mais de 20% de diferença da mediana dentro da janela espacial foram excluídos, bem como casos com menos de 5 pixels válidos, seguindo as recomendações de Stock e Subraminam (2020).

3.2.8 Análise de dados

3.2.8.1 Propriedades bioquímicas e bio-ópticas

Para a caracterização da variabilidade temporal das propriedades biogeoquímicas e bio-ópticas foram utilizadas estatísticas descritivas, ANOVA (para verificar diferenças entre as estações do ano) e análise de correlação não paramétrica (Spearman Rank). O percentil 90% de Cla foi usado para identificar eventos de floração de fitoplâncton (FERREIRA et al., 2011).

Para a caracterização bio-óptica também analisamos as relações entre as POIs e a Cla, comparando-as com as relações oceânicas globais (BRICAUD et al., 1998). O diagrama ternário foi usado para analisar a dominância espectral de cada POI no balanço de absorção de luz biogênica. O conceito de uma classificação triangular de águas naturais com base no *budget* de absorção dos COA foi descrito pela primeira vez por Prieur e Sathyendranath (1981). Nesta classificação, as águas típicas do Caso 1, descritas como dominadas pela absorção do fitoplâncton (e CDOM e detritos covariantes), estão localizadas próximas ao vértice do fitoplâncton (ou seja, indicando 100% de contribuição para a absorção biogênica total). As águas do Caso 2 com fontes alóctones de CDOM e detritos estão espalhadas em qualquer outro lugar no diagrama, uma vez que se espera que as proporções relativas dos três componentes de absorção variem amplamente nessas águas (BABIN et al., 2003; IOCCG, 2000).

3.2.8.2 Tipos ópticos de água (OWT)

Dependendo das propriedades biogeoquímicas e bio-ópticas, a água pode ser classificada em vários tipos ópticos de água (em inglês, *Optical Water Type* - OWT). A definição do número de OWTs pode ser avaliada por meio de classificações e/ou índices referentes às particularidades do corpo d'água. Conhecer o OWT presente na área de estudo é essencial para melhorar a aplicação e compreensão dos algoritmos usados nas estimativas com dados de cor da água (MOORE et al., 2014; TURNER et al., 2022; VALERIO et al., 2021; WEI et al., 2016).

Antes da classificação, a R_{rs} foi normalizada por seu valor integrado para reduzir a variabilidade de primeira ordem e destacar a forma espectral da reflectância (MÉLIN; VANTREPOTTE, 2015; SPYRAKOS et al., 2018; VANTREPOTTE et al., 2012), de acordo com a Equação (3.5). A integração foi realizada na faixa de 400-800 nm usando o método trapezoidal.

$$r_n(\lambda) = \frac{R_{rs}(\lambda)}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{rs}(\lambda) d\lambda'} \quad (3.5)$$

onde $r_n(\lambda)$ (nm^{-1}) é o espectro normalizado obtido integrando λ_1 (400 nm) e λ_2 (800 nm).

Neste estudo, optamos por usar o método de classificação k -médias, amplamente utilizado em vários estudos da cor do oceano (NEIL et al., 2019; SILVA et al., 2021; SPYRAKOS et al., 2018). Além disso, antes da classificação, é essencial estabelecer o número ideal de clusters, para o qual aplicamos o método Gap Criterion (TIBSHIRANI et al., 2001). O valor do Gap é definido como:

$$Gap_n(k) = E_n^*\{\log(W)_k\} - \log(W_k) \quad (3.6)$$

onde n é o tamanho da amostra, k é o número de clusters sendo avaliados e W_k é a medida de dispersão dentro do cluster agrupada. W_k é expresso como:

$$W_k = \sum_{r=1}^k \frac{1}{2n_r} D_r \quad (3.7)$$

onde n representa o número de pontos de dados no cluster r , e D_r representa a soma cumulativa das distâncias entre pontos para todos os pontos no cluster r . O valor esperado $E_n^*\{\log(W)_k\}$ é calculado por meio da amostragem de Monte

Carlo a partir de uma distribuição padrão, e o $\log(W_k)$ é derivado dos dados amostrais.

Os clusters determinados são então usados como centroides do método k -médias. Começando com um espectro médio inicial selecionado aleatoriamente (conhecido como “semente”) para cada um dos k -clusters, os espectros do conjunto de dados são atribuídos à classe cujo valor médio do espectro está mais próximo da semente, criando o primeiro conjunto de decisão de limites. As novas sementes de cluster são então calculadas com base nessa classificação, e os espectros são reatribuídos de acordo até que não haja mudança significativa nas atribuições dos espectros entre iterações sucessivas (SCHOWENGERDT, 2012).

O comprimento de onda visível, ou *Apparent Visible Wavelength* – AVW (Vandermeulen et al., 2020) foi calculado para caracterizar a forma espectral da $R_{rs}(\lambda)$. A técnica utiliza a média harmônica ponderada do $R_{rs}(\lambda)$ para criar um índice, descrito na Equação (3.8):

$$AVW = \frac{\sum_{i=\lambda_1}^{\lambda_n} R_{rs}(\lambda_i)}{\sum_{i=\lambda_1}^{\lambda_n} \frac{R_{rs}(\lambda_i)}{\lambda_i}} = \left(\frac{\sum_{i=\lambda_1}^{\lambda_n} \lambda_i^{-1} R_{rs}(\lambda_i)}{\sum_{i=\lambda_1}^{\lambda_n} \frac{R_{rs}(\lambda_i)}{\lambda_i}} \right)^{-1} \quad (3.8)$$

A vantagem deste índice contínuo e quantitativo é que ele usa toda a gama de informações espectrais e pode rastrear variações e tendências na cor do oceano ao longo do espaço e do tempo. A AVW demonstrou ser um índice de forma espectral eficaz, pois não requer um conjunto de dados de treinamento ou definição do número de classes a priori (VALERIO et al., 2021). O AVW é baseado principalmente na forma espectral da R_{rs} , minimizando os efeitos das incertezas da R_{rs} acima da água (RUDORFF et al., 2014).

3.2.8.3 Algoritmos empíricos

Para analisar o desempenho dos algoritmos padrão da cor do oceano (em inglês, *ocean colour* - OC) na região de estudo, os modelos foram aplicados às

R_{rs} *in situ* com as bandas simuladas do MODIS (412, 443, 488, 530, 547 nm) e comparados com a *Cl_a* medida *in situ*. O algoritmo da *Cl_a* oceânico global padrão é o algoritmo empírico de cor do oceano que usa a razão máxima de bandas (RMB) de R_{rs} entre as bandas do azul e do verde dos sensores de cor do oceano (O'REILLY et al., 1998; O'REILLY; WERDELL, 2019) com uma função polinomial de quarta ordem:

$$\log_{10}(Cl_a) = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4 \quad (3.9)$$

onde a representa os coeficientes de ajuste polinomial, e X é:

$$X = \log_{10} \left(\frac{\text{Max } R_{rs}(\lambda_b)}{R_{rs}(\lambda_g)} \right) \quad (3.10)$$

$R_{rs}(\lambda_b)$ refere-se à região espectral do azul (443 e 488 nm para o OC3; 412, 443 e 488 nm para o OC4; 412, 443, 488 e 530 nm para o OC5) e $R_{rs}(\lambda_g)$ refere-se à região espectral do verde (557 nm para o OC3, OC4 e OC5) e o valor da razão máxima de banda, para cada algoritmo é usado no ajuste polinomial, como descrito em O'Reilly e Werdell (2019). Embora simples, esta solução empírica tem fornecido as melhores estimativas de *Cl_a* por satélite do espaço em oceano aberto e águas costeiras com baixa influência de fontes continentais (BREWIN et al., 2015).

3.2.9 Análise de incertezas

As métricas estatísticas utilizadas para analisar o desempenho dos algoritmos de OC com a radiometria *in situ* e com os match-ups com dados de satélite (SEEGERS et al., 2018) foram: viés, erro médio absoluto (em inglês, *Mean Absolute Error*, MAE), raiz de erro quadrático médio (em inglês, *Root Mean Squared Error*, RMSE) e coeficiente de determinação R^2 . Essas métricas são calculadas da seguinte forma:

$$\text{BIAS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (y_i - x_i) \quad (3.11)$$

$$\text{MAE} = 10^{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\log_{10}(y_i) - \log_{10}(x_i)|} \quad (3.12)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (3.13)$$

onde y_i , é o valor estimado de Cla, x_i é o valor da Cla *in situ* e n é o número de amostras. O viés é uma das métricas estatísticas sugeridas por Seegers et al. (2018) para estimar erros sistemáticos e quantificar a diferença média entre esse estimador e o valor esperado aceito em estudos sobre produtos de satélites e cor do oceano. O R^2 indica como as 2 grandezas (modeladas e medidas) covariam e o RMSE indica os desvios. Uma vez que Cla exibe naturalmente uma distribuição não gaussiana e expande várias ordens de grandeza, as métricas de erro são convencionalmente determinadas usando transformação de log. Seegers et al. (2018), no entanto, sugere retornar as métricas transformadas em log para um espaço multiplicativo que fornece valores de incerteza mais realistas. No espaço multiplicativo, os valores estão próximos da unidade (1) quando o bias e o MAE são retornados no espaço logarítmico são zero. Valores calculados acima da unidade (>1) significam 20% (1,2), 40% (1,4), 50% (1,5) e assim por diante, acima do valor esperado. Abaixo da unidade (<1) eles significam viés negativo.

Para analisar o impacto da variabilidade bio-óptica sobre as incertezas dos algoritmos empíricos, os conjuntos de dados de a_{ph}^* e a_{cdm} normalizados pela absorção total menos a absorção da água pura (em inglês, *non water*) ($a_{\text{cdm}}/a_{\text{nw}}$) foram separados em quatro quartis com os valores mínimos (Q1) e máximos (Q4), seguindo a metodologia de Loisel et al. (2010). O viés médio foi então calculado separadamente para cada quartil para verificar se os valores máximos e mínimos dessas propriedades específicas poderiam ter algum impacto nas super e subestimações dos algoritmos OCx. Isso ocorre porque essas propriedades bio-ópticas específicas podem afetar a forma espectral da R_{rs} , quando variam independentemente da Cla, tornando a água "mais verde"

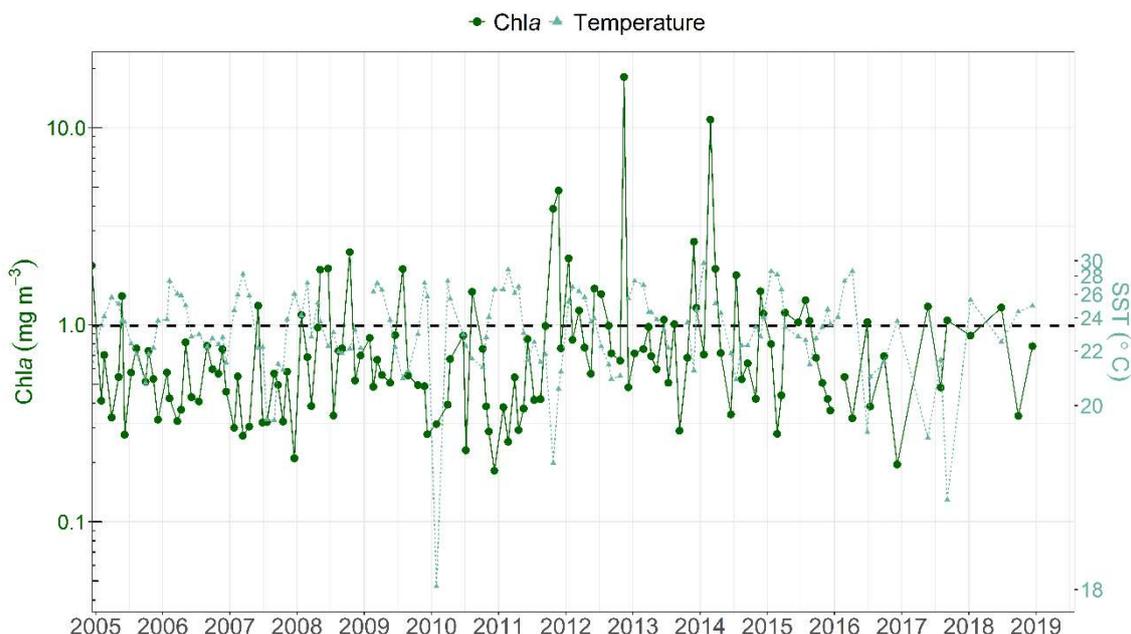
para altos valores de $a_{ph}^*(440)$ e/ou $a_{cdm}/a_{nw}(440)$ (com maior absorção de luz e menor R_{rs} , em comprimentos de onda curtos) e vice-versa (águas “mais azuis” para valores mais baixos de $a_{ph}^*(440)$ e/ou $a_{cdm}/a_{nw}(440)$) (BRICAUD et al., 1998; LOISEL et al., 2010; SZETO et al., 2011).

3.3 Resultados

3.3.1 Propriedades biogeoquímicas e ambientais

A Cla espectrofluorimétrica variou de 0,18 a 18,09 mg m⁻³ sem diferenças estatisticamente significativas entre as médias das estações, com média e desvio padrão de $1,0 \pm 1,83$ mg m⁻³, respectivamente, o que caracteriza a região como oligo-mesotrófica, com eventos episódicos de florações (Figura 3.3). Esses eventos foram mais frequentes durante as estações da primavera e verão, como também observado por Oliveira et al. (2021) na mesma região usando um conjunto de dados menor de Cla determinada por HPLC. Durante o período analisado foram identificados sete eventos de floração considerando o limiar da Cla medida *in situ* de 2 mg m⁻³ (dezembro de 2004, outubro de 2008, outubro e novembro de 2011, janeiro e novembro de 2012 e fevereiro de 2014) com o mais intenso atingindo o valor de 18 vezes o valor médio de Cla (Tabela 3.1).

Figura 3.3 - Variação temporal da concentração de clorofila-a (Cla) e temperatura da superfície do mar medidas *in situ*.



Dados medidos *in situ* de 2004 a 2019 na estação ANTARES-Ubatuba, onde a Cla está representada em verde e a TSM está representada em azul.

Fonte: Produção do autor.

A temperatura da superfície do mar (TSM) variou de 17,10 °C a 29,70 °C e apresentou variação sazonal (p -valor < 0,001, N = 130) e a salinidade de 29 a 36,5, com uma baixa variação ao longo do ano (34 ± 1). A Profundidade de Secchi variou de 3 m (em julho de 2009) a 21 m (em janeiro de 2010), com valor médio de 11,57 m (Tabela 3.1), indicando uma maior transparência durante o verão ($13,2 \pm 3$ m) e menor no inverno ($10,5 \pm 4$ m) (p -valor < 0,05, N = 130). A Cla teve correlação negativa significativa com a Profundidade de Secchi ($\rho = -0,71$, p -valor < 0,001, N = 130), sugerindo um papel importante, mas não exclusivo, da biomassa do fitoplâncton no campo de luz subaquático. A TSM apresentou apenas uma fraca correlação negativa ($\rho = -0,28$, p -valor = 0,002, N = 130) com a Cla. Enquanto a TSM mostrou um ciclo sazonal claro, a Cla não seguiu um padrão bem definido. No entanto, os eventos de floração parecem estar associados a menores TSM, o que sugere a influência de águas frias e ricas em nutrientes nesses eventos.

Tabela 3.1 - Faixa de variabilidade com média e desvio padrão (DP) da Cla (mg m^{-3}), TSM ($^{\circ}\text{C}$), salinidade e profundidade de Secchi (m) dos dados ANTARES-Ubatuba (2004-2019).

	Mínimo	Máximo	Média	DP
Cla (mg m^{-3})	0,18	18,09	1,00	1,83
Secchi (m)	3,00	21,00	11,57	4,03
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	17,10	29,70	23,55	2,42
Salinidade	29,06	36,50	34,20	1,32

Fonte: Produção do autor.

3.3.2 Propriedades bio-ópticas

Da mesma forma que a Cla, o a_{ph} também apresentou uma alta variabilidade, de $0,015$ a $0,184 \text{ m}^{-1}$, com o valor máximo 5 vezes maior que a média de $0,036 \pm 0,023 \text{ m}^{-1}$ em 440 nm (Tabela 3.2 e Figura 3.4). A absorção pelos detritos apresentou valores muito menores ($0,013 \pm 0,012 \text{ m}^{-1}$), mas também com uma alta faixa de variabilidade ($0,001 - 0,079 \text{ m}^{-1}$) em 440 nm . A absorção do CDOM foi na maior parte das vezes maior do que a do fitoplâncton e detritos nos comprimentos de onda mais curtos, com valor médio de $0,084 \pm 0,051 \text{ m}^{-1}$, e valores máximos e mínimos variando de $0,023$ a $0,420 \text{ m}^{-1}$ em 440 nm , também com alta variabilidade, sugerindo a provável contribuição de fontes alóctones. A inclinação espectral do CDOM variou de $0,010 - 0,029 \text{ nm}^{-1}$, com valor médio de $0,020 \pm 0,004 \text{ nm}^{-1}$, e a razão da inclinação (S_r) variou de $0,872$ a $3,937$, com média de $1,804 \pm 0,503$ (Tabela 3.2). Isso indica influência tanto do CDOM de alto peso molecular oriundo de fontes continentais (com menor S_r), quanto do CDOM de peso molecular leve de fontes autóctones marinhas, provavelmente também com processos de fotodegradação (com maior S_r) (Helms et al., 2008). Isso é consistente com trabalhos anteriores que revelaram tanto fontes alóctones de CDOM nas águas costeiras da PCSB, quanto processos intensivos de fotodegradação (GONÇALVES-ARAÚJO et al., 2019).

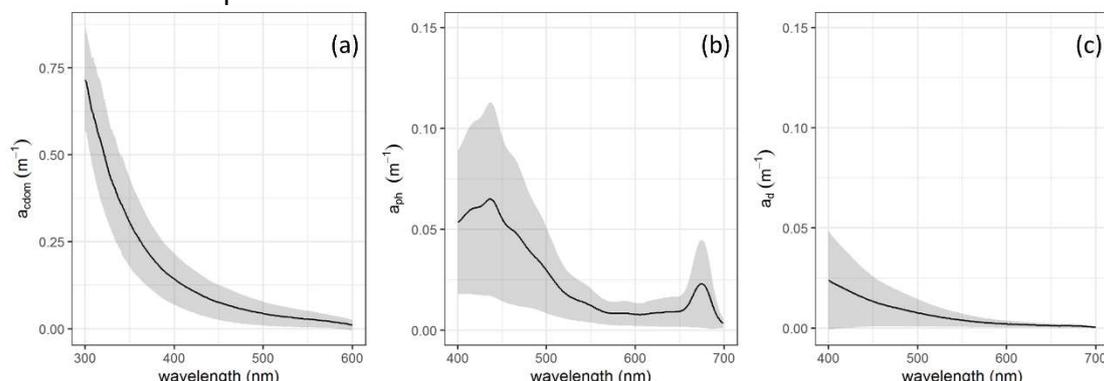
Tabela 3.2 - Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão (DP) para as propriedades bio-ópticas dos dados ANTARES-Ubatuba (2004-2019).

	Mínimo	Máximo	Média	DP
$a_{ph}(m^{-1})$	0,015	0,184	0,036	0,023
$a_{ph}^*(m^2\ mg^{-1})$	0,008	0,106	0,053	0,019
$a_d(m^{-1})$	0,001	0,079	0,013	0,012
$a_{cdom}(m^{-1})$	0,023	0,420	0,084	0,051
$S_{cdom}(nm^{-1})$	0,007	0,029	0,019	0,003
Sr	0,872	3,937	1,804	0,503

Fonte: Produção do autor.

Além de variar com a biomassa do fitoplâncton, os espectros de a_{ph} (Figura 3.4 b) também variam com a composição dos pigmentos e, portanto, com as espécies, e os efeitos de auto sombreamento do pigmento intracelular, ou seja, o efeito de empacotamento, que está correlacionado com o tamanho da célula (BRICAUD et al., 1995; CIOTTI et al., 2002). Para mensurar esse efeito, utilizou-se o a_{ph}^* normalizado, que apresentou valor médio de $0,053 \pm 0,019\ m^2\ mg^{-1}$ e variou de 0,008 a $0,106\ m^2\ mg^{-1}$. Estes são valores esperados considerando a dominância geral de nanoplâncton (2 - 20 μm) nas amostras, mas com uma estrutura de comunidade ocasionalmente dominada por células de picoplâncton (< 2 μm) com alto valor de a_{ph}^* , e em outros momentos com células de micoplâncton (> 20 μm) com baixo a_{ph}^* . Os casos de menor valor de a_{ph}^* provavelmente estão associados à dominância de diatomáceas devido a intrusões da ACAS depois de eventos de ressurgência local (OLIVEIRA et al., 2021).

Figura 3.4 – Coeficiente de absorção espectral do fitoplâncton (a); detritos (b) e CDOM (c), com a média e o desvio padrão destacados em preto e cinza, respectivamente.

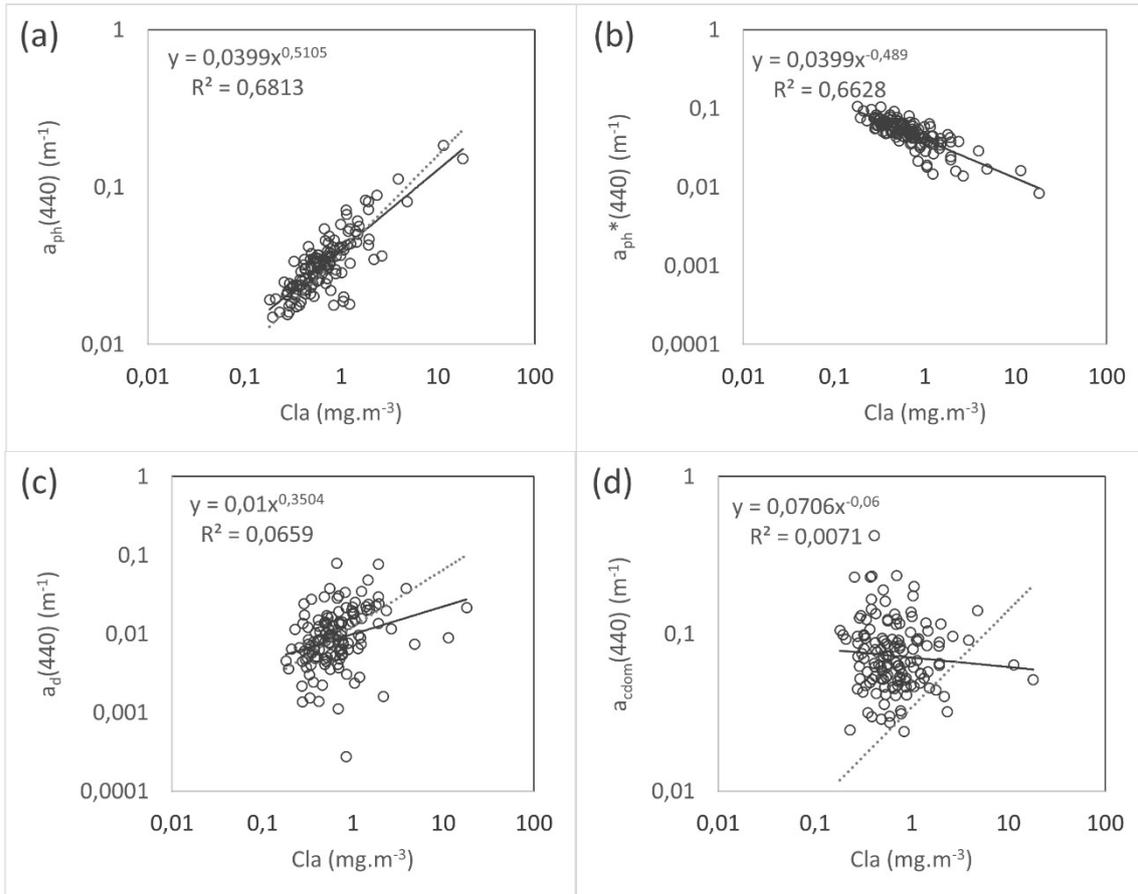


Fonte: Produção do autor.

O a_{ph} (440) apresentou moderada correlação com a Cla ($R^2 = 0,68$) (Figura 3.5 a), muito próxima da relação obtida no trabalho de Bricaud et al. (1998) para as águas oceânicas (também utilizando Cla espectrofluorimétrica) (Figura 3.5). O $a_{ph}^*(440)$ também apresentou forte relação negativa com a Cla ($R^2 = -0,66$) (Figura 5 b), sugerindo dominância do picoplâncton ($a_{ph}^*(440) > 0,09 \text{ m}^2 \text{ mg}^{-1}$) em águas de baixa Cla ($< 0,5 \text{ mg m}^{-3}$) e dominância de micoplâncton ($a_{ph}^*(440) < 0,02 \text{ m}^2 \text{ mg}^{-1}$) em águas com alta Cla ($> 2 \text{ mg m}^{-3}$), conforme relatado em outros estudos (BRICAUD et al., 1998; BRICAUD, 2004; OLIVEIRA et al., 2021).

A fração de detritos não teve forte relação com a Cla ($R^2 = 0,07$) e apresentou os valores mais baixos de absorção em 440 nm (Figura 3.5 c), sugerindo uma influência baixa, mas significativa de fontes alóctones, provavelmente de ressuspensão de sedimentos e drenagem continental. A absorção do CDOM em 440 nm foi maior do que a observada em águas oceânicas globais e não teve relação com a Cla, apoiando a ideia da influência de fontes alóctones na estação ANTARES-Ubatuba (Figura 3.5 d).

Figura 3.5 - Relação entre os coeficientes de absorção biogênicos e a Cla.



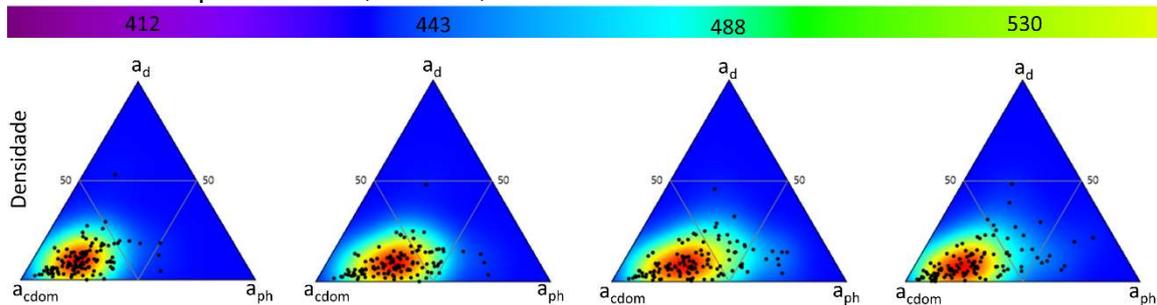
A figura mostra os ajustes de regressão da lei de potência (linha contínua) obtidos para esse estudo e os obtidos por Bricaud et al. (1998) em (a) e (c) e por Bricaud et al. (2010) em (d).

Fonte: Produção do autor.

O conceito de uma classificação triangular das águas naturais com base no balanço de absorção dos COA foi primeiramente descrito por Prieur e Sathyendranath (1981), onde as amostras de águas típicas do Caso 1, descritas como dominadas pela absorção do fitoplâncton (com detritos e CDOM covariantes), ficam concentradas próximas ao vértice referente ao fitoplâncton. As amostras de águas do Caso 2, aquelas com fontes alóctones de CDOM e detritos, ficam espalhadas por qualquer outro lugar do diagrama, uma vez que as proporções relativas dos três componentes de absorção devem variar muito nessas águas (IOCCG, 2000; BABIN et al., 2003). A Figura

3.6 mostra a contribuição relativa dos coeficientes de absorção biogênicos com um gráfico de densidade dos diagramas triangulares em quatro comprimentos de onda espectrais (412-530 nm). A maior densidade em torno do vértice do CDOM para todos os comprimentos de onda indica águas do "tipo CDOM", de acordo com IOCCG (2000). Outros estudos na região mostram um padrão semelhante para a PCSB (FERREIRA et al., 2014; GONÇALVES-ARAÚJO et al., 2019).

Figura 3.6 - Diagrama ternário da variação do coeficiente de absorção a_d , a_{cdom} e a_{ph} para 412 nm, 443 nm, 488 nm e 530 nm.

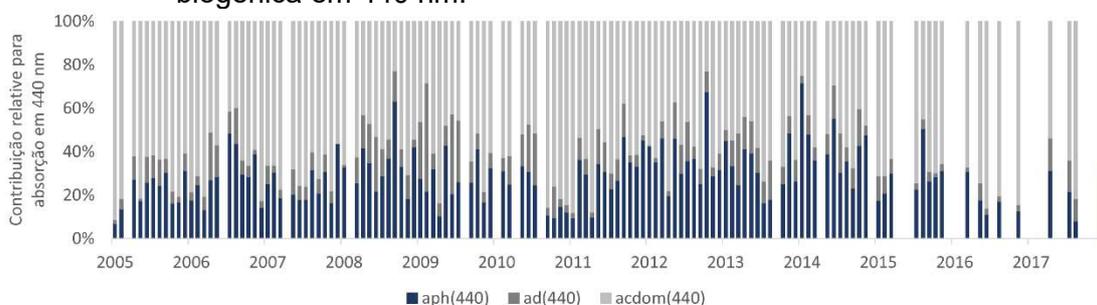


Fonte: Produção do autor.

Ao longo dos quinze anos de amostragem de dados *in situ*, o CDOM foi o COA dominante contribuindo para mais de 50% da absorção de luz biogênica em 440 nm (Figura 3.7) em 77% dos casos. Sua contribuição relativa para a absorção biogênica em 440 nm variou de 23% a 90%, com média e desvio padrão de $60 \pm 15\%$. As estações da primavera e do verão apresentaram um valor médio ligeiramente maior de CDOM em 440 nm ($0,084$ e $0,094 \text{ m}^{-1}$, respectivamente) em comparação com o outono - inverno ($0,077$ - $0,078 \text{ m}^{-1}$), mas também com maior desvio padrão, especialmente no verão ($0,07 \text{ m}^{-1}$) (Figura 3.8). O verão é a estação chuvosa para a margem continental do Sudeste Brasileiro (CAVALCANTI et al., 2009) e, além do efeito da vazão de rios de pequeno porte, existe a influência da drenagem continental contribuindo para os maiores valores de CDOM na estação ANTARES-Ubatuba, considerando a distância de 18 milhas náuticas da costa. Por outro lado, em condições mais estratificadas e com a ausência da influência continental,

processos de fotobranqueamento, que são mais comuns de acontecer no inverno (GONÇALVES-ARAUJO et al., 2019), também podem ocorrer, explicando em parte a alta variabilidade durante essa estação, uma vez que baixos valores de S_r também foram registrados em alguns casos (Tabela 3.2). Durante os meses de inverno, além da influência local de fontes continentais, as intrusões da Água da Pluma do Rio da Prata durante eventos extremos poderiam explicar em parte o CDOM acima da média global (Figura 3.7) em toda a região da PCSB (GONÇALVES-ARAUJO et al., 2019).

Figura 3.7 - Séries temporais da contribuição proporcional dos coeficientes de absorção de a_{ph} (440), a_d (440), e a_{cdom} (440) para a absorção total biogênica em 440 nm.

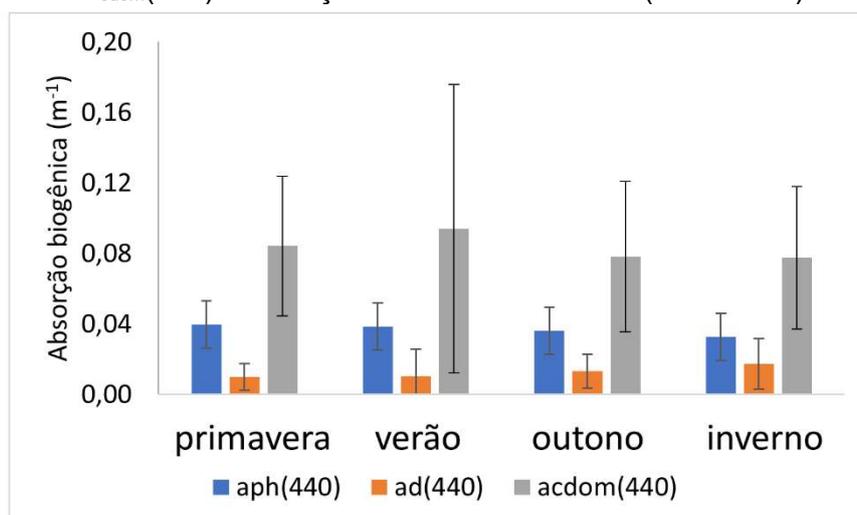


Fonte: Produção do autor.

A contribuição de a_{ph} (440) para a absorção total biogênica variou de 7% a 70% (média, $30 \pm 12\%$), com valores mais elevados registrados principalmente em eventos de floração. Surpreendentemente, em 3 dos 7 eventos de floração, os valores de a_{ph} (440) ficaram abaixo do valor médio de $0,036 \text{ m}^{-1}$, o que poderia ser explicado pelo efeito de empacotamento para essas amostras, considerando os baixos valores de a_{ph}^* (440) de $0,016 \text{ m}^2 \text{ mg}^{-1}$, $0,013 \text{ m}^2 \text{ mg}^{-1}$ e $0,016 \text{ m}^2 \text{ mg}^{-1}$ registrados respectivamente, em janeiro de 2012, novembro de 2013 e fevereiro de 2014. Devido a processos naturais que aumentam o crescimento do fitoplâncton ao longo do ano (por exemplo, mistura da coluna de água no inverno e eventos de ressurgência no verão) (BRANDINI et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2021), não há um padrão sazonal claro para o a_{ph} (440), assim como observado na Cla (Figura 3.8).

O $a_d(440)$ foi o COA menos representativo em relação a absorção biogênica em 440 nm, com média de $10 \pm 7\%$. Houve apenas um caso em que $a_d(440)$ foi dominante com 50% de contribuição na absorção biogênica (março de 2009), provavelmente devido à precipitação acima da média sobre a região nos dias anteriores a amostragem *in situ* (INPE, 2009). A absorção de detritos em 440 nm apresentou um valor médio ligeiramente superior durante os meses de inverno ($0,017 \pm 0,014 \text{ m}^{-1}$, em comparação com $0,010 \pm 0,007 \text{ m}^{-1}$ no verão), como mostra a Figura 3.8, o que pode estar associado à maior influência de ventos e ondas que misturam a coluna d'água e promovem a ressuspensão de sedimentos (CECILIO; DILLENBURG, 2019). Além disso, intrusões ocasionais da APP atingindo a estação ANTARES-Ubatuba poderiam eventualmente contribuir para um maior $a_d(440)$ durante o inverno.

Figura 3.8 - Valores médios sazonais do coeficiente de absorção de $a_{ph}(440)$, $a_d(440)$, e $a_{cdom}(440)$ na estação ANTARES-Ubatuba (2004-2019).



Fonte: Produção do autor.

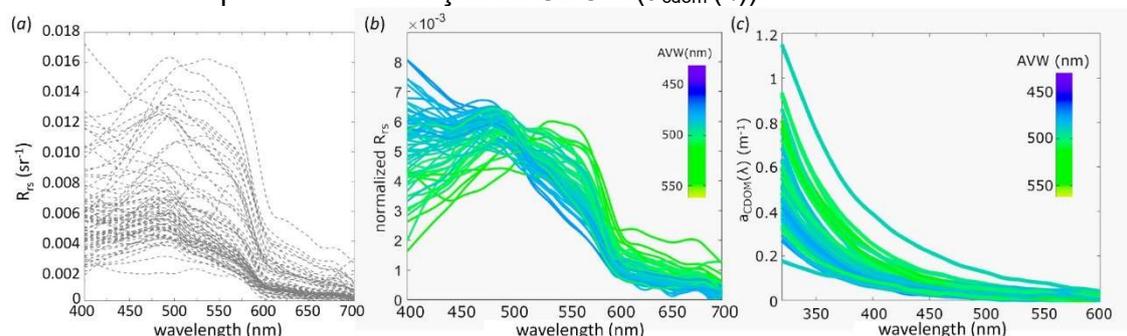
3.3.3 AVW e classificação dos tipos de água

Devido aos grandes desafios na obtenção de dados precisos de R_{rs} *in situ* em condições ambientais adversas (ventos e ondas fortes e céu nublado), boa parte dos dados amostrados na estação ANTARES-Ubatuba teve que passar

por controle de qualidade rigoroso. Assim, o subconjunto de R_{rs} *in situ* foi composto por 84 coletas de dados, nas quais a Cla variou de 0,20 a 4,79 mg m⁻³, com média de $0,79 \pm 0,62$ mg m⁻³. Apesar de uma menor faixa de variabilidade neste conjunto de dados, ainda foi possível capturar o padrão geral de condições oligo-mesotróficas com florações episódicas (> 2 mg m⁻³).

Alguns espectros $R_{rs}(\lambda)$ ainda apresentaram valores anormalmente altos ($> 0,012$ sr⁻¹) em comparação com os valores esperados para águas com uma quantidade mínima de sedimentos suspensos (Figura 3.9 a), sugerindo a influência remanescente do sol não totalmente corrigido e brilho do céu. Quando normalizadas, as variações de amplitude de primeira ordem nos espectros R_{rs} são, no entanto, removidas, mantendo-se apenas as variações espectrais de segunda ordem mais relacionadas com as propriedades ópticas em água (Figura 3.9 b).

Figura 3.9 - Espectros de reflectância de sensoriamento remoto *in situ* ($R_{rs}(\lambda)$), espectros de reflectância de sensoriamento remoto normalizados e espectros de absorção do CDOM ($a_{cdom}(\lambda)$).



$R_{rs}(\lambda)$ (a), $r_n(\lambda)$ (b) e $a_{cdom}(\lambda)$ (c) estão representados por cores de acordo com o AVW.

Fonte: Produção do autor.

A reflectância de sensoriamento remoto normalizada ($r_n(\lambda)$) mostrou uma variabilidade relativamente alta na forma espectral (Figura 3.9 b) provavelmente devido à variabilidade dos COA mostrados na Seção anterior. O AVW variou de 474 nm a 531 nm com a média centrada em 492 nm. Isso

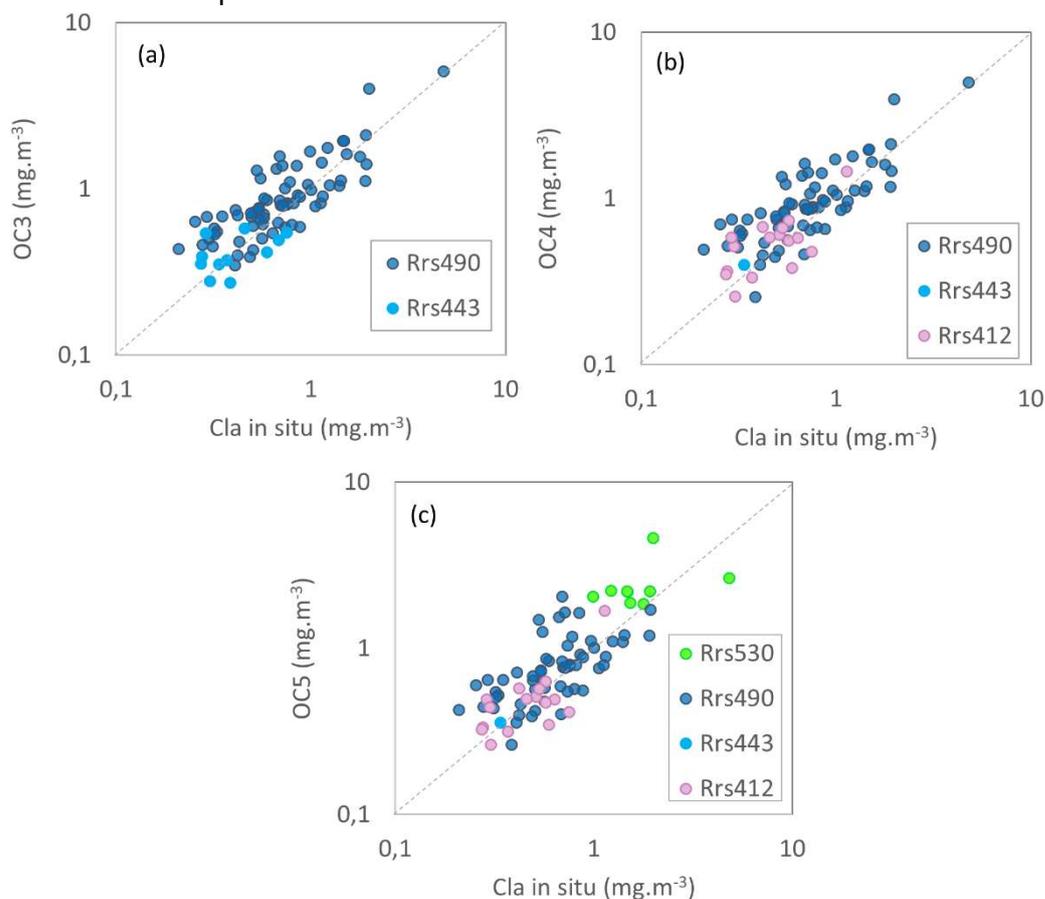
indicou tipos de água azul-esverdeada, dependendo da concentração dos COA, se o efeito da reflexão do céu na água for considerado nulo. Como o CDOM desempenhou um papel importante no *budget* de absorção biogênica, codificamos por cores os espectros de absorção do CDOM com o índice AVW (Figura 3.9 c), que indica que as águas com alto CDOM têm espectros de R_{rs} com picos mais altos próximo da banda verde (que é menos influenciada pela absorção de CDOM).

Os resultados da análise de cluster *k*-médias sugeriram a existência de dois tipos ópticos de água: um com espectros do tipo azul (OWT-1, N=44) e outro com picos mais altos nas bandas verdes (OWT-2, N=28). O primeiro tipo é característico de menor concentração dos COA, todas com bandas absorventes na região azul (com $a_{cdom}(440)$ médio de $0,07\text{ m}^{-1}$, $a_{ph}(440)$ médio de $0,03\text{ m}^{-1}$ e $a_d(440)$ médio de $0,01\text{ m}^{-1}$). O segundo tipo (OWT-2) corresponde a maior absorção de CDOM ($0,08\text{ m}^{-1}$), em segundo lugar a maior absorção do fitoplâncton ($0,05\text{ m}^{-1}$) e por último detritos ($0,01\text{ m}^{-1}$) (em 440 nm). Embora o CDOM seja o constituinte óptico dominante, os OWTs foram fortemente relacionados às variações na biomassa do fitoplâncton, pois o $a_{ph}(440)$ apresentou a maior diferença entre as classes. O OWT-1 de fato caracterizou águas com Cla mais baixa ($0,53 \pm 0,23\text{ mg m}^{-3}$), enquanto OWT-2 águas com Cla mais alta ($1,30 \pm 0,89\text{ mg m}^{-3}$).

3.3.4 Implicações para as estimativas de Cla

Os algoritmos empíricos tiveram um desempenho geral semelhante com o R^2 variando de 0,61 - 0,66 (N = 83), um viés positivo médio de 1,17 a 1,25 (superestimação de 17 a 25%) e MAE de 1,38 - 1,40 (erro relativo de 38 - 40%) (Figura 3.10 e Tabela 3.3). O algoritmo OC3 foi ligeiramente melhor que os algoritmos OC4 e OC5, apesar de usar apenas 2 bandas no numerador da RMB (443 e 488 nm). Para todos os 3 algoritmos, 488 nm foi a banda principal usada na RMB.

Figura 3.10 - Comparação das estimativas de Cla por OC3, OC4 e OC5 com a Cla espectrofluorimétrica.



Na figura as cores representam o comprimento de onda utilizado em cada amostra de acordo com o modelo para o conjunto de dados ANTARES-Ubatuba (2004-2019).

Fonte: Produção do autor.

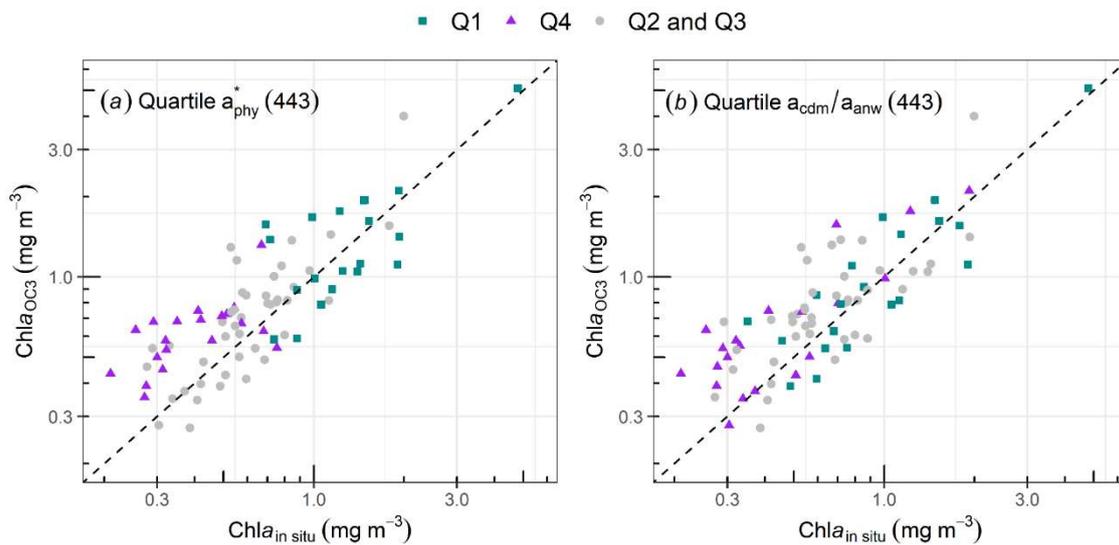
Tabela 3.3 - Valores do coeficiente de regressão (R^2), viés médio e erro médio absoluto (MAE), calculados entre a concentração medida e estimada de clorofila-a (Cla) (mg m^{-3}) com o OC3, OC4 e OC5, usando a reflectância de sensoriamento remoto *in situ* (R_{rs}) ($N = 84$) do conjunto de dados ANTARES-Ubatuba (2004-2019).

	R^2	bias	MAE
OC3	0,66	1,20	1,38
OC4	0,64	1,25	1,41
OC5	0,61	1,17	1,40

Fonte: Produção do autor.

Ao analisar as estatísticas de erro separadamente para os casos com os maiores valores de $a_{ph}^*(440)$ (Q4), o viés médio foi muito maior (1,53 ou superestimação de 53%) (N = 20) do que para os casos com os menores $a_{ph}^*(440)$ (Q1) (1,02 ou 2%) (N = 20) e valores médios (Q2&3) (1,16 ou 16%) (N = 38) (Tabela 3.4). Como esperado, o $a_{ph}^*(440)$ teve uma forte correlação negativa com a Cla ($\rho = -0,81$, p -valor < 0,001, N = 130), e os casos com maior $a_{ph}^*(440)$ foram geralmente associados com menor Cla (< 0,8 mg m⁻³) (Figura 3.11). Em relação à proporção de CDOM e detritos (a_{cdm}) para a absorção total de matéria não aquoso (a_{nw}), os casos com maior $a_{cdm}/a_{nw}(440)$ (Q4) também tiveram vieses positivos maiores (1,40 ou 40%) (N = 20) em comparação com os casos com os valores mais baixos (Q1) (1,02 ou 2%) (N = 20) e médios (Q2&3) (1,21 ou 21%) (N = 38) (Tabela 3.4). Neste caso, como CDOM e detritos não tiveram nenhuma relação com a Cla, os maiores vieses relacionados a maior $a_{cdm}/a_{nw}(440)$ foram independentes a Cla (Figura 3.11 e Tabela 3.4).

Figura 3.11 - Comparação entre a Cla modelada (OC3) e medida (N = 84), indicando as amostras com os maiores (Q4) e menores (Q1) valores de $a_{ph}^*(440)$ e $a_{cdm}/a_{nw}(440)$.



Fonte: Produção do autor.

Tabela 3.4 – Concentração média de Cla (mg m^{-3}), $a_{\text{ph}}^*(440)$ ($\text{m}^2 \text{mg}^{-1}$), $a_{\text{cdm}}/a_{\text{nw}}(440)$ e viés do OC3 (em comparação com a Cla medida), para o quartil maior (Q4), menor (Q1) e médio (Q2&Q3).

	N	Cla (mg m^{-3})	$a_{\text{ph}}^*(440)$ ($\text{m}^2 \text{mg}^{-1}$)	bias
Q1 $a_{\text{ph}}^*(440)$	20	1,42	0,03	1,02
Q4 $a_{\text{ph}}^*(440)$	20	0,42	0,08	1,53
Q2&Q3 $a_{\text{ph}}^*(440)$	38	0,65	0,05	1,16
		Cla (mg m^{-3})	$a_{\text{cdm}}/a_{\text{nw}}(440)$	bias
Q1 $a_{\text{cdm}}/a_{\text{nw}}(440)$	20	1,14	0,57	1,02
Q4 $a_{\text{cdm}}/a_{\text{nw}}(440)$	20	0,54	0,85	1,40
Q2&Q3 $a_{\text{cdm}}/a_{\text{nw}}(440)$	38	0,73	0,71	1,21

Fonte: Produção do autor.

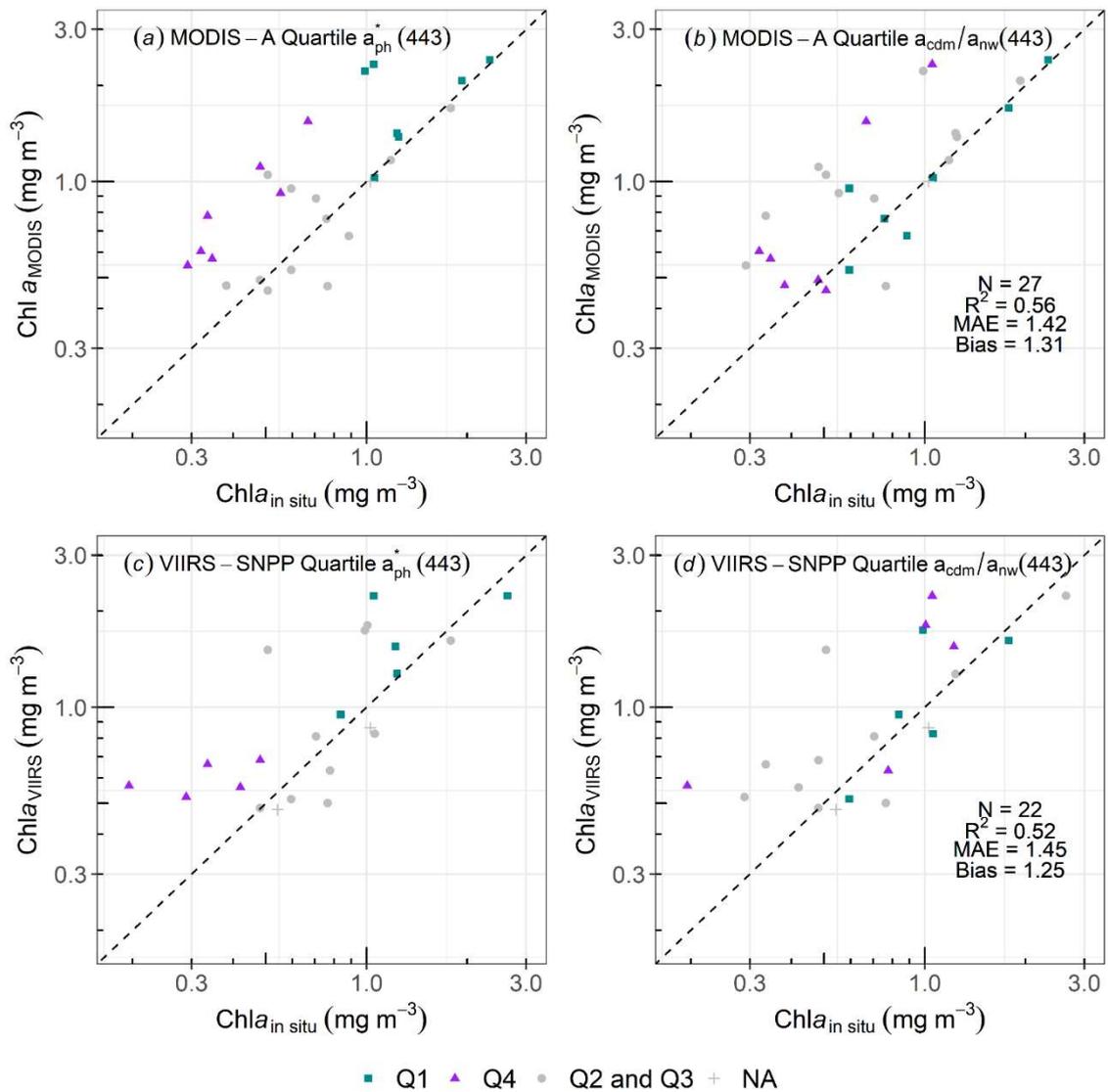
Em relação aos OWTs, o viés médio foi apenas ligeiramente maior para OWT-2 (1,18) (N = 28) em comparação com o OWT-1 (1,09) (N = 44), sugerindo que mesmo usando os espectros de R_{rs} normalizados, o esquema da classificação k -médias ainda estava altamente relacionado a Cla e não tanto às propriedades ópticas específicas que podem ter um alto impacto no desempenho do OCx, mesmo considerando a diferença entre o N amostral nos OWTs.

3.3.5 Match-ups

A Cla estimada pelo MODIS-Aqua (usando OC3M) apresentou um viés médio de 1,31 (superestimação de 31%) e MAE de 1,42 (42%), com um R^2 de 0,56 (N = 27), em comparação com a Cla medida *in situ*. Aplicando a análise de quartil, os vieses positivos mais altos foram associados principalmente ao $a_{\text{ph}}^*(440)$ mais alto (98% de superestimação para Q4, N = 7) ou maior $a_{\text{cdm}}/a_{\text{nw}}(440)$ (51% de superestimação para Q4, N = 7) (Figura 3.12 e Tabela 3.5). Houve apenas um caso que teve um viés positivo alto (120%) e nenhuma associação aparente com essas propriedades ópticas específicas, que ocorreu em outubro de 2012. Curiosamente, tanto o VIIRS quanto a Cla estimada por R_{rs} *in situ*

com o OC3 também mostraram um grande viés positivo neste caso (70-77%). Portanto, outras propriedades ópticas (ou seja, relacionadas ao coeficiente de retroespalhamento de partículas) ou mesmo a fragmentação do fitoplâncton poderiam explicar as maiores incertezas.

Figura 3.12 - Cla (mg m^{-3}) (OCx) estimada pelo MODIS-Aqua e pelo VIIRS-SNPP em comparação com medições *in situ*. As cores representam as amostras com maior (Q4) e menor (Q1) $a_{ph}^*(440)$ (a) e (c), e $a_{cdm}/a_{nw}(440)$ (b) e (d).



Fonte: Produção do autor.

Tabela 3.5 – Concentração média de Cl_a ($mg\ m^{-3}$), $a_{ph}^*(440)$ ($m^2\ mg^{-1}$), $a_{cdm}/a_{nw}(440)$ e viés do OC3 dos dados de satélite (em comparação com a Cl_a medida), para o quartil maior (Q4), menor (Q1) e médio (Q2&3) dos match-ups.

MODIS-Aqua				
	N	Cl_a ($mg\ m^{-3}$)	$a_{ph}^*(440)$	bias
Q1 $a_{ph}^*(440)$	7	1,41	0,03	1,31
Q4 $a_{ph}^*(440)$	7	0,43	0,07	1,98
Q2&3 $a_{ph}^*(440)$	12	0,88	0,05	1,05
	N	Cl_a ($mg\ m^{-3}$)	$a_{cdm}/a_{nw}(440)$	bias
Q1 $a_{cdm}/a_{nw}(440)$	7	1,14	0,54	1,01
Q4 $a_{cdm}/a_{nw}(440)$	7	0,54	0,85	1,51
Q2&3 $a_{cdm}/a_{nw}(440)$	12	0,84	0,70	1,40
VIIRS-SNPP				
	N	Cl_a ($mg\ m^{-3}$)	$a_{ph}^*(440)$	bias
Q1 $a_{ph}^*(440)$	5	1,40	0,02	1,22
Q4 $a_{ph}^*(440)$	5	0,34	0,07	1,82
Q2&3 $a_{ph}^*(440)$	10	0,87	0,04	1,14
	N	Cl_a ($mg\ m^{-3}$)	$a_{cdm}/a_{nw}(440)$	bias
Q1 $a_{cdm}/a_{nw}(440)$	5	1,05	0,57	1,04
Q4 $a_{cdm}/a_{nw}(440)$	5	0,85	0,86	1,63
Q2&3 $a_{cdm}/a_{nw}(440)$	10	0,79	0,74	1,30

Fonte: Produção do autor.

Os match-ups do VIIRS-SNPP mostraram estatísticas semelhantes com um viés médio de 1,25 (superestimação de 25%) e MAE de 1,45 (45%), com um R^2 de 0,52 ($N = 22$). Aplicando a análise de quartil, os maiores vieses positivos foram associados principalmente a valores de $a_{ph}^*(440)$ mais altos (82% de superestimação para Q4, $N = 7$) ou a maiores valores de $a_{cdm}/a_{nw}(440)$ (63% de superestimação para Q4, $N = 7$) (Figura 3.12 e Tabela 3.5). Houve também um

caso em julho de 2013 que teve um grande viés positivo (200%) não associado às propriedades ópticas específicas. Neste caso, a estimativa do MODIS-Aqua também superestimou a Cla medida *in situ* em 100%, mas a Cla estimada por R_{rs} *in situ* teve um viés baixo (17%). Observando as imagens de satélite em RGB do VIIRS em cor verdadeira, neblina e nuvens finas estavam presentes na região (não mostradas aqui), o que pode ter comprometido a estimativa de R_{rs} do satélite, pois essas nuvens são difíceis de mascarar adequadamente.

3.4 Discussão

A estação ANTARES-Ubatuba caracteriza-se como um ambiente oligo-mesotrófico com eventos episódicos de floração. A variação de Cla observada na série temporal *in situ* é coerente com outros estudos realizados na PCSB (AIDAR et al., 1993; BRANDINI et al., 2014; GONÇALVES-ARAUJO et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2021). A biomassa do fitoplâncton, indexada pela Cla, não mostrou um ciclo sazonal claro, mas sim alguns eventos ocasionais de floração, especialmente relacionados à intrusão de águas frias pela ACAS, que ocorrem principalmente durante as estações de primavera e verão na região, conforme também relatado em outros estudos (BRANDINI et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2021). O coeficiente normalizado de absorção do fitoplâncton indicou uma estrutura de comunidade predominantemente dominada por células pertencentes ao nano e ao picoplâncton. Células menores (pico) foram especialmente associadas a águas com menores valores de Cla, e células maiores (micro) com águas onde maiores valores de Cla foram registrados. Este padrão corrobora com os achados de Oliveira et al. (2021) no mesmo local, usando como base composição de pigmentos e dados de microscopia óptica, e também com as observações de outros estudos na região (AIDAR et al., 1993; CIOTTI; BRICAUD, 2006). Especificamente o evento de floração com a maior Cla observada na série temporal ($18,09 \text{ mg m}^{-3}$) teve o menor a_{ph}^* (440) ($0,008 \text{ m}^2 \text{ mg}^{-1}$), e foi associado a uma floração multiespécie. De acordo com Oliveira e colaboradores (2021) as principais espécies associadas a este evento foram compostas principalmente por *Mesodinium major*, um ciliado mixotrófico de tamanho grande ($40 \times 50 \text{ }\mu\text{m}$) em simbiose com criptófitas

(JOHNSON et al., 2016), e uma variedade de diatomáceas, especialmente aquelas pertencentes ao gênero *Pseudo-nitzschia* (VIANNA et al., 2023) No geral, a absorção do fitoplâncton em 440 nm contribuiu com $30 \pm 17\%$ da absorção total de luz biogênica, o que é comparável a estudos anteriores na PCSB (CARVALHO et al., 2014; GONÇALVES-ARAUJO et al., 2019) e em outras regiões costeiras onde outros COA além do fitoplâncton também desempenham um papel importante no campo de luz subaquático (BLONDEAU-PATISSIER et al., 2009; BLOUGH; DEL VECCHIO, 2002; MELER et al., 2016).

Apesar de ter uma contribuição relativamente baixa para a absorção total de luz biogênica (média, $10 \pm 7\%$ em 440 nm), a absorção de detritos teve uma relação independente com a Cla, sugerindo a influência de fontes externas. Essas fontes parecem ter um papel mais importante no inverno, o que pode estar relacionado à mistura da coluna d'água e ressuspensão do fundo devido a ventos e ondas mais fortes (FERREIRA et al., 2014; CECILIO; DILLENBURG, 2019). Apesar de estar longe de pequenas fontes fluviais (>18 km), os eventos de precipitação intensa durante as estações chuvosas de primavera-verão também podem aumentar potencialmente a contribuição de partículas não-algais (por exemplo, até 50% em 440 nm), conforme observado na campanha de março de 2009.

O CDOM foi o constituinte óptico dominante durante todo o ano, com exceção apenas em alguns eventos de floração e em outros poucos casos (<33%). Outros estudos na PCSB documentaram maior absorção de CDM associada a AC da plataforma interna-média (GONÇALVES-ARAUJO et al., 2019). No sul da PCSB, estudos anteriores também relataram um aumento sazonal na absorção de CDM durante o inverno, associado à intrusão da APP (Carvalho et al., 2014). Isso não foi observado nesse estudo, confirmando que a estação costeira ANTARES-Ubatuba só recebe intrusões esporádicas da APP em eventos mais significativos. Outros estudos mais focados em locais costeiros na plataforma interna da PCSB relataram um aumento sazonal no CDOM durante a estação chuvosa da primavera-verão associado ao escoamento

continental local, além de fontes autóctones de degradação de espécies de algas e consumo de bactérias (FERREIRA et al., 2014).

Embora apenas pequenos rios desaguem no sistema, a costa sudeste brasileira é coberta pela segunda maior floresta tropical do Brasil - a Mata Atlântica, e uma cadeia montanhosa chamada Serra do Mar, favorecendo uma estação chuvosa intensa e aumentando a drenagem continental na região (GUAUQUE-MELLADO et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2016). Portanto, as contribuições terrígenas de CDOM para as águas costeiras da PCSB provavelmente são significativas (GONÇALVES-ARAUJO et al., 2019). A razão de inclinação espectral (S_r) do CDOM indicou a presença de fontes autóctones e alóctones de CDOM na estação costeira ANTARES-Ubatuba, com uma ampla gama de valores (FICHOT; BENNER, 2012; HELMS et al., 2008). Os maiores valores de S_r durante a primavera-verão também revelaram efeitos de processos de fotodegradação (HELMS et al., 2008). Gonçalves-Araujo et al. (2019) observaram CDOM fotodegradado na AC na PCSB durante uma campanha de verão e discutiram o papel dos processos hidrodinâmicos, como o aprisionamento da AC na superfície devido ao transporte de Ekman, expondo-o por mais tempo à radiação solar. Isso pode explicar a maior variabilidade do $a_{\text{cdom}}(440)$ durante a primavera-verão com influência simultânea de maiores contribuições de escoamento continental e processos de fotodegradação. De qualquer maneira, o CDOM contribuiu com $60 \pm 14\%$ em média para a absorção total de luz biogênica (em 440 nm), o que é comparável com outros estudos na região (GONÇALVES-ARAUJO et al., 2019) e com outras regiões costeiras do mundo (BLOUGH; DEL VECCHIO, 2002; MELER et al., 2016), classificando as águas do sistema como águas do tipo CDOM (ou seja, águas opticamente dominadas pela absorção de CDOM nos comprimentos de onda curtos).

Em relação aos espectros de R_{rs} , a estação costeira ANTARES-Ubatuba apresentou 2 classes de OWTs: uma de águas “azuis” com menores contribuições de CDM, fitoplâncton e detritos para a absorção de luz; e outra de águas “verdes” com maiores concentrações de CDM, fitoplâncton e detritos – nesta ordem de importância. Embora o CDOM tenha sido o COA dominante, as

variações na absorção de luz do fitoplâncton e a Cla associada tiveram um papel importante na determinação dos OWTs, sendo o COA com maiores diferenças entre as propriedades das 2 classes. Isso sugere que as variações espectrais do R_{rs} na estação costeira de Ubatuba são reguladas principalmente pela Cla.

Assim, apesar de ser um tipo de água típico do “Caso 2”, com dominância espectral do CDOM no campo de luz subaquático, os algoritmos empíricos OCx mostraram um desempenho razoável, com incertezas dentro da faixa esperada para águas oceânicas globais (<30%) (O' REILLY et al., 1998; O'REILLY; WERDELL, 2019). O esquema mais simples da abordagem do OC3 usando apenas 2 bandas azuis para a RMB foi mais bem-sucedido em “selecionar” a melhor razão de bandas (488:547), que está mais relacionada à absorção do pigmento do fitoplâncton e menos à absorção do CDM.

Além da influência da maior absorção de CDM contribuindo para o viés positivo geral do OC3, o coeficiente específico de absorção do fitoplâncton em 440 nm também desempenhou um papel importante no viés das estimativas de Cla, especialmente para águas com menores valores de Cla (<1 mg m⁻³). Além disso, efeitos combinados de maiores contribuições de CDM para a absorção de luz e maior $a_{ph}^*(440)$ foram provavelmente as principais fontes de incertezas relacionadas à variabilidade bio-óptica, com o OC3 superestimando a Cla, como também relatado em outros estudos (CHERUKURU et al., 2019; LOISEL et al., 2010; RÖTTGERS et al., 2016; SZETO et al., 2011). Variações na absorção de CDM e no coeficiente específico do fitoplâncton, que são independentes ou variam não linearmente com a Cla, podem causar desvios nas estimativas do OCx, pois causam variações espectrais na R_{rs} (LOISEL et al., 2010; SZETO et al., 2011). A maior absorção de CDM e $a_{ph}^*(440)$ para uma determinada Cla diminuem a R_{rs} nos comprimentos de onda mais curtos, tornando a água “mais verde”, diminuindo assim a RMB e aumentando a Cla estimada com o algoritmo OCx.

O algoritmo OC3 utilizado nos dados de satélite do MODIS-Aqua e do VIIRS-SNPP teve um desempenho razoavelmente bom, dentro dos erros esperados

para produtos de OC globais, ou seja, <30% (BAILEY; WERDELL, 2005; SEEGERS et al., 2018), e de forma semelhante a outros estudos dentro da PCSB, sem a influência da APP (GIANNINI et al., 2013; CARVALHO et al., 2014; SILVA; GARCIA, 2021). Maiores contribuições de $a_{cdm}/a_{nw}(440)$ e/ou $a_{ph}^*(440)$ também foram provavelmente as principais fontes de vieses positivos para as estimativas de satélite.

Outras fontes de incerteza nas estimativas de OCx de dados *in situ* e de satélite também podem estar relacionadas a incertezas na R_{rs} espectral e/ou na Cla medidos. A R_{rs} *in situ* obtida por instrumentos de radiometria acima da água está sujeita a várias fontes de incertezas que são difíceis de corrigir adequadamente no esquema de processamento (IOCCG, 2019; RUDORFF et al., 2014). A refletância da superfície do mar devido ao céu e ao brilho do sol é altamente variável e pode variar um fator de 8 vezes dentro da faixa espectral de 400-800 nm para a mesma amostragem (LEE et al., 2010). Além disso, o fator de refletância da superfície depende da geometria de visualização do sensor, do estado do mar e das condições de iluminação, que podem ser altamente variáveis durante as campanhas oceanográficas *in situ* (MOBLEY, 1999; MOBLEY, 2015; IOCCG, 2019). A R_{rs} por satélite também está sujeita a várias fontes de incertezas, incluindo erros na calibração radiométrica e na correção atmosférica, potenciais efeitos de adjacência (do continente, ilhas e nuvens) e mascaramento de nuvens, que podem ser muito difíceis de resolver no caso de nuvens finas esparsas e neblina. A maioria desses erros é, no entanto, correlacionada espectralmente e minimizada ao usar razões de bandas de R_{rs} (IOCCG, 2013; RUDORFF et al., 2014). Esta é uma das razões pelas quais os algoritmos empíricos de RMB têm um desempenho superior em comparação com algoritmos semi-analíticos, que propagam os erros da R_{rs} para os produtos estimados para níveis muito superiores (LEE et al., 2010; BREWIN et al., 2015).

A Cla fluorométrica também está sujeita a incertezas relacionadas ao método, uma vez que esta técnica não separa os pigmentos do fitoplâncton antes da análise, como é feito no método por HPLC, que foi adotado pela comunidade de OC como o melhor método para determinação de Cla *in situ* (IOCCG, 2019).

No entanto, ao comparar a Cla fluorométrica com $a_{ph}(440)$, a relação encontrada neste estudo foi muito próxima da relação global obtida por Bricaud et al. (1998), sugerindo que nosso conjunto de dados é compatível com outros estudos.

Os resultados aqui apresentados são consistentes com outros estudos e indicam que as principais fontes de incertezas do algoritmo de MBR OCx na estação costeira ANTARES-Ubatuba estão relacionadas às propriedades ópticas específicas, ou seja, $a_{cdm}/a_{nw}(440)$ e $a_{ph}^*(440)$. Outras propriedades ópticas que têm potencial para afetar as R_{rs} e a RMB espectrais são a eficiência de retroespalhamento das partículas e sua inclinação espectral (BROWN et al., 2008; LOISEL et al., 2010). Novos estudos também devem analisar essas propriedades dentro da PCSB. A variabilidade das propriedades ópticas específicas nos oceanos e regiões costeiras é o principal desafio para modelagem por algoritmos de OC e estimativas bio-ópticas (BROWN et al., 2008; LOISEL et al., 2010), tanto para algoritmos empíricos quanto semi-analíticos. Essas propriedades ópticas específicas são difíceis de identificar e modelar, pois podem variar independentemente, especialmente em águas opticamente mais complexas, e têm apenas efeitos menores (de segunda ordem) na R_{rs} espectral, que combinados podem ter efeitos ambíguos. Espera-se com as próximas missões de OC com capacidade hiperespectral, como a missão *Plankton Aerosol Cloud ocean Ecosystem* (PACE), R_{rs} derivadas de satélites de alta qualidade (FROUIN et al., 2019) e algoritmos bio-ópticos mais avançados serão capazes de melhorar o padrão das estimativas de OC e fornecerem mais informações biogeoquímicas associadas às propriedades ópticas. Por exemplo, o $a_{ph}^*(440)$ está relacionado ao tamanho e grupo de células dominantes do fitoplâncton; as proporções do CDM para a absorção total de luz e sua inclinação espectral são sensíveis à qualidade e origem da matéria orgânica colorida; e a eficiência de retroespalhamento de partículas e a inclinação espectral estão ligadas ao conjunto de partículas.

O presente estudo documentou a variabilidade temporal das propriedades bio-ópticas na estação costeira ANTARES-Ubatuba e como isso interfere nas estimativas de Cla por OC. Para entender melhor a dinâmica das propriedades

bio-ópticas da água na escala de toda a PCSB, estudos futuros devem estender a análise espacialmente (por exemplo, usando sensoriamento remoto por satélite e dados *in situ*) e avaliar mudanças fenológicas na comunidade fitoplanctônica usando dados contínuos de longo prazo com séries temporais de satélites (por exemplo, com sensores como o MODIS, VIIRS e OLCI). Algoritmos OCx padrão podem ser usados para fornecer estimativas razoáveis de Cla, dentro das incertezas esperadas, na estação costeira de Ubatuba e em tipos de água semelhantes dentro da PCSB. Outras melhorias são possíveis, no entanto, usando futuras missões hiperespectrais de satélite e conjuntos de dados *in situ* adicionais com informações sobre as propriedades ópticas específicas.

3.5 Conclusão

A estação costeira ANTARES-Ubatuba, localizada dentro da plataforma média interna da PCSB, é influenciada por vários processos oceanográficos de mesoescala (ventos, ondas, ressurgência costeira, meandros da Corrente do Brasil e vórtices) e fontes continentais locais e remotas que contribuem para um complexo tipo óptico de água para a região. A comunidade fitoplanctônica é caracterizada por condições oligo-mesotróficas com eventos episódicos de floração promovidos por intrusões da ACAS. O CDOM é o COA biogênico dominante que absorve luz especialmente em comprimentos de onda mais curtos, contribuindo para um viés positivo geral dos algoritmos de OCx empíricos. A estrutura da comunidade fitoplanctônica também desempenha um papel importante nas superestimativas do OCx para situações em que o $a_{ph}^*(440)$ é mais alto, especialmente em águas com baixas Cla. No entanto, o algoritmo OC3, que utiliza 3 bandas espectrais mostrou um desempenho razoável ou satisfatório, sugerindo o uso potencial de produtos padrão de satélite (ou seja, MODIS-Aqua e VIIRS-SNPP) para monitorar mudanças espaço-temporais na biomassa fitoplanctônica nas águas costeiras da PCSB, pelo menos além a plataforma externa interna e para o setor centro-norte da PCSB, com influência mínima de intrusões da APP (durante o inverno).

Apesar de ser uma estação fixa que limita a representação espacial da variabilidade bio-óptica observada, a longa cobertura temporal torna este conjunto de dados único, abrangendo uma grande variedade de condições ambientais e de estados tróficos, desde oligotróficos até eventos de floração fitoplanctônica. Trabalhos futuros devem buscar usar dados de OC de satélite, com conhecimento da precisão esperada, juntamente com conjuntos de dados *in situ* para estudar o sistema de forma mais abrangente e trazer luz aos processos que regulam o sequestro de carbono orgânico na PCSB.

4 CARACTERIZAÇÃO DA VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-*a* SUPERFICIAL EM UBATUBA, SP

4.1 Introdução

Prever as respostas do fitoplâncton às mudanças climáticas tem implicações importantes para o nosso entendimento sobre os ciclos biogeoquímicos e para a gestão dos ecossistemas marinhos devido ao papel fundamental que o fitoplâncton desempenha nas cadeias alimentares marinhas (IPCC, 2022). O monitoramento diário e contínuo da concentração de clorofila-*a* (Cla), amplamente utilizada como proxy da biomassa fitoplanctônica, a partir do uso de medições radiométricas por satélite (IOCCG, 2000; LOISEL et al., 2013), tem sido uma ferramenta fundamental para a observação da variabilidade do fitoplâncton em escala global nas últimas duas décadas (GREGG; ROUSSEAU, 2019). A identificação dos ciclos anuais e tendências ao longo do tempo na variabilidade da Cla a partir de imagens de satélite vem sendo largamente utilizada (SIGNORINI et al., 2015). Os dados de satélite não são tão precisos como as amostragens *in situ* e são limitados à camada superficial do oceano. Porém, essas limitações são fortemente compensadas pela cobertura espacial e temporal fornecidas pelos satélites (LOISEL et al., 2013).

Populações fitoplanctônicas respondem a variações sazonais (de médio-curto prazo), interanuais, climáticas e ambientais de longo prazo. A produção primária fitoplanctônica é afetada indiretamente por forçantes ambientais, como a temperatura da água e ventos na superfície do mar, que desestabilizam a coluna d'água proporcionando um maior aporte de nutrientes (CASTRO et al., 1987). A variação na cobertura de nuvens também pode reduzir ou aumentar a radiação eletromagnética disponível para a fotossíntese, afetando a produção primária (ANTHONY et al., 2004). A variação da Cla de uma região em resposta as mudanças nos demais fatores ambientais pode também indicar uma mudança na estrutura da comunidade fitoplanctônica devido às mudanças nos processos de ocupação de ambientes costeiros (GOMES et al., 2014). A forma mais eficiente de se estudar essa variação é com a integração de bancos

de dados históricos. As técnicas de análise de séries temporais aplicadas à dados de sensoriamento remoto auxiliam no entendimento desses complexos processos (GARCIA et al, 2005; VANTREPOTTE; MÉLIN, 2011; LOISEL et al., 2014).

É natural que à medida que as séries temporais de dados de satélite se tornem mais longas, exista um esforço para a detecção de tendências causadas por mudanças climáticas. No entanto, essa detecção é dificultada pela grande amplitude das variações naturais (GREGG; ROUSSEAU, 2019), que sobrepujam as mudanças de longo prazo. Portanto, é essencial caracterizar a variabilidade natural da Cla para a correta atribuição das mudanças de longo prazo como à variabilidade climática ou ao efeito da ação antropogênica.

As mudanças anuais na comunidade fitoplanctônica podem não ser totalmente explicadas por fenômenos climáticos, como por exemplo o ENSO (*El Niño/Southern Oscillation*), especialmente em latitudes mais altas, porque essas variações na Cla superficial refletem processos que ocorrem em uma variedade de escalas temporais (de sazonal a plurianual), como revelado por séries temporais do produto de satélite de Cla, nas quais esses tipos de flutuações podem levar a anomalias anuais e, assim, se projetar na média anual (KEERTHI et al., 2022).

O objetivo desse estudo é descrever e analisar os padrões temporais da concentração de clorofila-*a* superficial da Plataforma Continental Sudeste do Brasil (PCSB). Especificamente, é proposta a avaliação da variabilidade sazonal, e não sazonal da Cla superficial na região usando dados de sensoriamento remoto. Nesse estudo, a consistência de dados de sensoriamento remoto do sensor MODIS Aqua foi testada utilizando dados *in situ* da estação ANTARES-Ubatuba. A climatologia da Cla superficial no ponto amostral da estação, situado na PCSB, foi gerada e discutida.

4.2 Materiais e métodos

A área de estudo aqui definida insere-se no Oceano Atlântico Sul na região da costa brasileira, na PCSB, especificamente na estação de coleta ANTARES-

Ubatuba posicionada em 23,60° S - 44,96° O. Como já mencionado, regionalmente a área é bastante influenciada pela região costeira com a foz dos rios Doce, Paraíba do Sul, da Baía de Guanabara e ainda com influência remota do rio da Prata, que escoar toda sub-bacia do Rio Paraná, recebendo o aporte de grandes quantidades de material orgânico e inorgânico transportado pelo rio. Também é influenciada pelo fluxo das águas da Corrente do Brasil (BRANDINI; TURA; SANTOS, 2018). Além de ser uma região importante para a produção pesqueira, aquicultura e turismo, a Bacia de Santos é a maior bacia sedimentar marinha do Brasil, possuindo as mais produtivas reservas de petróleo e gás natural, sendo fundamental para a produção nacional de petróleo (RIDELENSKY; SANTOS, 2022).

4.2.1 Clorofila-a *in situ*

A série de dados *in situ* da estação ANTARES-Ubatuba utilizada neste estudo conta com um banco de dados de Cla coletados em subsuperfície em 143 amostragens de campo desde dezembro de 2004 até julho de 2019. A determinação da concentração do pigmento clorofila-a (mg m^{-3}) foi realizada pelo método descrito em Welschmeyer (1994). As amostras foram filtradas em e filtros de fibra de vidro (GF/F) com poro de 0,7 μm , em volumes de 500 mL. Os pigmentos foram extraídos com acetona e dimetil-sulfóxido (DMSO) por 24 horas pelo método não acidificado e a leitura dos filtros foi realizada em um fluorímetro de banda estreita do modelo 10AU da marca Turner.

4.2.2 Dados de satélite

Para este trabalho foram utilizados dados diários de sensoriamento remoto de moderada resolução espacial (~ 1 km). Os dados do produto Cla obtido por meio dos dados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS Aqua), estimados pelo algoritmo empírico OC3M (O'REILLY et al., 2000) em nível de processamento L2, foram testados em relação aos dados de Cla medidos *in situ* e usados a fim de estabelecer uma série longa de dados. Esses dados são distribuídos pelo *Ocean Biology Processing Group* (OBPG) no *Goddard Space Flight Center* da NASA. O exercício de comparação entre os dados coletados *in situ* e os dados de satélite (match-ups) foram realizados

utilizando uma janela espacial de 3x3 pixel centrada na estação ANTARES-Ubatuba, onde foram descartadas as imagens das datas com menos de 5 pixels válidos e ou quando os pixels divergiam mais que 20% em relação a mediana (STOCK; SUBRAMANIAM, 2020). Levando em consideração a distribuição log-normal dos dados de Cla (CAMPBELL, 1995) as séries de dados foram log-transformadas na base 10. Para avaliar o desempenho do produto, foram utilizadas algumas métricas estatísticas como o coeficiente de determinação (R^2), o viés (Bias), o erro médio absoluto (MAE) e o erro médio quadrático (RMSE):

$$\text{Bias} = 10^{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log_{10}(y_i) - \log_{10}(x_i)\right)} \quad (4.1)$$

$$\text{MAE} = 10^{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\log_{10}(y_i) - \log_{10}(x_i)|\right)} \quad (4.2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\log_{10}(y_i) - \log_{10}(x_i))^2}{n}} \quad (4.3)$$

Onde y_i é o valor estimado de Cla, x_i é o valor da Cla *in situ* e n é o número de amostras.

Com base em uma série longa de dados (junho de 2002 a fevereiro de 2020), por meio de mapas sazonais a variação da Cla foi descrita espacialmente. Com a série agrupada em mapas mensais, foram executadas as análises temporais do fitoplâncton na região de estudo.

4.2.3 Análise temporal

Uma série temporal de dados MODIS Aqua foi utilizada para a descrição temporal da Cla na área de estudo. As imagens médias mensais e sazonais foram geradas utilizando a linguagem Python. Os valores foram agrupados de acordo com as estações do ano, onde dezembro, janeiro e fevereiro representam o período de verão, março, abril e maio o outono, junho, julho e agosto o inverno e setembro, outubro e novembro a primavera.

A variabilidade temporal da Cla MODIS Aqua na estação ANTARES-Ubatuba foi analisada por meio da técnica Census X13 que se baseia em um algoritmo que utiliza a iteração de filtros passa-banda (VANTREPOTTE; MÉLIN, 2011). Esse método é uma evolução do método Census X11 que foi desenvolvido para o estudo de padrões temporais pelo *National Bureau of Economic Research* nos EUA (U.S. CENSUS BUREAU, 2017). Essa técnica vem sendo aplicada na análise de produtos de sensoriamento remoto e em estudos biogeoquímicos para análise de padrões espaço-temporais (VANTREPOTTE; MÉLIN, 2011; LOISEL et al., 2014; DELGADO et al., 2015). Esta análise permite que a série de dados seja decomposta em termos sazonais e de ciclo de tendência, que podem ajudar a explicar a variabilidade regional da Cla. Basicamente, o método Census X13 consiste no cálculo de média móvel e retirada da tendência por componentes irregulares, como mostrado na Equação 4.1:

$$\sigma_x^2 = \sigma_s^2 + \sigma_t^2 + \sigma_i^2 + 2 \text{cov}(S, T, I) \quad (4.4)$$

Onde σ_x^2 representa a variância total da série, σ_s^2 representa o sinal sazonal, σ_t^2 representa a tendência, σ_i^2 representa o sinal irregular da série e $2 \text{cov}(S, T, I)$ representa a covariância entre os termos. Como descrito em Vantrepotte e Mélin (2011), as séries são normalizadas com a média anual e então é aplicado o filtro de Henderson à série ajustada do componente sazonal e só então são calculadas as estimativas finais da tendência e componentes irregulares, repetindo a aplicação do filtro de Henderson à série da tendência ajustada. O sinal interanual representa a série com a componente sazonal subtraída.

4.2.4 Análise de tendência

Os dados de Cla, assim como suas componentes decompostas pelo método Census X13, foram utilizados na análise de tendência, onde a presença de sinal monotônico de mudança nas séries temporais foi avaliada usando a estatística não paramétrica de Kendall (SALMI et al., 2002). O teste se baseia

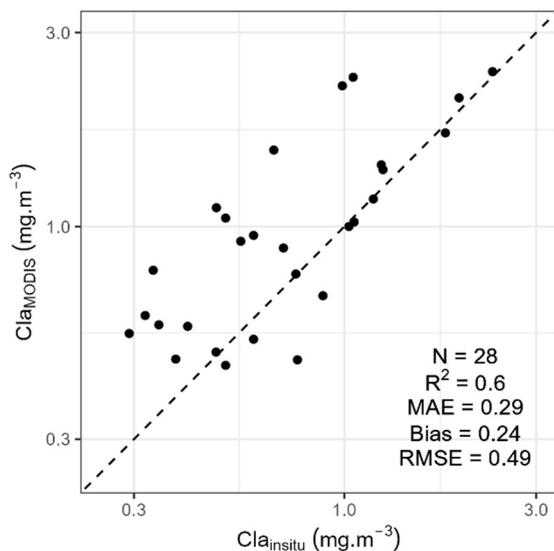
na iteração de um conjunto de estatísticas de Mann-Kendall que são aplicadas à série de dados e, finalmente, são combinadas para detectar a presença de sinal monotônico de longo prazo na série temporal original (SALMI et al., 2002). O uso deste teste não paramétrico é adequado para dados não distribuídos normalmente e foi usado anteriormente no estudo de tendências de séries temporais de Cla com dados de sensoriamento remoto (VANTREPOTTE; MÉLIN, 2011; COLELLA et al., 2016).

4.3 Resultados e discussão

4.3.1 Comparação dos bancos de dados

Avaliando o banco de dados da série ANTARES-Ubatuba, em 28 ocasiões houve medidas concomitantes da Cla *in situ* com a Cla do MODIS Aqua, que foram utilizadas para o exercício de match-up. Considerando o resultado da comparação, como refletido no valor do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,57$), os dados estimados por sensoriamento remoto têm desempenho com valores dentro do esperado (Figura 4.1). De forma geral houve uma tendência de superestimativa do MODIS Aqua para os valores da concentração da clorofila-a superficial medidos *in situ* (Bias = 1,31), como já reportado por outros autores (MARRARI, et al. 2017). Essa tendência também foi relatada principalmente em trabalhos que exploram ambientes de águas turbidas (DELGADO et al., 2021; O'REILLY, 2000).

Figura 4.1 - Comparação entre a clorofila-a medida *in situ* e a clorofila-a estimada pelo MODIS Aqua.



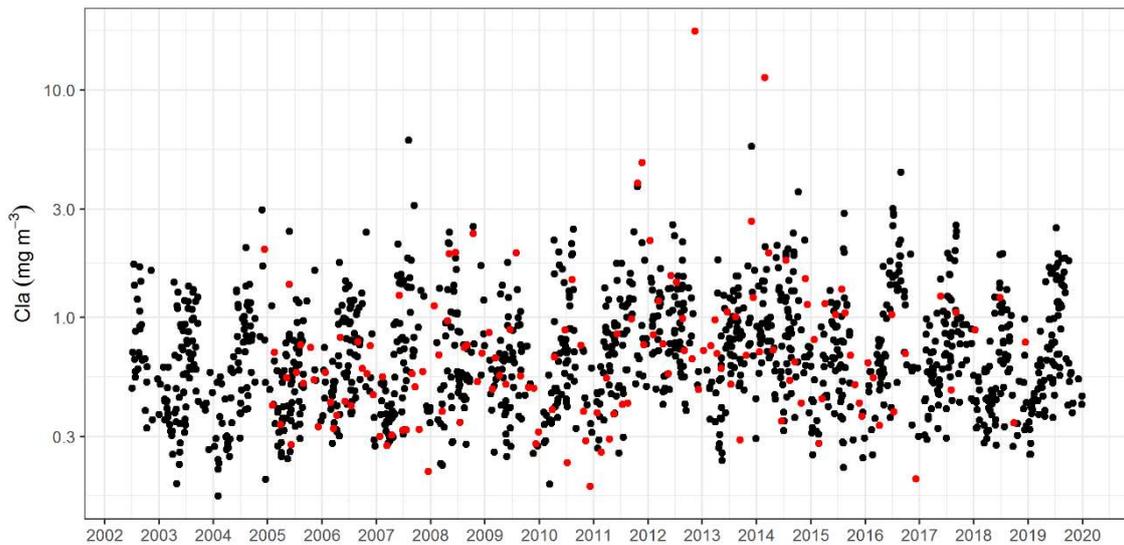
No gráfico é apresentado o valor das métricas estatísticas para a comparação.

Fonte: Produção do autor.

Outros autores mostraram que esse padrão de superestimativa ocorre na região de estudo principalmente no período de verão (GARCIA et al., 2006; MARRARI et al. 2017). Entretanto, foi relatado que os valores mais altos de clorofila-a ocasionalmente podem ser subestimados pelos produtos de satélite (MANZAR ABBAS et al., 2019). Isso é esperado visto que os produtos padrões dos satélites são derivados de algoritmos empíricos que são treinados com um conjunto limitado de dados (O'REILLY; WERDELL, 2019).

É importante ressaltar que as limitações na estimativa dependem de características próprias dos sensores, como as resoluções espectrais e os modelos de correções atmosféricas específicos adotados. Para os dados do MODIS Aqua o esquema de correção atmosférica padrão (VERMOTE et al., 1997) tende a superestimar os valores de clorofila-a medidos *in situ*, principalmente em regiões costeiras (CARSWELL et al., 2017).

Figura 4.2 - Série de dados de Cla na estação ANTARES-Ubatuba.

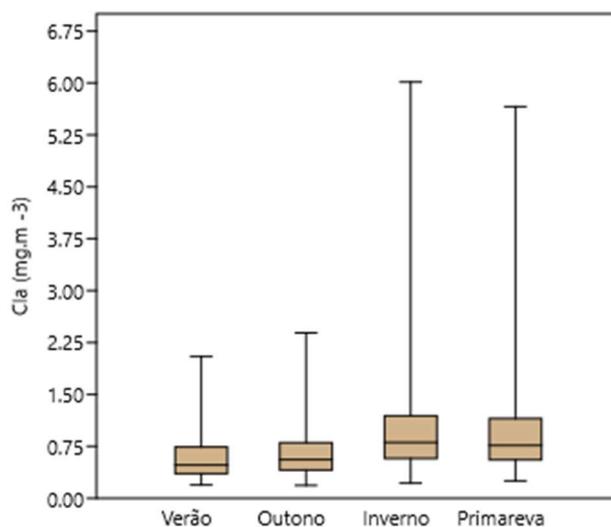


Os dados de Cla *in situ* e do MODIS Aqua (junho de 2002 a fevereiro de 2020) para a estação ANTARES-Ubatuba estão em escala logarítmica. Amostras marcadas em vermelho representam os dados coletados *in situ*.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.2 exibe a Cla superficial na estação ANTARES-Ubatuba para o período de atividade do MODIS Aqua, marcada em preto e os dados coletados *in situ* marcados em vermelho. Analisando a variabilidade dos bancos de dados, as amostras coletadas *in situ* apresentam uma maior amplitude de valores (0,18 a 18,09 mg m⁻³) com média e desvio padrão de $1 \pm 1,83$ mg m⁻³, quando comparado com o banco de dados do produto estimado por satélite (0,18 a 6,03 mg m⁻³) com média e desvio padrão de $1,07 \pm 0,87$ mg m⁻³, porém os valores médios são comparáveis, essa menor amplitude de valores pode ser explicada pela influência do tamanho do pixel do MODIS Aqua. Como mostrado na Seção 3.3.4, a região onde a coleta *in situ* foi executada apresenta águas do Caso 2 (IOCCG, 2000) e possui uma dominância na influência da matéria orgânica dissolvida (CDOM) como principal componente opticamente ativo, e mesmo com a alta influência desse COA, o algoritmo empírico OC3M, utilizado na estimativa de Cla do MODIS Aqua, foi suficiente para representar a Cla na região (MAE = 0,29).

Figura 4.3 - *Boxplot* com os valores de Cla do sensor MODIS Aqua separados por estação do ano.

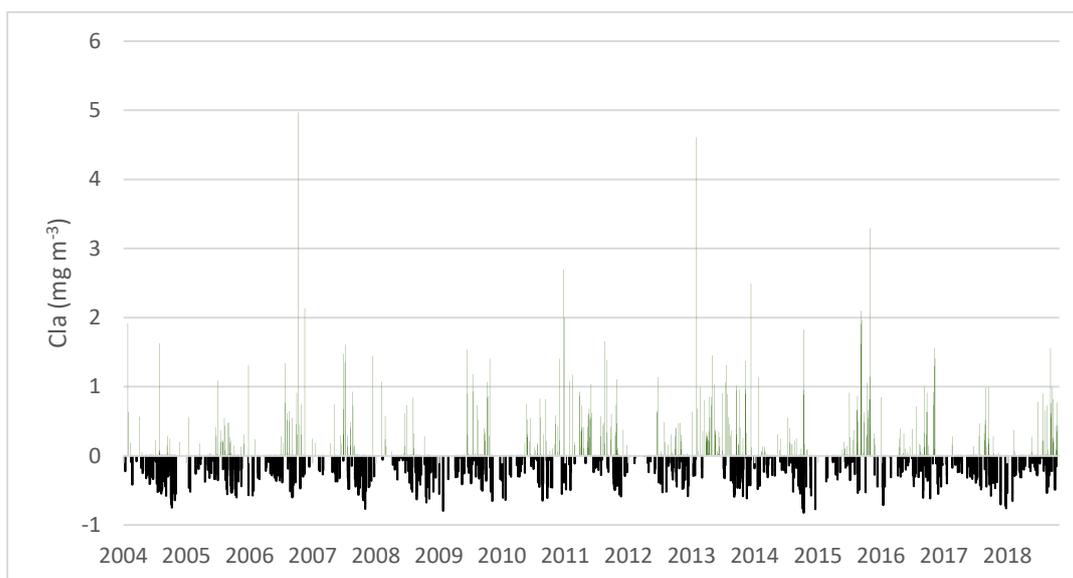


Os dados são do ponto amostral da estação ANTARES-Ubatuba para o período de junho de 2002 a fevereiro de 2020.

Fonte: Produção do autor.

Das 1161 imagens utilizadas neste estudo, 174 foram registradas no verão, 367 no outono, 474 no inverno e 146 na primavera. Mesmo com valores médios estatisticamente iguais, assim como observado em Marrari et al. (2017), no período do inverno foram registrados os valores mais altos de Cla (Figura 4.3). Nesse período a maior quantidade de imagens disponíveis ocorre por que os meses de julho e agosto são os meses do ano nos quais existe a menor cobertura de nuvens (ISCCP, 2023), favorecendo a aquisição de imagens no espectro do visível.

Figura 4.4 - Anomalia de Cla do sensor MODIS Aqua.



Os dados são do ponto amostral da estação ANTARES-Ubatuba para o período de para o período entre dezembro de 2004 e julho de 2019.

Fonte: Produção do autor.

As anomalias de Cla, calculadas em relação às médias mensais da série de 15 anos indicam que em agosto de 2007 e em novembro de 2013 ocorreram as maiores anomalias positivas, observações também relatadas em outros estudos (VALÉRIO, 2013; SANTOS, 2016). Também é possível observar um aumento na frequência de anomalias positivas entre os anos de 2012 e 2013, como também descrito em Santos (2016). No caso da maior anomalia positiva, ocorrida no ano de 2007, em agosto foram registrados sistemas frontais anômalos atuando na região (CLIMÁNALISE, 2007). Para a segunda maior anomalia positiva do ano de 2013 houve o registro de precipitação acima da média histórica (CLIMÁNALISE, 2013) e com a intrusão de nutrientes no sistema pela ação de ondas e ventos, esses eventos provavelmente favoreceram o aumento da Cla na região.

4.3.2 Distribuição da Cla na PCSB

A Plataforma Continental Sudeste do Brasil é caracterizada pela presença de três principais massas d'água que interagem nesse domínio: Água Tropical

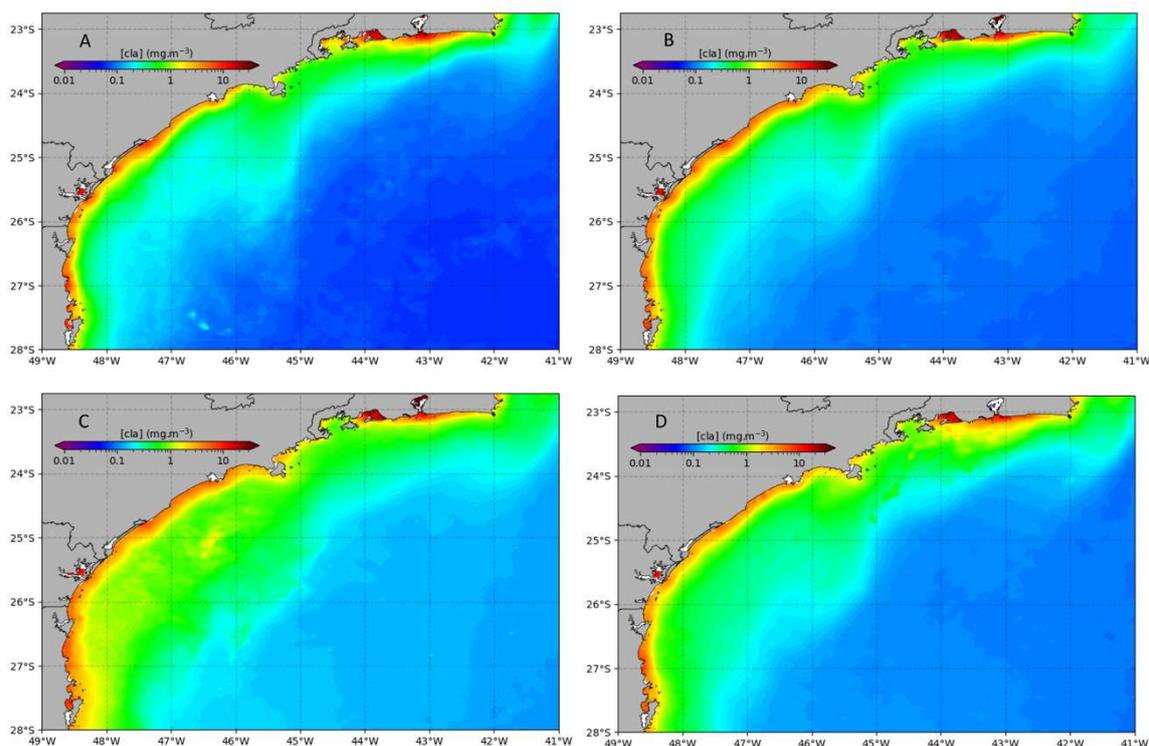
(AT), Água Central do Atlântico Sul (ACAS) e Água Costeira (AC). A AT e ACAS são transportadas pela Corrente do Brasil (CB) no sentido sul-sudoeste (CASTRO; MIRANDA, 1998). A CB é a principal corrente que banha a costa sudeste brasileira e é definida como uma corrente de contorno oeste associada ao Giro Subtropical do Atlântico Sul (SILVEIRA et al., 2000). As zonas biogeográficas que compõem a região são: Província Costeira da Corrente do Brasil (*Brazil Coastal Current Province*), mais próximo à costa e a Província do Giro do Atlântico Sul (*South Atlantic Gyre Province*) mais distante da costa (LONGHURST et al., 1995). Além da forte exploração pesqueira, principalmente mais ao sul, a região abriga um dos maiores sítios *offshore* de exploração de gás e petróleo do mundo (RIDELENSKY; SANTOS, 2022). A região possui águas oligo-mesotróficas e a ACAS, que é mais fria e menos salina, é transportada abaixo da AT e é a principal fonte de nutrientes para o aumento da biomassa fitoplanctônica ao longo do ano (BRANDINI et al., 2014). No inverno, principalmente ao sul da região há um aumento de nutrientes devido a influência da pluma do rio da Prata e no verão, ocasionalmente ocorrem eventos de ressurgência, principalmente na região de Cabo Frio (KAMPEL et al., 1997).

Com o banco de dados de Cla do MODIS Aqua separado de acordo com a média das estações do ano, foi possível observar a variação média sazonal para a região (Figura 4.5). O verão (especialmente no mês de fevereiro) foi o período em que os valores médios foram menores e no inverno (especialmente no mês de agosto) foram registradas as maiores médias. Especialmente, a Cla na PCSB tem um padrão de distribuição típico de regiões costeiras (VANTREPOTTE et al., 2015), onde os valores mais altos são encontrados na costa formando um gradiente no qual a região oceânica apresenta valores mais baixos de Cla.

Áreas com alta influência continental, como a interface costeira de regiões de mangue (como por exemplo em Cananeia, SP), e regiões densamente populosas, como a região próximo a costa do Rio de Janeiro mostraram valores médios mais altos ($> 6 \text{ mg m}^{-3}$) durante todas as estações do ano, como mostrado na Figura 4.5. É possível observar uma faixa oligo-mesotrófico

que circunda a região costeira com média de $\sim 1,00 \text{ mg m}^{-3}$ que no verão chega até a isóbata de 50 m e no inverno ultrapassa a isóbata de 100 m em toda a plataforma.

Figura 4.5 - Média sazonal da Cla (mg m^{-3}) na região da PCSB.



Os dados do período entre junho de 2002 e fevereiro de 2020 foram agrupados em Verão (A), Outono (B), Inverno (C) e Primavera (D) para a região da PCSB. Tabela de cores em escala logarítmica.

Fonte: Produção do autor.

A região ao norte da área de estudo, sob a influência das ressurgências que ocorrem na costa de Cabo Frio, no inverno tem a faixa atingindo a isóbata de 200 m. O mesmo ocorre na região mais ao sul, que devido a influência das águas da pluma do rio da Prata (MÖLLER et al., 2008) atinge a isóbata de 200 m. Durante o verão, o regime de chuvas favorece a maior vazão de água doce próximo a região costeira na PCSB. Esse período registra os maiores valores

de Cla ($>10 \text{ mg m}^{-3}$), especialmente na região da Baía da Guanabara e da Baía de Sepetiba, ambas no estado do Rio de Janeiro.

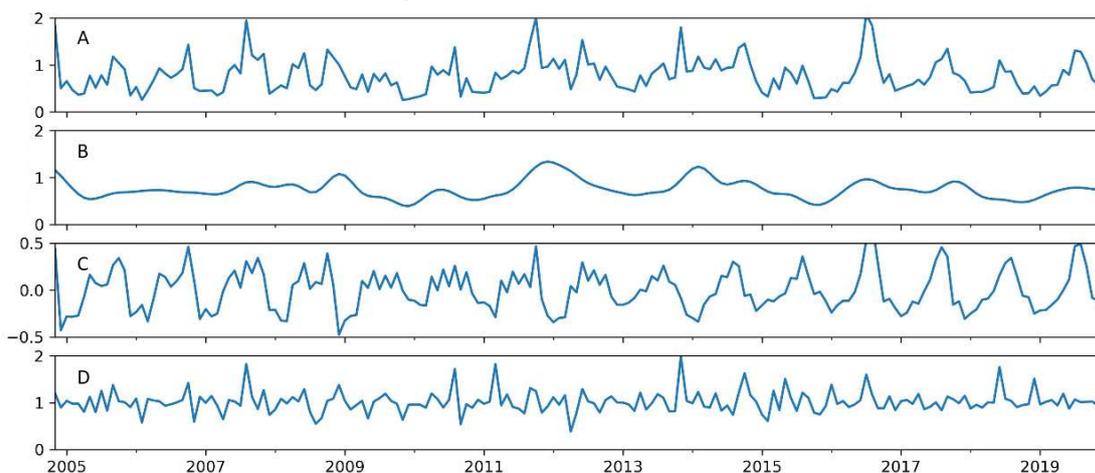
4.3.3 Census X13

A variabilidade natural da Cla ocorre em uma ampla gama de escalas de tempo não relacionadas, dificultando a atribuição de uma causa única (e.g. tendência causada por fatores climáticos). Para quantificar as variações da Cla na estação ANTARES-Ubatuba, foram extraídos os sinais sazonais, tendência e irregulares da série temporal estimada pelo MODIS Aqua de Cla utilizando o método descrito em Colella et al. (2016). Esse método foi utilizado para avaliar a contribuição relativa desses componentes para o padrão de variabilidade temporal da Cla na área de estudo.

A sazonalidade na biomassa fitoplanctônica é controlada por fatores como variações na irradiação solar, ventos e na estratificação da superfície, que modulam a disponibilidade de nutrientes, exposição à luz e tamanho da camada de mistura, além de fatores bióticos, como a herbivoria (CUSHING, 1975; CASTRO et al., 1987; ANTHONY et al., 2004).

Como todas as forçantes relevantes para a variação nas atividades fitoplanctônicas operam em diferentes escalas espaciais e temporais, Keerthi et al. (2022), atribuem características espaço-temporais a esses sinais, diferenciadas por sua escala de tempo de variabilidade. Tipicamente acima de um ano refere-se ao sinal interanual, entre 6 meses e 1 ano ao sinal sazonal e abaixo de 6 meses ao sinal intrasazonal. Assume-se que a escala espacial representa a distância na qual uma escala de tempo se manteve estável e coerente, refletindo a escala espacial do mecanismo causador associado a essas variações da Cla, onde a escala $<1 \text{ km}$ ocorre no caso da variabilidade intrínseca a Cla, entre $1\text{-}100 \text{ km}$ ocorre em processos de submesoescala, entre $100\text{-}1000 \text{ km}$ ocorre em eventos como tempestades e passagens de frente fria e $>1000 \text{ km}$ para fenômenos climáticos. Essa abordagem é interessante para estudos em que a técnica é aplicada de forma espacializada (HAËCK et al., 2023).

Figura 4.6 - Decomposição temporal, obtida para a série de dados de Cla na estação fixa ANTARES-Ubatuba.



Onde A é a série de Cla observada, B é a componente tendência, C é a componente sazonal e D é a componente irregular para o período entre dezembro de 2004 e julho de 2019.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.6 apresenta de forma decomposta a série temporal de Cla no ponto da estação ANTARES-Ubatuba para o período em que houve coleta de dados *in situ*. É possível observar que os valores medidos na estação (A) têm uma forte contribuição sazonal (C) e que no ano de 2012 existe o maior pico na série da contribuição por tendência (B). No dia 13 de novembro de 2012, a estação ANTARES-Ubatuba registrou na coleta *in situ*, o maior valor de Cla observado na série toda ($18,09 \text{ mg m}^{-3}$), período no qual houve uma sequência de registros de florações fitoplanctônicas da costa e plataforma continental até o final do ano de 2015 (MARTINS et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2021) (Figura 4.4). Luz e Noernberg (2022) descrevem na região costeira do estado do Paraná uma floração intensa de *Dinophysis* em junho de 2016, que não foi observada na região de Ubatuba com o banco de dados do presente estudo.

A contribuição da componente tendência explica em média 33% da variabilidade temporal da Cla na estação ANTARES-Ubatuba (Figura 4.5 B). Em média, 41% do total de variação da Cla na estação ANTARES-Ubatuba é dominado pela contribuição da componente sazonal (Figura 4.5 C), resultados similares aos encontrados no trabalho de Vantrepotte e Mélin (2009). Como

mencionado, a PCSB é um ambiente caracterizado predominantemente por águas oligotróficas com um forte gradiente trófico (leste - oeste). Assim pode-se esperar uma maior sazonalidade da Cla na região do talude e em regiões muito próximas da costa, uma contribuição não sazonal dominante. Como a estação ANTARES-Ubatuba encontra-se a 18 milhas náuticas de distância da costa, o sinal sazonal ainda é predominante.

A componente irregular extraída pelo método Census X13 representa a variabilidade do sinal remanescente quando as oscilações de longo prazo e sazonal foram subtraídas, e são atribuídas a variações em uma escala sub-anual (KEERTHI et al., 2022). No caso de dados mensais isso pode estar relacionado a variações temporais causadas por ressurgências e ressuspensão de sedimentos do fundo, comuns na zona costeira (PALMA; MATANO, 2009).

A componente irregular explica 16% da variabilidade temporal da série (Figura 5 D). As variações irregulares da Cla são frequentemente associadas à intermitência da estratificação da superfície, que pode suprimir ou diluir florações superficiais ou desencadear o crescimento transitório do fitoplâncton, fornecendo nutrientes para a zona eufótica (BRANDINI et al., 2014; KEERTHI et al., 2022). Essas flutuações de alta frequência da Cla na região também podem ser causadas pela variabilidade de fenômenos atmosféricos intrasazonais, como tempestades e frentes frias (OLIVEIRA; KAMPEL, 2019) ou por vórtices de mesoescala e submesoescala (MARTINS; PELEGRÍ, 2006). As flutuações ainda podem refletir a variabilidade intrínseca no sistema predador-presa ou a competição por recursos (GASALLA et al., 2010).

4.3.4 Análise de tendência

Considerando os valores médios mensais da série de Cla aqui utilizada para a estação ANTARES-Ubatuba e as séries decompostas pelo método Census X13, foram calculadas as estatísticas de Mann-Kendall para detecção de sinal de tendência monotônica. A série de dados de Cla do MODIS Aqua obteve um p -valor de 0,70, a componente sazonal obteve um p -valor de 0,96, a componente tendência um p -valor de 0,76 e a componente irregular um p -valor de 0,88 e a componente interanual um p -valor de 0,90. Dessa forma, baseado

no limite de 95% de confiança (p -valor $<0,05$), não foram detectadas tendências temporais significativas de aumento ou diminuição da Cla e componentes no período estudado.

Outros autores observaram o mesmo padrão aqui reportado, ou seja, sem tendência significativa. Marrari et al. (2017) estudando os padrões de distribuição da Cla em grandes ecossistemas também não observaram tendência estatisticamente significativa para a região na qual a estação ANTARES-Ubatuba está inserida. No estudo de Vantrepotte e Melin (2009), não foi registrada tendência significativa para a série de Cla na região de estudo, assim como no trabalho de O'Brien et al. (2017), que mesmo observando um padrão de aumento na temperatura na região do Atlântico Sul, registraram padrões de tendência não significativa para a Cla na área de estudo. Esses estudos demonstram que nem todas as regiões oceânicas estão mudando seguindo os mesmos padrões.

Uma questão importante a ser abordada é a resolução temporal utilizada nesse trabalho. Alguns aspectos da variação da Cla, podem ter sido mascarados devido a utilização de médias mensais. Contudo, mudanças na taxa de amostragem temporal têm influência limitada na estimativa de tendências de longo prazo da Cla (SALGADO-HERNANZ et al., 2019).

Observando a extensão do banco de dados utilizado (2004-2019), deve-se considerar que a análise é representativa para variações que ocorreram durante o período de 15 anos. Trabalhos futuros devem considerar a utilização de produtos combinados em séries mais longas, que proporcionam análises de tendência comparáveis às análises feitas com o produto de um satélite único e são úteis para o registro climático da Cla (MÉLIN et al., 2017). Conjuntos de dados mais longos (ou seja, > 30 anos) podem ser necessários para identificar as tendências impulsionadas por mudanças climáticas, como observado por Henson et al. (2018).

4.4 Conclusão

O produto MODIS Aqua obteve um desempenho moderado quando comparado aos dados coletados *in situ*. Com a utilização da série de imagens do satélite

MODIS Aqua (junho de 2002 a fevereiro de 2020) foi possível realizar a descrição espacial da Cla na PCSB. Foi possível observar a variação média da Cla, onde no verão, especialmente no mês de fevereiro, foram registrados os menores valores e no inverno, especialmente no mês de agosto, as maiores médias. Espacialmente, a Cla na PCSB possui um padrão de distribuição típico de regiões costeiras com um forte gradiente trófico (leste - oeste) onde nota-se uma faixa oligo-mesotrófica que circunda a região costeira com média de $\sim 1,00 \text{ mg m}^{-3}$, que pode chegar até a isóbata de 200 m em algumas regiões durante o inverno.

Com a técnica do Census X13, foi possível estimar as contribuições das componentes sazonais, tendência e irregular para o período no qual foi realizada a amostragem *in situ* na estação ANTARES-Ubatuba (novembro de 2004 a julho de 2019), onde a componente sazonal respondeu pela maior parte do sinal (41%) e a contribuição da componente irregular e da componente tendência representam 16% e 33%, respectivamente. A estatística de Mann-Kendall aplicada a série temporal e as séries decompostas de Cla não indicou tendência temporal significativa para a estação ANTARES-Ubatuba no período estudado.

Dados de sensoriamento remoto são uma ferramenta fundamental para a descrição e monitoramento de ambientes marinhos de forma sinóptica, trabalhos futuros devem explorar a capacidade espacial desse tipo de dado para a aplicação de metodologias de análises temporais. A utilização de séries de dados mais longas como as bases de dados multimagens (produtos combinados) também é desejável para a descrição da climatologia da Cla.

O avanço das tecnologias de sensoriamento remoto e a continuidade nas atividades de monitoramento são fundamentais para a compreensão da evolução das características ambientais em regiões marinhas. Espera-se que esse tipo de trabalho possa auxiliar a melhor gestão do turismo costeiro e da aquicultura na região.

5 FLORAÇÕES FITOPLANCTÔNICAS NA REGIÃO COSTEIRA DE UBATUBA, SP

5.1 Introdução

As florações fitoplanctônicas ocorrem quando existe um aumento na proporção celular algal. Em regiões costeiras isso ocorre de forma natural (DEMIR; TURKOGLU, 2022; WANG et al., 2022) ou pode estar associado a interferências antrópicas (GOMES et al., 2014). Em algumas ocasiões, a explosão do crescimento do fitoplâncton pode favorecer a produção de toxinas nocivas como por exemplo, as saxitoxinas (DETONI et al., 2016). Tradicionalmente, regiões costeiras de todo o globo monitoram as atividades fitoplanctônicas a fim de evitar acidentes como lesões na pele e ingestão de alimentos contaminados (ANDERSON et al., 2002; GLIBERT et al., 2018).

As florações algais nocivas abrangem uma ampla gama de espécies de fitoplâncton que dependem de condições hidrodinâmicas e ecológicas específicas e incluem tanto espécies produtoras de toxinas, quanto os grandes produtores de biomassa, que podem levar à depleção de oxigênio dissolvido na coluna de água e, conseqüentemente, aumentar as taxas de mortalidade no ambiente marinho; além daqueles que provocam efeitos inflamatórios e danos mecânicos à peixes e invertebrados (CASTRO; MOSER, 2012).

Ocasionalmente, a região costeira da Plataforma Continental Sudeste do Brasil (PCSB) sofre com interdições na venda e consumo de produtos da pesca e aquicultura devido à presença excessiva principalmente de dinoflagelados potencialmente tóxicos advindos do fenômeno denominado "maré vermelha" (SMAYDA, 2002; BONECKER et al., 2009; CASTRO; MOSER, 2012). A identificação e o monitoramento na costa Sudeste e Sul brasileira é de competência estadual e são realizados periodicamente pelas autoridades sanitárias responsáveis, que publicam relatórios técnicos informando a interdição do comércio e proibição do consumo de moluscos marinhos e produtos de aquicultura na região. Embora esses eventos aconteçam de forma ocasional na PCSB, sua identificação e alerta precoce são importantes devido

aos seus potenciais impactos nas atividades sociais e econômicas (CIOTTI et al., 2018).

A eutrofização em ambientes costeiros é o resultado do enriquecimento por nutrientes frequentemente de origem continental que modificam o ciclo sazonal natural, permitindo uma maior produção primária anual de matéria orgânica e potencialmente levando ao acúmulo de biomassa algal (COLELLA et al., 2016). Estratégias de amostragem temporal e espacial de parâmetros biogeoquímicos específicos são particularmente importantes para monitorar a eutrofização nesses ambientes. A variação da concentração de clorofila-a (Cla) representa o indicador mais direto da variabilidade da biomassa fitoplanctônica e um marcador primário do funcionamento do ecossistema marinho (BOYCE et al., 2010).

Ferreira et al. (2011) destacam a importância da amostragem contínua para entender as variações da Cla, tanto para a identificação de eventos de florações quanto para a determinação de um valor médio utilizado como linha de base, promovendo o sensoriamento remoto como a solução potencial para superar problemas ligados à frequência das observações *in situ*, como a incapacidade em se detectar padrões de eutrofização marcados por fortes gradientes.

A alta cobertura espaço temporal dos dados de sensoriamento remoto configura assim uma ferramenta desejável para o monitoramento de fenômenos como as florações algais em regiões costeiras. Dessa forma, o objetivo desse trabalho é, correlacionar os dados de Cla com variáveis coletadas *in situ*, por satélite e meteoceanográficas e descrever as variações fenológicas do fitoplâncton com a identificação de eventos de florações algais na estação de coleta de dados ANTARES-Ubatuba.

5.2 Material e métodos

5.2.1 Dados *in situ*

A série de dados *in situ* da estação ANTARES-Ubatuba (23,60° S - 44,96° O) utilizada neste trabalho conta com um banco de dados coletados em superfície

em 143 amostragens de campo desde dezembro de 2004 até julho de 2019. Amostras de água foram obtidas, para análise de Cla, determinação dos coeficientes de absorção e sais nutrientes (nitrito, nitrato, silicato, fosfato e amônia) com garrafas de Niskin e armazenadas em galão térmico. A determinação da Cla (mg m^{-3}) foi realizada pelo método descrito em Welschmeyer (1994). As amostras foram filtradas em filtros GF/F com poro de $0,7 \mu\text{m}$, em volumes de 500 mL. Os pigmentos foram extraídos com acetona e DMSO por 24 horas pelo método não acidificado e a leitura dos filtros foi realizada em um fluorímetro de banda estreita do modelo 10AU da marca Turner. Os nutrientes foram analisados utilizando o método de Grasshoff (1976) com espectrofotômetro Hitachi U-1100. As determinações dos coeficientes de absorção (a_{ph} , a_d e a_{cdom}) bem como a definição de S_{cdom} e S_r estão descritas nas Seções 3.2.4 e 3.2.5.

A temperatura da superfície do mar e a salinidade foram medidas na estação ANTARES-Ubatuba usando um perfilador calibrado de Condutividade-Temperatura-Profundidade (CTD) SeaBird (UNESCO, 1985). A transparência da água foi medida usando um disco de Secchi (POOLE; ATKINS, 1929).

A reflectância de sensoriamento remoto acima d'água foi obtida por meio de medidas radiométricas seguindo os protocolos de Mueller et al. (2003) e MOBLEY (1999), com o espectrorradiômetro FieldSpec HandHeld (ASD) (325 a 1075 nm).

5.2.2 Dados de satélite

A série de dados de Cla de nível 2 com resolução espacial de 1 km, do período entre dezembro de 2004 e julho de 2019 estimados pelo MODIS Aqua foi adquirida através do *Ocean Biology Processing Group* (OBPG) do *Goddard Space Flight Center* da NASA e reprojeta geograficamente para o Nível 3 usando o SeADAS v. 8.1.

Outros produtos de satélite também utilizados nesse trabalho para o exercício de análises de correlação foram as séries de radiação fotossinteticamente ativa

(PAR) e coeficiente de atenuação difusa para irradiância descendente a 490 nm (Kd490), ambos do MODIS Aqua e concomitantes aos dados de Cla.

Imagens de resolução espacial mais fina do CBERS4, do sensor WFI foram obtidas pelo catálogo de imagem do INPE (<http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>) e foram utilizadas nas datas dos eventos de florações.

5.2.3 Dados meteoceanográficos

Dados diários de precipitação na estação ANTARES-Ubatuba foram adquiridos por meio da missão *Global Precipitation Measurement* (GPM) através do *Goddard Earth Sciences (GES) Data and Information Services Center* (DISC) da NASA.

Os dados diários de vento (intensidade e direção) foram adquiridos por meio do *Remote Sensing Systems Cross-Calibrated Multi-Platform* (CCMP) (*6-hourly ocean vector wind analysis product on 0.25 deg grid, Version 3.0*). O banco de dados do CCMP é uma combinação de estimativas de vento da superfície do oceano (10 m) de vários tipos de dados de satélite de sensores de microondas e base de dados de reanálises (MEARS et al., 2022).

O catálogo de dados de explosões solares (*sunspot*) com número de observações diários do hemisfério sul foi adquirido por meio do *Marshall Space Flight Center* da NASA (HATHAWAY, 2017).

5.2.4 Análise de correlação

Numa escala global águas frias tendem a ter mais nutrientes do que águas quentes e o fitoplâncton tende a ser mais abundante onde as águas são mais frias, ainda que exista essa conhecida correlação negativa entre a Cla e a temperatura (O'BRIEN et al. 2017), a concentração do pigmento também registra ajustes fisiológicos decorrentes de mudanças nas proporções de luz e nutrientes disponíveis na superfície oceânica e essas respostas fisiológicas dificultam a interpretação das variações da Cla superficial (BEHRENFELD et al., 2016). Assim, o uso de parâmetros ambientais pode indicar os fatores que contribuem para as variações da Cla nos ambientes aquáticos.

Dessa forma foi realizada a análise com o coeficiente de correlação de Pearson entre os parâmetros utilizados nesse trabalho (Cla *in situ*, coeficientes de absorção dos detritos (a_d), fitoplâncton (a_{ph}) e matéria orgânica dissolvida colorida (a_{cdom}), *slope* do CDOM (S_{cdom}), *slope ratio* (S_r), concentração de nutrientes (fosfato, silicato, amônia, nitrato, nitrito), temperatura, salinidade, profundidade do disco de Secchi, Cla MODIS Aqua, Kd490, PAR, precipitação, velocidade do vento, direção do vento e *sunspot*) com a utilização da linguagem Python. Apenas valores de correlação significativo, (p -valor menor que 0,05) foram considerados para as análises.

5.2.5 Identificação de florações

Para a identificação dos eventos de florações fitoplanctônicas, isso é, o acúmulo de biomassa fitoplanctônica indexado pela Cla na área de estudo, foi estabelecido o limite do percentil 90 % para os dados de Cla (FERREIRA et al., 2011), onde apenas valores maiores que 2 mg m^{-3} foram considerados nas análises. O *timing* e a magnitude da floração anual do fitoplâncton na PCSB foi determinado por meio dos valores médios de Cla e dos valores acumulados de florações na estação ANTARES-Ubatuba. Também foram consideradas as florações que puderam ser identificadas por meio de inspeção visual observadas durante as coletas *in situ* (independentes dos valores registrados de Cla).

5.3 Resultados e discussão

5.3.1 Análise de correlação

Na escala global, a distribuição da Cla é amplamente controlada pela circulação oceânica de larga escala (SIGNORINI et al., 2015). Diversos fatores físicos dominam ou modulam a variabilidade da Cla, o que é particularmente verdadeiro para a dinâmica de mesoescala (YU et al., 2019). Na escala regional, muitas podem ser as causas que levam ao aumento da Cla, principalmente em ambientes costeiros. Muitos fatores afetam a composição das espécies de fitoplâncton e o desenvolvimento da floração, e entre eles está

a composição e variedade dos nutrientes disponíveis e a abundância relativa dos principais elementos nutrientes (MARCOLIN et al., 2015). Teixeira (1973) também observa que a produtividade em Ubatuba é predominantemente controlada pela quantidade de nutrientes disponíveis. Brandini et al. (2014) em um trabalho sobre a ecologia planctônica na região, propõe que a dinâmica das massas d'água atuantes na região, especificamente a intrusão periódica e a regressão da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) devido ao transporte de Ekman impulsionado pelo vento melhora as condições de luz e proporciona nutrientes, aumentando a produção primária na base da zona eufótica contribuindo para a formação de um máximo de Cla. A influência do perfil vertical da luz para a variação da Cla é amplamente discutida na literatura (MOREL, 1988; MOREL; BERTHON, 1989; BRANDINI, 1990; LETELIER et al., 2004). Castro (2014) estudando a variabilidade da temperatura e salinidade na região observa que a ocorrência de *patches* locais com maior estratificação sempre está associada a águas superficiais com baixa salinidade.

Para um melhor entendimento dos padrões de variação da Cla e de como esta se correlaciona com outras variáveis ambientais na estação ANTARES-Ubatuba, a descrição estatística básica das variáveis medidas *in situ* é apresentada. A estatística básica das variáveis Cla, temperatura, salinidade e disco de Secchi, coeficientes de absorção e características bio-ópticas foram apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 5.1 – Estatística básica da concentração dos nutrientes inorgânicos medidos *in situ* na estação ANTARES-Ubatuba.

	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
Fosfato ($\mu\text{mol. L}^{-1}$)	0,33	0,04	0,91	0,11
Silicato ($\mu\text{mol. L}^{-1}$)	4,31	0,41	12,06	1,87
Amônia ($\mu\text{mol. L}^{-1}$)	0,71	0,02	3,76	0,39
Nitrato ($\mu\text{mol. L}^{-1}$)	0,26	0,00	1,89	0,21
Nitrito ($\mu\text{mol. L}^{-1}$)	0,08	0,00	0,56	0,06

Os dados são da estação ANTARES-Ubatuba para o período de novembro de 2004 a julho de 2019.

Fonte: Produção do autor.

Teixeira e Tundísi (1981) relatam que em Ubatuba o nitrogênio estimula o crescimento fitoplanctônico e o fósforo não influencia no incremento da biomassa. Contudo, quando o nitrogênio e o fósforo são combinados, ocorre um acentuado aumento na Cla. Teixeira, (1973) registrou valores baixos de fosfato sugerindo que a influência do material continental com o aporte terrígeno não é significativa para a fertilidade da região como um todo. De acordo com Aidar et al. (1993), a ACAS tem como característica a presença de elevados teores de fosfato.

Em um trabalho realizado na estação ANTARES-Ubatuba, Marcolin et al. (2015) observaram os maiores valores de nitrato no período entre agosto/setembro e março/abril na camada inferior, mostrando que durante as intrusões de fundo da ACAS, o enriquecimento de nutrientes é restrito à região abaixo da picnoclina. Esses autores relataram baixas concentrações de nutrientes durante todo o período estudado na camada superficial, descrevendo que os períodos de intrusão da ACAS corresponderam aos picos de nitrato, Cla e mesozooplâncton na região. Nitrato e fosfato covariam inversamente com a temperatura e as maiores concentrações destes nutrientes estiveram associadas à presença da ACAS. No período de verão foi quando houve os menores registros de nitrato e fosfato e os maiores registros de amônia. Santos (2016) ressalta que na região de Ubatuba amônia e silicato não têm uma relação direta com a presença da ACAS.

Ciotti et al., (1995) descreveram que no inverno a incursão da frente subtropical do Rio da Prata é responsável pela introdução de grandes quantidades de nutrientes, principalmente silicato e fosfato que são consumidos pelo fitoplâncton na região de Ubatuba. Na Tabela 5.2 são apresentados os valores médios, mínimos, máximos e do desvio padrão dos dados estimados por satélite e meteoceanográficos da série de dados ANTARES-Ubatuba.

Tabela 5.2 – Estatística básica das variáveis estimadas por satélite na estação ANTARES-Ubatuba.

	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
Cla MODIS Aqua (mg m^{-3})	1,07	0,18	6,01	0,87
Kd490 (m^{-1})	0,09	0,03	0,40	0,02
PAR (Einstein $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	45,55	31,86	67,25	9,95
Precipitação (mm)	4,13	0	178,86	6,25
Vento (m s^{-1})	3,94	0,44	10,18	1,34
<i>Sunspot</i>	43,14	0,00	220,00	35,92

Os dados são da estação ANTARES-Ubatuba para o período de novembro de 2004 a julho de 2019.

Fonte: Produção do autor.

As medidas de Cla do MODIS Aqua apresentaram um intervalo de variabilidade menor do que a Cla medida *in situ*, onde os maiores valores foram registrados no inverno (máximo de $6,01 \text{ mg m}^{-3}$), frequentemente associados à intrusão da pluma do Rio da Prata. Kd490 e PAR são também dados derivados do MODIS Aqua, com valores médios de $0,09 \text{ m}^{-1}$ e $45,55 \text{ Einstein m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente. Juntamente com as medidas de *sunspot*, representam os parâmetros referentes às variações do campo de luz explorados nesse trabalho.

Os dados de *sunspot* exibem as características típicas do ciclo solar para o hemisfério Sul do planeta, com uma frequência decadal de valores máximos. Em fevereiro de 2014 houve o maior registro de explosões solares da série (220) e nesse período a Cla medida *in situ* foi de $11,32 \text{ mg m}^{-3}$. Vários eventos de florações também foram observados na região (MARTINS et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2021). A relação positiva entre a biomassa de macrófitas marinhas e os dados de *sunspot* já foi relatada anteriormente na região (MARQUES et al., 2015).

A região norte do litoral de São Paulo possui clima tropical sem estação seca definida, com diminuição das chuvas durante o inverno e verões muito úmidos (SANTOS; GALVANI, 2012). O regime de precipitação dos municípios do litoral norte de São Paulo, apresentam totais anuais acima de 1500 mm, especialmente Ubatuba que recebe pelo menos 2.300 mm por ano (BARBOSA,

2007). A precipitação média diária registrada na série foi de 4,13 mm, com um máximo de 178,86 mm registrado no mês de maio de 2011.

Em Ubatuba, o padrão dos ventos é dominado pela Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que é um sistema de alta pressão localizado em torno da latitude de 30° sobre as regiões oceânicas (BASTOS; FERREIRA, 2000). O vento na estação ANTARES-Ubatuba tem a direção predominante de SO (202°) e velocidade média de 3,94 m s⁻¹, com as maiores médias de velocidade no inverno, especialmente no mês de junho.

As correlações entre a Cla, variáveis medidas *in situ*, dados de satélite e variáveis meteoceanográficas estão sumarizadas na Tabela 5.3. A Cla apresentou uma consistente correlação com o a_{ph} (0,81) e com a Cla MODIS Aqua (0,57) o que é esperado devido a interdependência dos bancos de dados. Houve correlação positiva entre a Cla e o Kd490 (0,35) assim como para os dados de *sunspot* (0,32). Os dados de Cla apresentaram correlações negativas com os dados de temperatura (-0,21) e com a profundidade do disco de Secchi (-0,36). A Tabela 5.3 apresenta os valores de correlação entre os parâmetros cujos valores foram estatisticamente significativos.

fitoplanctônica na região, assim como já relatado em outros trabalhos (CIOTTI et al., 1995; GAETA et al., 1999; BRANDINI et al., 2014).

A correlação negativa da Cla com a profundidade do disco de Secchi e positiva com os dados de *sunspot* sugerem que a biomassa do fitoplâncton tem um importante papel na disponibilidade de luz e no campo de luz subaquático em Ubatuba. Considerando que a luz solar, a quantidade de nutrientes disponíveis e a temperatura agem como fatores limitantes para o crescimento da biomassa do fitoplâncton (SATHYENDRANATH et al., 2019) essas correlações já são esperadas.

A correlação mais forte encontrada no conjunto de dados foi positiva entre os dados de Cla MODIS Aqua e os dados de Kd490 (0,99), resultados similares aos encontrados no trabalho de Morel et al. (2007). Algumas relações significativas também puderam ser observadas nessa série, como a correlação negativa entre os dados de a_{cdom} e S_{cdom} (-0,61); a_{ph} se correlacionou negativamente com a profundidade do disco de Secchi (-0,50). S_{cdom} e S_r se correlacionam negativamente (-0,69) e ainda houve correlação positiva entre os dados de nitrito e a_d (0,44). Deve-se considerar que as variáveis podem estar em diferentes escalas e que a Cla está sujeita a variações ao longo do dia, dessa forma nenhuma variável mostrou alta correlação com a Cla medida *in situ*, porém, mesmo sem o registro de relações lineares diretas das variáveis medidas com a Cla, as observações relatadas aqui indicam que o presente conjunto de dados, que abrange uma ampla gama de condições é consistente com as relações médias desenvolvidas entre as variáveis e a Cla durante as últimas décadas em regiões costeiras (Ferreira et al., 2014; GAETA et al., 1999; SANTOS, 2016).

5.3.2 Identificação de florações

Em 7 ocasiões o valor coletado *in situ* da Cla na estação ANTARES-Ubatuba foi maior que o limite estipulado para a classificação de eventos de florações fitoplanctônicas ($> 2 \text{ mg m}^{-3}$) e em 11 ocasiões foram detectadas florações por meio de inspeção visual no campo. As florações detectadas visualmente puderam ser separadas em dois grupos: florações de *Trichodesmium* e

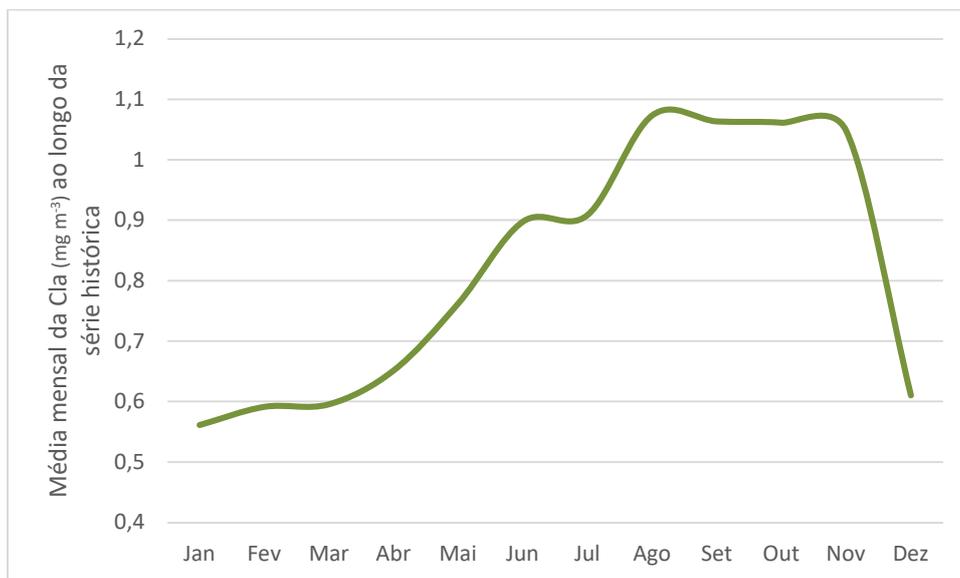
florações de *Mesodinium*. Com os dados de satélite foram registradas 54 situações nas quais a Cla excedeu o limite do percentil 90%. Assim, durante o período de novembro de 2004 a julho de 2019, foram registradas 72 ocorrências de florações fitoplanctônicas na estação ANTARES-Ubatuba. Os dados médios mensais de Cla MODIS Aqua foram utilizados para descrever a variação anual desses eventos.

Com o banco de dados *in situ* de florações, identificadas pelo percentil 90% e com o banco de dados meteoceanográficos foi possível identificar condições ambientais comuns a todos os eventos de florações (N=7). Nessas ocasiões, o registro de precipitação excedendo o limite de 12,5 mm e a direção do vento se mantendo estável por 3 dias seguidos em até 10 dias antes dos eventos, assim como a velocidade do vento maior que $4,5 \text{ m s}^{-1}$ nos últimos 6 dias antes dos eventos foram as condições comuns a todos os eventos de floração identificados pelo limiar da Cla *in situ*. Aplicando essas condições observadas nos dados *in situ* ao banco de imagens de satélite, esses critérios foram atendidos em 84,78% das ocasiões em que a Cla do MODIS Aqua foi maior que 2 mg m^{-3} , indicando eventos de floração. O vento é uma das principais forçantes das perturbações que agem na interface atmosfera-oceano e é responsável por gerar turbulência e correntes resultando na mistura da coluna d'água e, em algumas condições, ressurgência. Devido à estratificação da coluna de água, efeitos de fricção vertical (regidos pelo estresse do vento) podem causar convergência ou divergência levando à circulação em zonas mais profundas (efeito do transporte de Ekman). Esse efeito pode desempenhar um papel importante na dinâmica da produção primária, misturando os nutrientes até as profundidades mais superficiais (POND; PICKARD, 1983). Eventos extremos de vento, como ciclones tropicais, podem ser agentes na ocorrência de florações ao largo da costa e podem estar associados à descarga de água da chuva (ZHENG; TANG, 2007). Distúrbios atmosféricos episódicos, como tempestades e frentes frias, também têm a capacidade de promover o crescimento fitoplanctônico, observável pelo aumento da Cla (FUJII; YAMANAKA, 2008). Dessa forma, considerando o banco de dados da estação ANTARES-Ubatuba, tanto as variáveis

relacionadas ao campo de vento (velocidade e direção), quanto as anomalias na precipitação, que não têm relação linear com a Cla medida *in situ* (Tabela 5.3), indicam que distúrbios na estabilidade da coluna d'água podem ter uma influência no aumento da biomassa e nas ocorrências de florações fitoplanctônicas na região.

Existe escassez de estudos sobre as florações e sobre o ciclo fenológico do fitoplâncton na região da PCSB. Como visto, as flutuações na Cla na região de estudo resultam das interações de múltiplas variáveis e processos e essas variações interferem no registro do pico de biomassa na escala intranual. A série temporal do produto Cla do MODIS Aqua foi utilizada para descrever o padrão médio e a variabilidade temporal, reportando os eventos referentes ao período de 2004 a 2019 para a estação ANTARES-Ubatuba, onde o *timing* e a magnitude da floração anual do fitoplâncton na PCSB foram registrados por meio dos valores médios da série histórica e valores acumulados dos eventos observados. Como mencionado, a região de Ubatuba possui águas oligomesotróficas e em todo o ano são observados valores que excedem o limite de 2 mg m^{-3} (percentil 90% da Cla). Contudo é possível identificar o período no qual esse aumento foi mais frequente. O mês de agosto registrou os maiores valores máximos de Cla ao longo da série histórica (0,21 a $6,01 \text{ mg m}^{-3}$). Utilizando os valores médios mensais de Cla é possível identificar o período em que se observa a tendência de aumento de sua concentração, indicadora do crescimento da biomassa da comunidade fitoplanctônica. Assim, mesmo sem as informações sobre frequência em uma escala mais fina, existe o indicativo de que o período de florações na estação ANTARES-Ubatuba inicia-se no final do inverno (em agosto) e termina na primavera (em novembro). Com os valores médios mensais de Cla MODIS Aqua é possível observar esse padrão como mostrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 - Valores médios mensais de Cla (mg m^{-3}) do MODIS Aqua ao longo da série histórica.

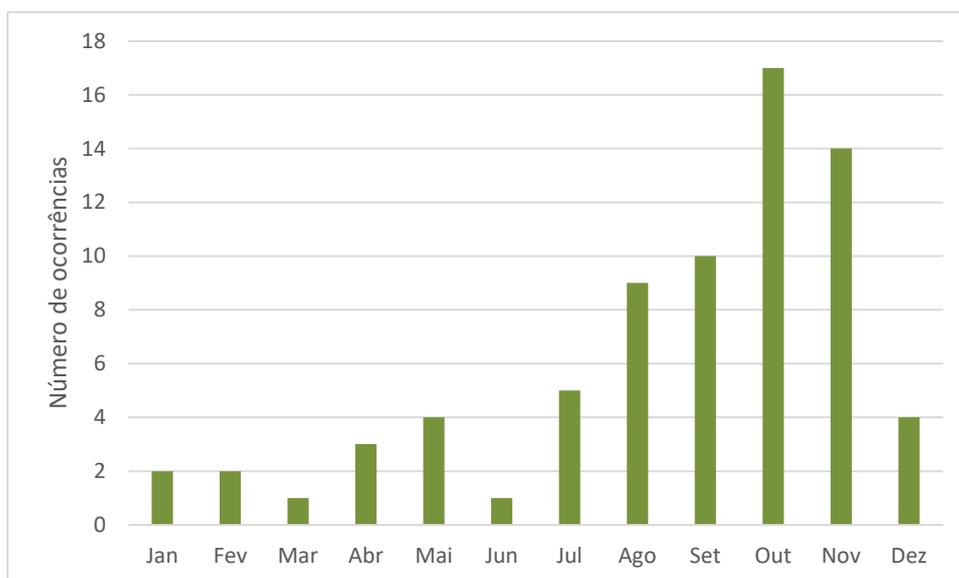


Os valores médios foram agrupados por mês para o período de novembro de 2004 a julho de 2019 para a estação ANTARES-Ubatuba.

Fonte: Produção do autor.

Dandonneau et al. (2004) descrevem que o máximo de Cla sazonal (período de florações) ocorre na estação em que a luz e a estabilidade vertical da coluna d'água se combinam para desencadear o crescimento do fitoplâncton, e usando dados do SeaWiFS, definem que o máximo na região de Ubatuba ocorre em agosto. Kampel et al. (2015) estudando a Cla na plataforma e talude da região da Baía de Santos também observaram aumento da Cla em julho e agosto.

Figura 5.2 - Número de ocorrências de observações de florações algais.



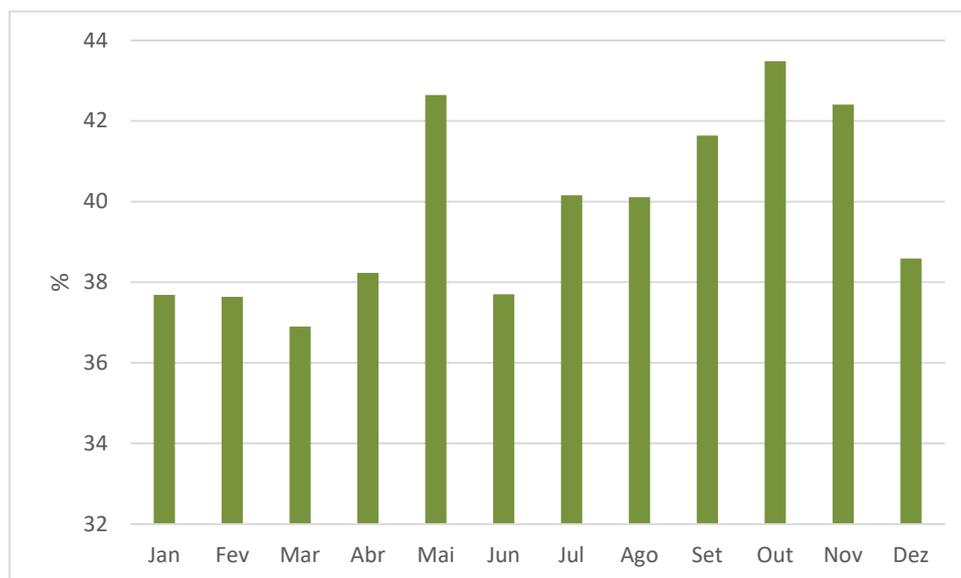
Os dados são da estação ANTARES-Ubatuba e o período estudado foi de novembro de 2004 até julho de 2019. Onde foram contabilizadas as observações *in situ* (N = 18) e as observações por satélite (N = 54).

Fonte: Produção do autor.

Nesse trabalho, o padrão sazonal da Cla mostrou os menores valores médios anuais no verão, com a menor média observada em janeiro ($0,56 \pm 0,21 \text{ mg m}^{-3}$) e os maiores valores médios no inverno, com a maior média em agosto ($1,07 \pm 0,41 \text{ mg m}^{-3}$). Outros trabalhos evidenciam que a biomassa na superfície em termos de Cla é comparativamente maior no inverno do que no verão (BRANDINI, 1990; AIDAR et al., 1993; KAMPEL, 2003). É importante notar que no caso do período analisado nesse trabalho, os valores médios se mantêm mais altos até a primavera, e outubro é o mês em que foi registrado o maior número de ocorrências de florações. Uma outra forma de observar essa variação é mostrada na Figura 5.2, onde são exibidos os valores acumulados por mês contabilizando as florações observadas *in situ* e por satélite na estação ANTARES-Ubatuba para o período de novembro de 2004 a julho de 2019. É possível observar que durante a primavera, há um aumento no valor acumulado de ocorrência de florações, sendo que a primavera foi a estação em que houve os maiores registros acumulados de ocorrências, padrão que

acompanha o mecanismo associado à passagem de frentes frias subtropicais (ESCOBAR et al., 2019). Oliveira e Kampel (2019) também registraram a maior quantidade de frentes frias durante a primavera na região de estudo.

Figura 5.3 – Coeficiente de variação da Cla.



Os dados são da estação ANTARES-Ubatuba e o período estudado foi de novembro de 2004 até julho de 2019.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.3 mostra os coeficientes de variação da Cla MODIS Aqua na estação ANTARES-Ubatuba para o período de novembro de 2004 a julho de 2019. É possível observar nos valores o mesmo padrão observado na Figura 5.2, onde os maiores valores de coeficiente de variação são observados na primavera. Também deve-se destacar o mês de maio, que apresentou um valor alto do índice. A floração sazonal é uma das características dominantes nos padrões de crescimento do fitoplâncton nos ambientes pelágicos, e responde especialmente a mudanças na disponibilidade de luz e nutrientes (DANDONNEAU et al., 2004). Variações interanuais e de longo prazo na fenologia do plâncton podem ser usadas como indicadores para avaliar mudanças no ambiente marinho propagadas por produtores primários para

níveis tróficos superiores (COLELLA et al., 2016). Outras regiões costeiras são caracterizadas com um segundo pico de floração anual menos intenso (SALGADO-HERNANZ et al., 2019; LIU; TANG, 2022). Mesmo que tenham sido registradas florações no final do outono na série aqui analisada, esses eventos são episódicos como pode ser observado na Figura 5.2.

Gaeta et al. (1999) estudando a produção primária da região de Ubatuba, verificaram que principalmente no verão os principais fatores que influenciaram a distribuição da biomassa fitoplanctônica foram a intrusão da ACAS, a passagem de sistemas frontais, precipitação e o regime de ventos. Os fenômenos transientes provocam distúrbios na profundidade da termoclina, influenciando na distribuição da biomassa fitoplanctônica. Marcolin et al. (2015) observaram que a velocidade do vento é mais forte durante a fase de intrusão da ACAS, favorecendo o crescimento fitoplanctônico na coluna d'água na região.

Santos (2016) observa que no ano de 2012 em Ubatuba, o período de floração, durou 3 meses seguidos. O mesmo autor também descreve o registro de altos valores de Cla em 2013. Em relação ao tempo de duração dos eventos de floração, Cortivo e Kampel (2017) observaram que o período de florações em Ubatuba dura em média 16 semanas. Silva et al. (2023) levando em consideração a correlação negativa entre a temperatura e a Cla na Plataforma Continental Sudeste do Brasil, encontraram anomalias entre os anos de 2006-2008 e 2015-2017. Como os dados registrados no presente estudo são diários com muitas lacunas na série, a única perspectiva de análise de continuidade é a da série agrupada em valores médios mensais. Porém, com os dados diários foram registrados eventos de florações sequenciais para os períodos entre setembro de 2011 e novembro de 2012 e entre janeiro de 2014 e agosto de 2014, sugerindo anomalias na Cla nos anos de 2012 e 2014.

Em relação a composição dos eventos de floração, Aidar et al. (1993) descrevem a variabilidade dos grupos fitoplanctônicos em Ubatuba, onde existe a predominância de nanoflagelados, seguido por diatomáceas, dinoflagelados, coccolitoforídeos, silicoflagelados, cianobactérias filamentosas e euglenófitos.

Sassi e Kutner (1982) descrevendo as variações sazonais na abundância e composição do fitoplâncton na enseada de Ubatuba, definem que as diatomáceas e os dinoflagelados são os grupos mais diversificados em espécie, enquanto os fitoflagelados, seguido das diatomáceas e dos dinoflagelados, são os mais abundantes.

Florações de *Trichodesmium* são frequentemente registradas na primavera e no verão na costa brasileira (CARVALHO et al., 2008; DETONI et al., 2016). As colônias de *Trichodesmium* oferecem um habitat ao fornecer um oásis em oceano aberto, abrigando uma comunidade de organismos heterotróficos (HEWSON et al., 2009). Esse gênero de cianobactérias forma florações extensivas nas superfícies dos oceanos em regiões tropicais e subtropicais tanto na costa como em regiões oceânicas com a temperatura da água maior que 20 °C, forte estratificação da coluna d'água e baixo nível de nutrientes (HOOD, 2004; FERNÁNDEZ et al., 2010). Esse grupo de cianobactéria colonial autotrófica filamentosa é capaz de realizar a fixação do nitrogênio atmosférico, o que aumenta a produção primária de forma considerável (BENAVIDES; ARÍSTEGUI, 2020; DUPOUY et al., 2000). Quando ocorre *stress* ambiental ou limitação de recursos, esses organismos adotam nutrição mixotrófica, o que promove plasticidade metabólica e adaptação às dinâmicas ambientais diversas (BENAVIDES; ARÍSTEGUI, 2020). A necessidade da disponibilidade de ferro e fósforo é um fator limitante para a manutenção desse tipo de floração, porém, mesmo sob condições adversas esse grupo é capaz de manter alta biomassa por dias ou até semanas (WHITE et al., 2007). A distribuição do *Trichodesmium* na região é modulada pela temperatura, salinidade e concentração de fosfato (DETONI et al., 2016; CIOTTI et al., 2018).

Houve o registro de 6 observações de florações de *Trichodesmium* feitas durante as coletas *in situ* na estação ANTARES-Ubatuba, em 07 de julho de 2010, 24 de outubro de 2013, 23 de abril de 2014, 30 de outubro de 2014, 28 de julho de 2015 e 27 de outubro de 2016, onde a temperatura da superfície do mar variou entre 21,5 °C a 23,7 °C e a salinidade média foi de 36.6 °C, o que é característico da presença de Água Tropical (MÖLLER et al., 2008) Essa

massa d'água é quente, salina e com baixos teores de nutrientes dissolvidos (BRAGA; NIENCHESKI, 2006) e flui em direção ao sul com a Corrente do Brasil (MÖLLER et al., 2008). Detoni et al. (2016) evidenciaram o potencial neurotóxico em florações de *trichodesmium* entre as latitudes 26° S e 28° S no sudoeste do oceano Atlântico Sul e concluem que próximo à região costeira esse tipo de floração tende a acumular as células, que se quebram e senescem, onde é liberado as saxitoxinas na água, configurando um risco para a comunidade planctônica. Esse potencial tóxico ainda pode levar a danos em células humanas, como descrito em Narayana et al. (2014), embora esses eventos não possam ser considerados frequentes.

É importante observar que esse tipo de organismo carrega ficoeritrina e ficocianina como pigmentos auxiliares e têm características espectrais únicas (IOCCG, 2014). Mesmo que ocorram esforços na tentativa do uso das características espectrais desse tipo de floração pela comunidade científica, Garver et al. (1994), estudando esse grupo com um extenso banco de dados *in situ*, concluem que é improvável que o sensoriamento remoto da cor do oceano seja capaz de identificar esse grupo fitoplanctônico em particular. Todavia, com o avanço das tecnologias hiperespectrais no sensoriamento remoto, novas técnicas podem ser desenvolvidas para suprir essa carência.

As principais características ópticas que diferenciam este gênero são a alta absorção na região do azul devido à presença de aminoácidos dissolvidos nas colônias, o espectro de absorção achatado devido ao efeito de empacotamento, maior retroespalhamento, principalmente no vermelho e no infravermelho próximo (NIR) devido à presença de vacúolos que ocupam cerca de 80% do espaço celular interno e um pico de fluorescência na região verde causada pelo pigmento ficoeritrina (RUDORFF; KAMPEL, 2012). Detoni e Ciotti (2020) propõem o uso do a_{ph} em 621 nm como uma alternativa para a detecção das florações desse organismo. Além das características de absorção devido a presença dos pigmentos auxiliares, as vesículas gasosas espalham a luz na superfície fazendo com que esse tipo de floração seja mais brilhante. A alta reflexão no infravermelho próximo é característica explorada nas tentativas de

quantificação desses eventos (CAPONE et al., 1998; SUBRAMANIAM et al., 1999).

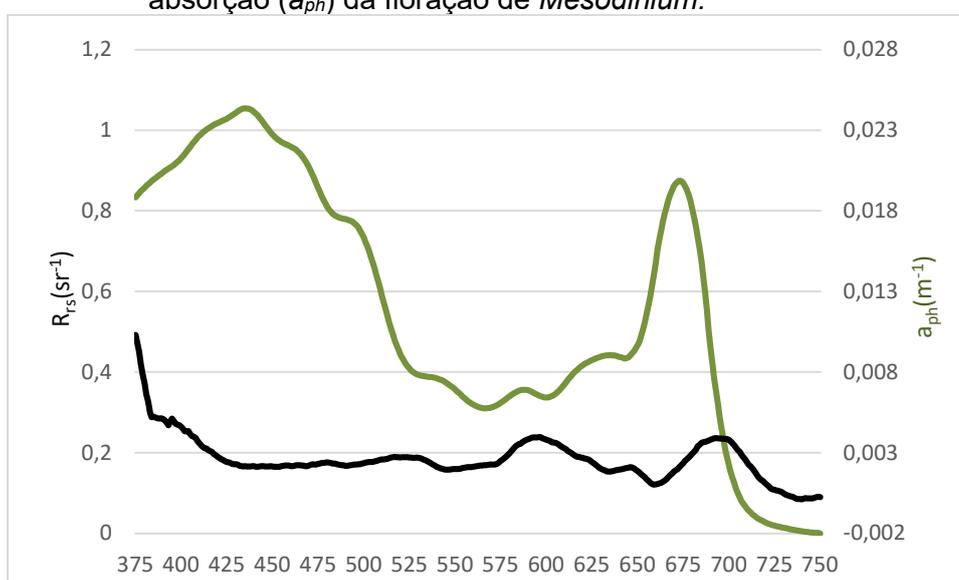
Outro evento típico de floração que ocorre na região é a popularmente chamada "maré vermelha", frequentemente identificada por microscopia como florações de ciliados ou dinoflagelados. Em grande parte dos casos, o *Mesodinium* é o organismo identificado, sendo que esse gênero de ciliado utiliza os cloroplastos de suas presas criptófitas para fotossintetizar (JOHNSON et al., 2016). Podem ocorrer em uma gama de condições ambientais (CRAWFORD et al., 1997) e algumas das condições conhecidas por influenciar a sua ocorrência e abundância incluem o aumento da temperatura e a diminuição da estabilidade da coluna de água, que podem ser causadas por fortes precipitações e escoamento superficial (CLOERN et al., 1994; CRAWFORD et al., 1997; CIOTTI et al., 2018). Outra condição é o esgotamento de nitrogênio e fósforo dissolvidos na zona fótica, uma vez que as células de *Mesodinium* podem migrar verticalmente para explorar o *pool* de nutrientes abaixo da picnoclina (CLOERN et al., 1994) e, assim, competir com outras espécies de fitoplâncton que possuem mobilidade limitada (como as diatomáceas, por exemplo).

Por inspeção visual foram identificados 5 eventos de florações de "maré vermelha" (a nomenclatura popular foi aqui utilizada porque nem todos os registros foram identificados por microscopia) nos dias 13 de novembro de 2012, 01 de janeiro de 2014, 25 de fevereiro de 2014, 01 de setembro de 2016 e 07 de dezembro de 2016, onde a temperatura média registrada foi de 24,8 °C. Na ocorrência de fevereiro de 2014 (Figura 5.4) foi registrado o valor de 11,32 mg m⁻³ de Cla.

Kywalyanga (2002) observando a variabilidade espectral da absorção de *Mesodinium rubrum* descreve que uma das principais características espectrais observadas são os ombros proeminentes na parte verde do espectro em torno de 543 nm e em ~497 nm, e apontam como possível causa a influência da ficoeritrina. Dierssen et al. (2015) utilizaram as regiões espectrais do 565 nm e 575nm com imagens hiperespectrais para a quantificação desse tipo de

floração. No caso da floração detectada em fevereiro de 2014, pode-se observar uma maior reflectância nos comprimentos de onda mais curtos, assim como um pico máximo de absorção em 437 nm. As características espectrais descritas por Kyewalyanga (2002) e Dierssen et al. (2015) se apresentaram de forma suavizada, provavelmente devido a diluição da floração no momento em que as amostras foram adquiridas.

Figura 5.4 - Espectro de reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}) e coeficiente de absorção (a_{ph}) da floração de *Mesodinium*.



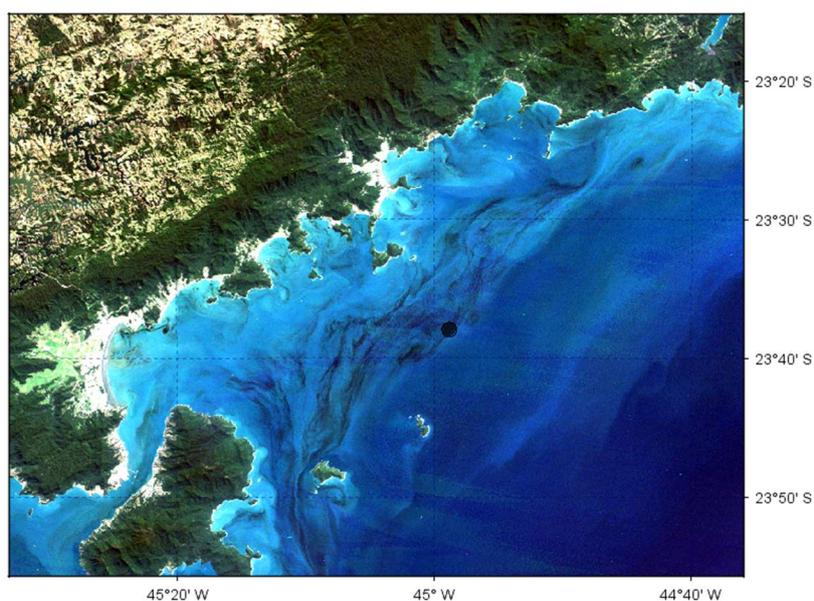
Os espectros foram registrados na ocorrência de floração de *Mesodinium* na estação ANTARES-Ubatuba em 25 de fevereiro de 2014.

Fonte: Produção do autor.

Dependendo da espécie do fitoplâncton dominante, as florações exibem características específicas, muitas vezes se apresentando como manchas ou agregados de organismos (*patches*) e a forma mais consistente para a identificação é por meio da análise de microscopia (ZHAO et al. 2021). Esforços para o uso do sensoriamento remoto para a identificação específica de florações ocorrem principalmente em zonas costeiras, devido ao seu potencial tóxico para humanos. Atualmente, algumas técnicas como o uso de redes neurais e de *machine learning* vêm sendo utilizadas com os dados

orbitais para a identificação desses eventos (ZHAO et al., 2021). Variações significativas em escalas espaciais de dezenas de metros foram documentadas para eventos extremos como a proliferação de cianobactérias, por exemplo (KUTSER, 2004). Então reconhece-se que características de escalas espaciais mais finas, como assinaturas espectrais específicas podem ser suavizadas dentro de uma escala espacial de 1 km, que é comum à maioria dos dados de satélite de cor do oceano (ZIBORDI et al., 2006; MÉLIN; VANTREPOTTE, 2015). Trata-se de um verdadeiro dilema do sensoriamento remoto, pois imagens com resolução espacial mais fina apresentam resolução temporal e / ou resolução espectral reduzidas, o que dificulta a identificação específica de florações.

Figura 5.5 - Exemplo de Floração de dinoflagelados na Estação ANTARES-Ubatuba.



A) Composição pseudo-cor verdadeira (660, 555 e 480 nm) da Câmera de Campo Largo (WFI) do satélite CBERS4 (órbita/ponto: 152/129) do dia 05 de setembro de 2017, com resolução espacial de 64 m. Imagem obtida do Catálogo de Imagens do INPE. A estação ANTARES-Ubatuba está marcada na imagem com um círculo preto, também é possível observar os agregados de organismos em uma escala de dezenas de quilômetros

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.5 mostra a imagem do dia 5 de setembro de 2017. Na ocasião ocorria uma floração de dinoflagelados por toda região costeira da PCSB. O *Gymnodinium aureolum*, organismo causador dessa floração, identificado por microscopia, presencialmente apresenta uma coloração vermelha profunda. Entretanto, aparece quase preta na imagem de satélite e isso ocorre por causa do efeito da absorção e do espalhamento da luz. Esse tipo de floração tende a flutuar nos primeiros metros abaixo da superfície da água (CLOERN et al., 1994), portanto, quaisquer fótons de luz vermelha que estejam refletindo provavelmente serão absorvidos ou espalhados em seu caminho de volta à superfície e até o satélite.

Um aspecto que deve ser observado é que as variações na Cla de superfície nem sempre refletem variações na biomassa integrada em profundidade. No mar Mediterrâneo, por exemplo, a distribuição vertical da Cla é caracterizada por um máximo subsuperficial quando as condições são oligotróficas. Este máximo subsuperficial está localizado perto da profundidade da nutriclina, que geralmente está bem abaixo da camada de mistura (CULLEN, 2015). Algumas vezes, dependendo das condições, esses valores máximos de Cla, mesmo não estando na superfície, ainda podem ser identificados pelos satélites.

A identificação de florações específicas com o uso do sensoriamento remoto ainda é um desafio, contudo espera-se que as regiões espectrais disponíveis na próxima geração de sensores de cor do oceano aumentem as possibilidades de uso.

5.4 Conclusão

No presente trabalho, a série temporal de Cla, dados de satélite e meteoceanográficos adquiridos na estação ANTARES-Ubatuba, região costeira da Plataforma Continental Sudeste do Brasil foram analisados para caracterizar a variabilidade das florações fitoplanctônicas e as condições oceanográficas associadas. Com a análise de correlação foi observado que a Cla tem uma forte correlação com o a_{ph} e se correlaciona negativamente com a temperatura e a profundidade do disco de Secchi. A Cla MODIS Aqua tem uma forte correlação com os dados de Kd490. Essas correlações indicam que o aumento

da biomassa fitoplanctônica em Ubatuba está relacionado com a presença de águas mais frias (como a presença da intrusão da ACAS e a incursão das águas da pluma do Rio da Prata na região). Com as variáveis meteocanográficas foi possível observar que variações no vento e na precipitação também exercem influência no estabelecimento das florações algais. Essas relações contribuem para o entendimento dos processos que influenciam a distribuição das propriedades biofísico-químicas das águas costeiras na região de estudo.

O banco de dados de satélite permitiu a descrição da variabilidade da Cla, do ciclo fenológico médio e das ocorrências de florações fitoplanctônicas, onde o período de florações inicia-se no final do inverno (em agosto) e termina na primavera (em novembro). O número de observações acumulado foi maior em outubro.

Com as observações *in situ* foi possível descrever as florações detectadas por inspeção visual e as características comuns aos eventos de floração de dinoflagelados.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusão

Políticas marítimas internacionais têm definido indicadores, critérios e descritores para inferir e comunicar fenômenos ambientais complexos em regiões costeiras de maneira concisa. O principal objetivo desses órgãos é proteger a biodiversidade das águas marinhas e os recursos que são baseados em atividades econômicas e sociais relacionadas com o oceano. A variação da Cla nas águas marinhas é identificada como um dos principais descritores que precisam ser monitorados para garantir a compatibilidade entre atividades e manutenção do status ambiental marinho preservado. Nesse sentido, as variações da Cla são identificadas como um dos principais identificadores do bom estado do ambiente. No entanto, para esse tipo de monitoramento é necessário que primeiramente as variáveis sejam caracterizadas.

Nesse estudo, com a utilização de uma série temporal *in situ* e dados de sensoriamento remoto do período de novembro de 2004 até julho de 2019 foi possível caracterizar a Cla na estação ANTARES-Ubatuba na Plataforma Continental Sudeste do Brasil, bem como, descrever os componentes bio-ópticos que podem interferir em sua estimativa. A região apresenta um padrão oligo-mesotrófico com média de 1 mg m^{-3} e com florações ocasionais, especialmente relacionadas à intrusão de águas frias de eventos de ressurgência da ACAS. O período de florações inicia-se no final do inverno (em agosto) e termina na primavera (em novembro), onde o valor máximo de Cla registrado foi de $18,09 \text{ mg m}^{-3}$. Mesmo não mostrando nenhuma tendência temporal monotônica estatisticamente significativa, a série de Cla quando decomposta mostra uma dominância da contribuição da componente sazonal (41%).

A matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM) foi o COA dominante contribuindo para o coeficiente de absorção em 440 nm durante o período estudado, sugerindo a influência de fontes continentais, mesmo estando distante da costa no limite externo da plataforma interna (40 m). Foram

observados dois tipos ópticos de águas: um composto principalmente por águas “azuis” com menores concentrações de COA e outro por águas “verdes” com maiores concentrações de COA. Apesar da dominância espectral do CDOM, o algoritmo empírico OCx obteve um desempenho razoavelmente bom com um viés positivo tanto para a estimativa da Cla por radiometria *in situ* (17-25%) quanto por satélite (25-31%). As principais fontes de incerteza das estimativas foram causadas por maiores proporções de CDM (CDOM + detritos) e pela absorção específica do fitoplâncton, causando viés positivo.

Com a caracterização bio-óptica da região, os resultados desse estudo sugerem que os produtos de satélite padrão de Cla podem ser usados (com alguma cautela) para monitorar e estudar a dinâmica da biomassa fitoplanctônica, conhecendo as incertezas esperadas. As abordagens utilizadas aqui são potencialmente aplicáveis a outras regiões da costa brasileira e em conjunto com os dados de satélite, representam uma poderosa fonte para o monitoramento da variabilidade da Cla.

A variação da Cla em regiões costeiras depende de um sistema bastante complexo que pode estar relacionado a processos oceanográficos locais, regionais ou de larga escala espacial. Uma metodologia de amostragem local, *in situ* é essencial para a caracterização e entendimento dos processos relacionados, porém esse tipo de inferência demanda tempo e investimento de recursos. O uso de dados de satélites com alta frequência temporal é capaz de detectar padrões de Cla em escala local, bem como pode investigar padrões espaciais maiores como em escalas regional e global, sugerindo interconexões entre diferentes áreas e iluminando as causas potenciais relacionadas a esses processos. Tudo isso ressalta a importância de combinar dados de satélite com observações *in situ* de estações locais, que muitas vezes não são capazes de resolver os padrões espaciais que são caracterizados por fortes gradientes. Melhorias adicionais qualitativas e quantitativas são esperadas com o aumento da atividade de satélites mais poderosos e com a disponibilidade de conjuntos de dados de satélite combinados (ou seja, multisensores mesclados), conjuntos

de dados de satélite de alta resolução e de longo prazo, que deverão ser usados em um futuro próximo.

6.2 Perspectivas futuras

A amostragem *in situ* em regiões costeiras é um desafio, tanto pela complexidade dos componentes ópticos como pela alta variabilidade, o que dificulta o desenvolvimento de algoritmos precisos (LOISEL et al., 2013). Mesmo assim, esse tipo de amostragem é importante para os exercícios de validação. Para as estações de coleta *in situ* existentes, espera-se que haja continuidade na coleta de dados e que os projetos que estão envolvidos com esse tipo de amostragem sejam aprimorados com mais estações de coleta, principalmente na costa brasileira. Algumas alternativas vêm sendo apresentadas em caráter auxiliar às amostragens tradicionais *in situ*. Uma abordagem que tem sido utilizada ao redor do mundo é o emprego de sensores robôs autônomos para a coleta de dados, conhecidos com *gliders*, que coletam diversos tipos de dados oceanográficos, como temperatura, salinidade, concentração de nutrientes e concentração de clorofila-*a* (REMBAUVILLE et al., 2017; THOMALLA et al., 2017).

O monitoramento ambiental de regiões costeiras conta também, em caráter experimental, com a utilização de dados adquiridos pela própria população, com o uso de *smartphones* para a coleta de dados de concentração de clorofila-*a*, entre outros. A frequente ocorrência de casos de "marés vermelhas" na região costeira do Golfo do México incentivou a criação do aplicativo *Citizen Science Information Collaboration* (CSIC) na Florida, EUA. Outro aplicativo disponível é o SmartFluo, que utiliza a câmera do celular como um fluorímetro (FRIEDRICHS et al., 2017).

Quanto aos dados de sensores orbitais espera-se uma evolução qualitativa e quantitativa dos produtos de satélite. Além da recém-lançada missão EnMAP (do inglês, *Environmental Mapping and Analysis Program*) com resolução espacial de 30 metros hiper espectral da Alemanha, espera-se o lançamento do Satélite Sentinel 3C em 2024, pela ESA. Também é bastante esperada a

missão hiperespectral PACE (*Pre-Aerosol, Clouds, and ocean Ecosystem*) com resolução espacial de 1 km e lançamento previsto para 2024 pela NASA.

De acordo com Sathyendranath et al. (2017), é fundamental manter e construir bases de dados *in situ* e melhorar os métodos de amostragem para avaliar o desempenho dos sensores e produtos de satélite. Assim, os esforços para manter a amostragem *in situ* de longo prazo são essenciais para a validação de produtos e monitoramento de mudanças climáticas por satélite, o que melhora a capacidade de avaliar a eficácia dos produtos da cor do oceano e construir informações confiáveis para o monitoramento ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIDAR, E.; GAETA, S. A.; GIANESELLA-GALVAO, S. M. F.; KUTNER, M. B. B.; TEIXEIRA, C. Ecossistema costeiro subtropical: nutrientes dissolvidos, fitoplâncton e clorofila-a e suas relações com as condições oceanográficas na região de Ubatuba, SP. **Publicação Especial do Instituto Oceanográfico.**, v. 10, p. 9–43, 1993.
- ANDERSON, D. M.; GLIBERT, P. M.; BURKHOLDER, J. M. Harmful algal blooms and eutrophication: nutrient sources, composition, and consequences. **Estuaries**, v. 25, n. 4, p. 704–726, 2002.
- ANTHONY, K. R. N.; RIDD, P. V.; ORPIN, A. R.; LARCOMBE, P.; LOUGH, J. Temporal variation of light availability in coastal benthic habitats: effects of clouds, turbidity, and tides. **Limnology and Oceanography**, v. 49, n. 6, p. 2201–2211, 2004.
- BABIN, M.; STRAMSKI, D.; FERRARI, G. M.; CLAUSTRE, H.; BRICAUD, A.; OBOLENSKY, G.; HOEPFFNER, N. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. C7, p. 3211, 2003.
- BARBOSA, J. P. M. Caracterização do regime pluviométrico do litoral do estado de São Paulo segundo repartições propostas por monteiro (1973). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo: 2007.
- BASTOS, C. C.; FERREIRA, N. J. Análise climatológica da alta subtropical do atlântico sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 2000.
- BEHRENFELD, M. J.; O'MALLEY, R. T.; BOSS, E. S.; WESTBERRY, T. K.; GRAFF, J. R.; HALSEY, K. H.; MILLIGAN, A. J.; SIEGEL, D. A.; BROWN, M. B. Revaluating ocean warming impacts on global phytoplankton. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 3, p. 323–330, 2016.
- BELLACICCO, M.; CIANI, D.; DOXARAN, D.; VELLUCCI, V.; ANTOINE, D.; WANG, M.; D'ORTENZIO, F.; MARULLO, S. Assessing the potential benefits of the geostationary vantage point for generating daily chlorophyll-a maps in the Baltic Sea. **Remote Sensing**, v. 10, n. 12, p. 1944, 2018.

BENAVIDES, M.; ARÍSTEGUI, J. Untreated sewage outfalls do not promote *Trichodesmium* blooms in the coasts of the Canary Islands. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 18386, 2020a.

BLONDEAU-PATISSIER, D.; BRANDO, V. E.; OUBELKHEIR, K.; DEKKER, A. G.; CLEMENTSON, L. A.; DANIEL, P. Bio-optical variability of the absorption and scattering properties of the Queensland inshore and reef waters, Australia. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, n. C5, p. C05003, 2009.

BLOUGH, N. V.; DEL VECCHIO, R. Chromophoric DOM in the coastal environment. In: HANSELL, D. A.; CARLSON, C. A. (Ed.). **Biogeochemistry of marine dissolved organic matter**. Amsterdam: Elsevier, 2002. p. 509–546.

BONECKER, A. C. T.; BONECKER, S. L. C.; BASSANI, C. Plâncton marinho. In: PEREIRA, R. C.; SOARES-GOMES, A. (Ed.). **Biologia marinha**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2009. p. 213–240.

BOYCE, D. G.; LEWIS, M. R.; WORM, B. Global phytoplankton decline over the past century. **Nature**, v. 466, n. 7306, p. 591–596, 2010.

BRAGA, E. S.; NIENCHESKI, L. F. H. Composição das massas de água e seus potenciais produtivos na área entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS) (2006). In: ROSSI-WONGTSCHOWSKI, C. L. D. B.; MADUREIRA L. S. P. (Ed.). **O ambiente oceanográfico da plataforma continental e do talude na região Sudeste-Sul do Brasil**. São Paulo: Edusp, 2006. p. 161–218.

BRANDINI, F. P. Hydrography and characteristics of the phytoplankton in shelf and oceanic waters off southeastern Brazil during winter (July/August 1982) and summer (February/March 1984). **Hydrobiologia**, v. 196, n. 2, p. 111–148, 1990.

BRANDINI, F. P.; NOGUEIRA, M.; SIMIÃO, M.; CARLOS UGAZ CODINA, J.; ALMEIDA NOERNBERG, M. Deep chlorophyll maximum and plankton community response to oceanic bottom intrusions on the continental shelf in the South Brazilian Bight. **Continental Shelf Research**, v. 89, p. 61–75, 2014.

BRANDINI, F. P.; TURA, P. M.; SANTOS, P. P. G. M. Ecosystem responses to biogeochemical fronts in the South Brazil Bight. **Progress in Oceanography**, v. 164, p. 52–62, 2018a.

BREWIN, R. J. W.; SATHYENDRANATH, S.; MÜLLER, D.; BROCKMANN, C.; DESCHAMPS, P.-Y.; DEVRED, E.; DOERFFER, R.; FOMFERRA, N.; FRANZ, B.; GRANT, M.; GROOM, S.; HORSEMAN, A.; HU, C.; KRASEMANN, H.; LEE, Z.; MARITORENA, S.; MÉLIN, F.; PETERS, M.; PLATT, T.; REGNER, P.; SMYTH, T.; STEINMETZ, F.; SWINTON, J.; WERDELL, J.; WHITE, G. N. The

ocean colour climate change initiative: III. a round-robin comparison on in-water bio-optical algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 162, p. 271–294, 2015.

BRICAUD, A. Natural variability of phytoplanktonic absorption in oceanic waters: Influence of the size structure of algal populations. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, n. C11, p. C11010, 2004.

BRICAUD, A.; BABIN, M.; CLAUSTRE, H.; RAS, J.; TIÈCHE, F. Light absorption properties and absorption budget of Southeast Pacific waters. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. C8, p. C08009, 2010.

BRICAUD, A.; MOREL, A.; BABIN, M.; ALLALI, K.; CLAUSTRE, H. Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll *a* concentration in oceanic (case 1) waters: analysis and implications for bio-optical models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 103, n. C13, p. 31033–31044, 1998.

BRICAUD, A.; ROESLER, C.; ZANEVELD, J. R. V. In situ methods for measuring the inherent optical properties of ocean waters. **Limnology and Oceanography**, v. 40, n. 2, p. 393–410, 1995.

CAMPBELL, J. W. The lognormal distribution as a model for bio-optical variability in the sea. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, n. C7, p. 13237, 1995.

CAPONE, D.; SUBRAMANIAM, A.; MONTOYA, J.; VOSS, M.; HUMBORG, C.; JOHANSEN, A.; SIEFERT, R.; CARPENTER, E. An extensive bloom of the N₂-fixing cyanobacterium *Trichodesmium erythraeum* in the central Arabian Sea. **Marine Ecology Progress Series**, v. 172, p. 281–292, 1998.

CARDER, K. L.; CHEN, F. R.; LEE, Z. P.; HAWES, S. K.; KAMYKOWSKI, D. Semianalytic moderate-resolution imaging spectrometer algorithms for chlorophyll *a* and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 104, n. C3, p. 5403–5421, 1999.

CARSWELL, T.; COSTA, M.; YOUNG, E.; KOMICK, N.; GOWER, J.; SWEETING, R. Evaluation of MODIS-aqua atmospheric correction and chlorophyll products of western North American coastal waters based on 13 years of data. **Remote Sensing**, v. 9, n. 10, p. 1063, 2017.

CARVALHO J. S. **Variabilidade de longo-termo do transporte da Corrente do Brasil ao longo de 30o S: um estudo numérico**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2014.

CARVALHO, M. **Estimativa da concentração de clorofila-a através de dados de cor do oceano e caracterização oceanográfica da plataforma continental adjacente à Baixada Santista**. 2009. 195 p. Tese (Doutorado em Oceanografia Biológica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CARVALHO, M.; CIOTTI, A. M.; GIANESELLA, S. M. F.; CORRÊA, F. M. P. S.; PERINOTTO, R. R. C. Bio-optical properties of the inner continental shelf off Santos estuarine system, southeastern Brazil, and their implications for ocean color algorithm performance. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 62, n. 2, p. 71–87, 2014.

CARVALHO, M.; GIANESELLA, S. M. F.; SALDANHA-CORRÊA, F. M. P. Trichodesmium erythraeum bloom on the continental shelf off Santos, southeast Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 56, n. 4, p. 307–311, 2008.

CASTELLO, J. P.; SUNYÉ, P. S.; HAIMOVICI, M.; HELLEBRANDT, D. Fisheries in southern Brazil: a comparison of their management and sustainability. **Journal of Applied Ichthyology**, v. 25, n. 3, p. 287–293, 2009.

CASTRO, B. M. Summer/winter stratification variability in the central part of the South Brazil Bight. **Continental Shelf Research**, v. 89, p. 15–23, 2014.

CASTRO, B. M. DE; MIRANDA, L. B. DE. **Physical oceanography of the western atlantic continental shelf located between 4° N and 34° S: coastal segment (4,W)**. Oxford: John Wiley & Sons, 1998. v. 11, 251 p.

CASTRO, N. O. DE; MOSER, G. A. O. Florações de algas nocivas e seus efeitos ambientais. **Oecologia Australis**, v. 16, n. 02, p. 235–264, 2012.

CASTRO FILHO, B. M.; MIRANDA, L. B.; MIYAO, S. Y. Condições hidrográficas na plataforma continental ao largo de Ubatuba: variações sazonais e em média escala. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, v. 35, n. 2, p. 135–151, 1987.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; DIAS, M. A. F. S.; SILVA, M. G. A. J. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 646p.

CECILIO, R. O.; DILLENBURG, S. R. An ocean wind-wave climatology for the Southern Brazilian Shelf. Part II: variability in space and time. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 88, p. 101103, 2019.

CHEN, Z.-S.; RHEE, S. H.; LIU, G.-L. Empirical mode decomposition based on Fourier transform and band-pass filter. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, v. 11, n. 2, p. 939–951, 2019.

- CHERUKURU, N.; DEKKER, A. G.; HARDMAN-MOUNTFORD, N. J.; CLEMENTSON, L. A.; THOMPSON, P. A. Bio-optical variability in multiple water masses across a tropical shelf: implications for ocean colour remote sensing models. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 219, p. 223–230, 2019.
- CIOTTI, Á. M.; FERREIRA, A.; GIANNINI, M. F. C. Seasonal and event-driven changes in the phytoplankton communities in the Araçá Bay and adjacent waters. **Ocean & Coastal Management**, v. 164, p. 14–31, 2018.
- CIOTTI, Á. M.; LEWIS, M. R.; CULLEN, J. J. Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton communities and the spectral shape of the absorption coefficient. **Limnology and Oceanography**, v. 47, n. 2, p. 404–417, 2002.
- CIOTTI, Á. M.; ODEBRECHT, C.; FILLMANN, G.; MOLLER, O. O. Freshwater outflow and subtropical convergence influence on phytoplankton biomass on the southern Brazilian continental shelf. **Continental Shelf Research**, v. 15, n. 14, p. 1737–1756, 1995.
- CLIMANÁLISE. **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, v.22, n.8, 2007. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/>.
- CLIMANÁLISE. **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, v.28, n.11, 2013. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/>.
- CLOERN, J. E.; COLE, B. E.; HAGER, S. W. Notes on a *Mesodinium rubrum* red tide in San Francisco Bay (California, USA). **Journal of Plankton Research**, v. 16, n. 9, p. 1269–1276, 1994.
- COLELLA, S.; FALCINI, F.; RINALDI, E.; SAMMARTINO, M.; SANTOLERI, R. Mediterranean Ocean Colour Chlorophyll Trends. **PLOS ONE**, v. 11, n. 6, p. e0155756, 2016.
- CORREDOR-ACOSTA, A.; CORTÉS-CHONG, N.; ACOSTA, A.; PIZARRO-KOCH, M.; VARGAS, A.; MEDELLÍN-MORA, J.; SALDÍAS, G. S.; ECHEVERRY-GUERRA, V.; GUTIÉRREZ-FUENTES, J.; BETANCUR-TURIZO, S. Spatio-temporal variability of chlorophyll-A and environmental variables in the Panama Bight. **Remote Sensing**, v. 12, n. 13, p. 2150, 2020.
- CORTIVO, F. D.; KAMPEL, M. Caracterização do bloom anual da concentração de clorofila- na Baía de Santos e na Estação Antares-Ubatuba. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIAS DO MAR, 2017, Balneário Camboriú. **Anais...** 2017.

CRAWFORD, D. W.; PURDIE, D. A.; LOCKWOOD, A. P. M.; WEISSMAN, P. Recurrent red-tides in the Southampton Water Estuary Caused by the phototrophic ciliate mesodinium rubrum. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 45, n. 6, p. 799–812, 1997.

CULLEN, J. J. Subsurface chlorophyll maximum layers: enduring enigma or mystery solved? **Annual Review of Marine Science**, v. 7, n. 1, p. 207–239, 2015.

DANDONNEAU, Y.; DESCHAMPS, P.-Y.; NICOLAS, J.-M.; LOISEL, H.; BLANCHOT, J.; MONTEL, Y.; THIEULEUX, F.; BÉCU, G. Seasonal and interannual variability of ocean color and composition of phytoplankton communities in the North Atlantic, equatorial Pacific and South Pacific. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 51, n. 1–3, p. 303–318, 2004.

DE MORAES RUDORFF, N.; KAMPEL, M. Orbital remote sensing of phytoplankton functional types: a new review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 6, p. 1967–1990, 2012.

DE SOUZA, R. B.; ROBINSON, I. S. Lagrangian and satellite observations of the Brazilian Coastal Current. **Continental Shelf Research**, v. 24, n. 2, p. 241–262, 2004.

DEKKER, A. G.; PHINN, S. R.; ANSTEE, J.; BISSETT, P.; BRANDO, V. E.; CASEY, B.; FEARN, P.; HEDLEY, J.; KLONOWSKI, W.; LEE, Z. P.; LYNCH, M.; LYONS, M.; MOBLEY, C.; ROELFSEMA, C. Intercomparison of shallow water bathymetry, hydro-optics, and benthos mapping techniques in Australian and Caribbean coastal environments. **Limnology and Oceanography: Methods**, v. 9, n. 9, p. 396–425, 2011.

DELGADO, A. L.; PRATOLONGO, P. D.; DOGLIOTTI, A. I.; ARENA, M.; CELLERI, C.; CARDONA, J. E. G.; MARTINEZ, A. Evaluation of MODIS-Aqua and OLCI Chlorophyll-a products in contrasting waters of the Southwestern Atlantic Ocean. **Ocean and Coastal Research**, v. 69, p1-6, 2021.

DELGADO, A.; LOISEL, H.; JAMET, C.; VANTREPOTTE, V.; PERILLO, G.; PICCOLO, M. Seasonal and inter-annual analysis of chlorophyll-a and inherent optical properties from satellite observations in the inner and mid-shelves of the south of Buenos Aires Province (Argentina). **Remote Sensing**, v. 7, n. 9, p. 11821–11847, 2015.

DEMIR, E. İ.; TURKOGLU, M. Temporal variations of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in the coastal waters of the Çanakkale Strait in 2018. **Oceanologia**, v. 64, n. 1, p. 176–197, 2022.

DETONI, A. M. S.; CIOTTI, A. M. Trichome abundance, chlorophyll content and the spectral coefficient for light absorption of *Trichodesmium* slicks observed in the Southwestern Atlantic. **Journal of Plankton Research**, v. 42, n. 2, p. 135–139, 2020.

DETONI, A. M. S.; CIOTTI, Á. M.; CALIL, P. H. R.; TAVANO, V. M.; YUNES, J. S. *Trichodesmium* latitudinal distribution on the shelf break in the southwestern Atlantic Ocean during spring and autumn. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 30, n. 11, p. 1738–1753, 2016.

DETONI, A. M. S.; FONSECA COSTA, L. D.; PACHECO, L. A.; YUNES, J. S. Toxic *Trichodesmium* bloom occurrence in the southwestern South Atlantic Ocean. **Toxicon**, v. 110, p. 51–55, 2016.

DIERSSEN, H.; MCMANUS, G. B.; CHLUS, A.; QIU, D.; GAO, B.-C.; LIN, S. Space station image captures a red tide ciliate bloom at high spectral and spatial resolution. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 48, p. 14783–14787, 2015.

DUNCAN, M. J.; HARRISON, P. J. Comparison of solvents for extracting chlorophylls from marine macrophytes. **Botanica Marina**, v. 25, n. 9, p. 445–448, 1982.

DUPOUY, C.; NEVEUX, J.; SUBRAMANIAM, A.; MULHOLLAND, M. R.; MONTOYA, J. P.; CAMPBELL, L.; CARPENTER, E. J.; CAPONE, D. G. Satellite captures *trichodesmium* blooms in the southwestern tropical Pacific. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 81, n. 2, p. 13, 2000.

ESCOBAR, G. C. J.; REBOITA, M. S.; SOUZA, A. Climatology of surface baroclinic zones in the coast of Brazil. **Atmósfera**, v. 32, n. 2, p. 129–141, 2019.

FAVARETO, L.; RUDORFF, N.; KAMPEL, M.; FROUIN, R.; RÖTTGERS, R.; DOXARAN, D.; MURAKAMI, H.; DUPOUY, C. Bio-optical characterization and ocean colour inversion in the eastern Lagoon of New Caledonia, South Tropical Pacific. **Remote Sensing**, v. 10, n. 7, p. 1043, 2018.

FERNÁNDEZ, A.; MOURIÑO-CARBALLIDO, B.; BODE, A.; VARELA, M.; MARAÑÓN, E. Latitudinal distribution of *trichodesmium* spp. and N₂ fixation in the Atlantic Ocean. **Biogeosciences**, v. 7, n. 10, p. 3167–3176, 2010.

FERREIRA, A.; CIOTTI, Á. M.; COLÓ GIANNINI, M. F. Variability in the light absorption coefficients of phytoplankton, non-algal particles, and colored dissolved organic matter in a subtropical bay (Brazil). **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 139, p. 127–136, 2014.

FERREIRA, J. G.; ANDERSEN, J. H.; BORJA, A.; BRICKER, S. B.; CAMP, J.; CARDOSO DA SILVA, M.; GARCÉS, E.; HEISKANEN, A.-S.; HUMBORG, C.; IGNATIADES, L.; LANCELOT, C.; MENESGUEN, A.; TETT, P.; HOEPPFNER, N.; CLAUSSEN, U. Overview of eutrophication indicators to assess environmental status within the European Marine Strategy Framework Directive. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 93, n. 2, p. 117–131, 2011.

FICHOT, C. G.; BENNER, R. The spectral slope coefficient of chromophoric dissolved organic matter ($S_{275-295}$) as a tracer of terrigenous dissolved organic carbon in river-influenced ocean margins. **Limnology and Oceanography**, v. 57, n. 5, p. 1453–1466, 2012.

FRIEDRICH, A.; BUSCH, J.; VAN DER WOERD, H.; ZIELINSKI, O. SmartFluo: a method and affordable adapter to measure chlorophyll a fluorescence with smartphones. **Sensors**, v. 17, n. 4, p. 678, 2017.

FUJII, M.; YAMANAKA, Y. Effects of storms on primary productivity and air-sea CO₂ exchange in the subarctic western North Pacific: a modeling study. **Biogeosciences**, v. 5, n. 4, p. 1189–1197, 2008.

GAETA, S. A.; RIBEIRO, S. M. S.; METZLER, P. M.; FRANCO, M. S.; ABE, D. S. Environmental forcing on phytoplankton biomass and primary productivity of the coastal ecosystem in Ubatuba region, southern Brazil. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 47, n. 1, p. 11–27, 1999.

GARCIA, C. A. E.; GARCIA, V. M. T.; MCCLAIN, C. R. Evaluation of SeaWiFS chlorophyll algorithms in the Southwestern Atlantic and Southern Oceans. **Remote Sensing of Environment**, v. 95, n. 1, p. 125–137, 2005.

GARCIA, V. M. T.; SIGNORINI, S.; GARCIA, C. A. E.; MCCLAIN, C. R. Empirical and semi-analytical chlorophyll algorithms in the south-western Atlantic coastal region (25–40°S and 60–45°W). **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 8, p. 1539–1562, 2006.

GARVER, S. A.; SIEGEL, D. A. Inherent optical property inversion of ocean color spectra and its biogeochemical interpretation: 1. time series from the Sargasso Sea. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 102, n. C8, p. 18607–18625, 1997.

GARVER, S. A.; SIEGEL, D. A.; B. GREG, M. Variability in near-surface particulate absorption spectra: what can a satellite ocean color imager see? **Limnology and Oceanography**, v. 39, n. 6, p. 1349–1367, 1994.

GASALLA, M. A.; RODRIGUES, A. R.; POSTUMA, F. A. The trophic role of the squid *Loligo plei* as a keystone species in the South Brazil Bight ecosystem. **ICES Journal of Marine Science**, v. 67, n. 7, p. 1413–1424, 2010.

GIANNINI, M. F. C.; GARCIA, C. A. E.; TAVANO, V. M.; CIOTTI, Á. M. Effects of low-salinity and high-turbidity waters on empirical ocean colour algorithms: an example for Southwestern Atlantic waters. **Continental Shelf Research**, v. 59, p. 84–96, 2013.

GIARDINO, C.; BRANDO, V. E.; GEGER, P.; PINNEL, N.; HOCHBERG, E.; KNAEPS, E.; REUSEN, I.; DOERFFER, R.; BRESCIANI, M.; BRAGA, F.; FOERSTER, S.; CHAMPOLLION, N.; DEKKER, A. Imaging spectrometry of inland and coastal waters: state of the art, achievements, and perspectives. **Surveys in Geophysics**, v. 40, n. 3, p. 401–429, 2019.

GLIBERT, P. M.; BERDALET, E.; BURFORD, M. A.; PITCHER, G. C.; ZHOU, M. Harmful algal blooms, and the importance of understanding their ecology and oceanography. In: GLIBERT, P.; BERDALET, E.; BURFORD, M.; PITCHER, G.; ZHOU, M. (Ed.). **Global ecology and oceanography of harmful algal blooms**. Cham: Springer, 20018. p. 9–25.

GOES, J. I.; THOPPIL, P. G.; GOMES, H. DO R.; FASULLO, J. T. Warming of the Eurasian landmass is making the Arabian Sea more productive. **Science**, v. 308, n. 5721, p. 545–547, 2005.

GOHIN, F. Annual cycles of chlorophyll-a, non-algal suspended particulate matter, and turbidity observed from space and in-situ in coastal waters. **Ocean Science**, v. 7, n. 5, p. 705–732, 2011.

GOMES, H. D. R.; GOES, J. I.; MATONDKAR, S. G. P.; BUSKEY, E. J.; BASU, S.; PARAB, S.; THOPPIL, P. Massive outbreaks of *Noctiluca scintillans* blooms in the Arabian Sea due to spread of hypoxia. **Nature Communications**, v. 5, n. 1, p. 4862, 2014.

GONÇALVES-ARAÚJO, R.; RÖTTGERS, R.; HARAGUCHI, L.; BRANDINI, F. P. Hydrography-driven variability of optically active constituents of water in the south Brazilian bight: biogeochemical implications. **Frontiers in Marine Science**, v. 6, p. 1-11, 2019.

GORDON, H. R.; MCCLUNEY, W. R. Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing. **Applied Optics**, v. 14, n. 2, p. 413, 1975.

GORDON, H. R.; MOREL, A. **Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery**. New York: Springer-Verlag, 1983. 114 p.

GRASSHOFF, K. **Methods of seawater analysis**. Hoboken: Wiley, 1976. 600 p. ISBN 9783527295890.

GREGG, W. W.; ROUSSEAU, C. S. Global ocean primary production trends in the modern ocean color satellite record (1998–2015). **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 12, p. 124011, 2019.

GROOM, S.; SATHYENDRANATH, S.; BAN, Y.; BERNARD, S.; BREWIN, R.; BROTHAS, V.; BROCKMANN, C.; CHAUHAN, P.; CHOI, J.; CHUPRIN, A.; CIAVATTA, S.; CIPOLLINI, P.; DONLON, C.; FRANZ, B.; HE, X.; HIRATA, T.; JACKSON, T.; KAMPEL, M.; KRASEMANN, H.; LAVENDER, S.; PARDO-MARTINEZ, S.; MÉLIN, F.; PLATT, T.; SANTOLERI, R.; SKAKALA, J.; SCHAEFFER, B.; SMITH, M.; STEINMETZ, F.; VALENTE, A.; WANG, M. Satellite ocean colour: current status and future perspective. **Frontiers in Marine Science**, v. 6, 2019.

GROETSCH, P. M. M.; GEGER, P.; SIMIS, S. G. H.; ELEVELD, M. A.; PETERS, S. W. M. Validation of a spectral correction procedure for sun and sky reflections in above-water reflectance measurements. **Optics Express**, v. 25, n. 16, p. A742, 2017.

HAËCK, C.; LÉVY, M.; MANGOLTE, I.; BOPP, L. **Satellite data reveal earlier and stronger phytoplankton blooms over fronts in the Gulf Stream region**. [preprint]. Munich: EGU sphere, 2023. 27 p.

HATHAWAY, D. H. **The sunspot cycle: solar cycle prediction**. 2017
Disponível em: <https://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml> . Acesso em: 30 ago. 2019.

HAYS, G.; RICHARDSON, A.; ROBINSON, C. Climate change and marine plankton. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 20, n. 6, p. 337–344, 2005.

HELMS, J. R.; STUBBINS, A.; RITCHIE, J. D.; MINOR, E. C.; KIEBER, D. J.; MOPPER, K. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. **Limnology and Oceanography**, v. 53, n. 3, p. 955–969, 2008.

HENSON, S. A.; COLE, H. S.; HOPKINS, J.; MARTIN, A. P.; YOOL, A. Detection of climate change-driven trends in phytoplankton phenology. **Global Change Biology**, v. 24, n. 1, p. e101–e111, 2018.

HEWSON, I.; PORETSKY, R. S.; DYHRMAN, S. T.; ZIELINSKI, B.; WHITE, A. E.; TRIPP, H. J.; MONTOYA, J. P.; ZEHR, J. P. Microbial community gene expression within colonies of the diazotroph, *Trichodesmium*, from the Southwest Pacific Ocean. **The ISME Journal**, v. 3, n. 11, p. 1286–1300, 2009.

HOOD, R. R. Modeling the distribution of *Trichodesmium* and nitrogen fixation in the Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, n. C6, p. C06006, 2004.

HU, C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 10, p. 2118–2129, 2009.

HU, C.; LEE, Z.; FRANZ, B. Chlorophyll *a* algorithms for oligotrophic oceans: a novel approach based on three-band reflectance difference. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 117, n. C1, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Boletim de informações climáticas: condições climáticas sobre o Brasil durante abril de 2009 e início de maio de 2009**. 2009. Disponível em: http://infoclima1.cptec.inpe.br/~rinfo/pdf_infoclima/200904.pdf. Acesso em: 02 abr. 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **The ocean and cryosphere in a changing climate**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 765 p. ISBN 9781009157964.

INTERNATIONAL OCEAN-COLOUR COORDINATING GROUP (IOCCG). **Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters**. 2000. 140 p. Disponível em: <http://ioccg.org/wp-content/uploads/2015/10/ioccg-report-03.pdf>.

INTERNATIONAL OCEAN-COLOUR COORDINATING GROUP (IOCCG). **Partition of the ocean into ecological provinces: role of ocean-colour radiometry**. 2009. 98 p. Disponível em: <http://ioccg.org/wp-content/uploads/2015/10/ioccg-report-09.pdf>.

INTERNATIONAL OCEAN-COLOUR COORDINATING GROUP (IOCCG). **Phytoplankton functional types from space**. 2014. 156 p. Disponível em: http://ioccg.org/wp-content/uploads/2018/09/ioccg_report_15_2014.pdf.

INTERNATIONAL OCEAN-COLOUR COORDINATING GROUP (IOCCG). **Ocean optics & biogeochemistry protocols for satellite ocean colour sensor validation**. 2018. 17 p. Disponível em: <http://ioccg.org/what-we-do/ioccg-publications/ocean-optics-protocols-satellite-ocean-colour-sensor-validation/>.

INTERNATIONAL OCEAN-COLOUR COORDINATING GROUP (IOCCG). **Current ocean-colour sensors**. 2023. Disponível em: <https://ioccg.org/resources/missions-instruments/current-ocean-colour-sensors/>. Acesso em: 20 fev. 2023.

INTERNATIONAL SATELLITE CLOUD CLIMATOLOGY PROJECT (ISCCP). **INT ISCCP D2 monthly means and climatology**. 2017. Disponível em: <https://isccp.giss.nasa.gov/>. Acesso em: fev. 2023.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment : an earth resource perspective**. London: Pearson, 2014. 614 p. ISBN(1292021705).

JERLOV, N. G. **Optical oceanography**. New York: Elsevier, 1968. 194 p. ISBN 978-0-444-40320-9.

JOHNSON, M. D.; BEAUDOIN, D. J.; LAZA-MARTINEZ, A.; DYHRMAN, S. T.; FENSIN, E.; LIN, S.; MERCULIEF, A.; NAGAI, S.; POMPEU, M.; SETÄLÄ, O.; STOECKER, D. K. The genetic diversity of mesodinium and associated cryptophytes. **Frontiers in Microbiology**, v. 7, p 1-16, 2016.

JOLLIFF, J. K.; LEWIS, M. D.; LADNER, S.; CROUT, R. L. Observing the ocean submesoscale with enhanced-Color GOES-ABI visible band data. **Sensors**, v. 19, n. 18, p. 3900, 2019.

KAMPEL, M. **Estimativa da produção primária e biomassa fitoplanctônica através de sensoriamento remoto da cor do oceano e dados in situ na costa sudeste brasileira**. 2003. 311 p. Tese (Doutorado em Oceanografia Biológica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

KAMPEL, M.; FREITAS, L. B.; DELCOURT, F. T.; CORTIVO, F. D.; VALERIO, L.; ZOFFOLI, M. L.; RUDORFF, N. M. Caracterização e análise ambiental da Bacia de Santos com base no processamento de campos oceânicos superficiais estimados por satélites. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015.

KAMPEL, M.; LORENZZETTI, J. A.; BENTZ, C. M.; RUDORFF, F. M. Análise por wavelets de series temporais de clorofila estimada por satélite na região da bacia de campos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA, 2008, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2008.

KAMPEL, M.; LORENZZETTI, J. A.; SILVA JUNIOR, C. L. Observação por satélite de ressurgências na costa Sul-Sudeste brasileira. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO SOBRE CIÊNCIAS DO MAR, 1997, Santos. **Anais...** Santos, 1997.

KAMPEL, M.; NOVO, E. M. L. M. O sensoriamento remoto da cor da água. In: SOUZA, R. B. (Ed.). **Oceanografia por satélites**. São Paulo: Oficina das Letras, 2005 p. 179-196.

KARP, G. **Cell and molecular biology**. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2008. 944 p.

KEERTHI, M. G.; PREND, C. J.; AUMONT, O.; LÉVY, M. Annual variations in phytoplankton biomass driven by small-scale physical processes. **Nature Geoscience**, v. 15, n. 12, p. 1027–1033, 2022.

KIRK JOHN T. O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 649 p.

KUTSER, T. Quantitative detection of chlorophyll in cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. **Limnology and Oceanography**, v. 49, n. 6, p. 2179–2189, 2004.

KUTSER, T.; VAHTMÄE, E.; PAAVEL, B.; KAUER, T. Removing glint effects from field radiometry data measured in optically complex coastal and inland waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 133, p. 85–89, 2013.

KYEWALYANGA, M. Effect of *Mesodinium rubrum* (= *Myrionecta rubra*) on the action and absorption spectra of phytoplankton in a coastal marine inlet. **Journal of Plankton Research**, v. 24, n. 7, p. 687–702, 2002.

LALIBERTÉ, J.; LAROUCHE, P.; DEVRED, E.; CRAIG, S. Chlorophyll-a concentration retrieval in the optically complex waters of the St. Lawrence Estuary and Gulf using principal component analysis. **Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 265, 2018.

LEÃO, C. **Variabilidade espaço-temporal da concentração de clorofila-a e temperatura da superfície do mar estimadas por satélite na Margem Continental Sudeste Brasileira**. 2008. 136 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008.

LEE, Z.; AHN, Y.-H.; MOBLEY, C.; ARNONE, R. Removal of surface-reflected light for the measurement of remote-sensing reflectance from an above-surface platform. **Optics Express**, v. 18, n. 25, p. 26313, 2010.

LEE, Z.; ARNONE, R.; HU, C.; WERDELL, P. J.; LUBAC, B. Uncertainties of optical parameters and their propagations in an analytical ocean color inversion algorithm. **Applied Optics**, v. 49, n. 3, p. 369, 2010.

LEE, Z.; CARDER, K. L.; ARNONE, R. A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. **Applied Optics**, v. 41, n. 27, p. 5755, 2002.

LETELIER, R. M.; KARL, D. M.; ABBOTT, M. R.; BIDIGARE, R. R. Light driven seasonal patterns of chlorophyll and nitrate in the lower euphotic zone of the North Pacific Subtropical Gyre. **Limnology and Oceanography**, v. 49, n. 2, p. 508–519, 2004.

LI, D. Remote sensing observations of phytoplankton bloom induced by an anti-cyclonic eddy. In:INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2016. **Proceedings...** IEEE, 2016.

LI, H.; HE, X.; BAI, Y.; CHEN, X.; GONG, F.; ZHU, Q.; HU, Z. Assessment of satellite-based chlorophyll-a retrieval algorithms for high solar zenith angle conditions. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 11, n. 1, p. 012004, 2017.

LI, H.; HE, X.; SHANMUGAM, P.; BAI, Y.; WANG, D.; HUANG, H.; ZHU, Q.; GONG, F. Semi-analytical algorithms of ocean color remote sensing under high solar zenith angles. **Optics Express**, v. 27, n. 12, p. A800, 2019.

LIMA, E. C. C. A note on strandings of Bryde's whales (*Balaenoptera edeni*) in the southwestern Atlantic. **IWC Journal of Cetacean Research and Management**, v. 21, n. 1, p. 9–15, 2020.

LIU, F.; TANG, S. A double peak intraseasonal pattern in the chlorophyll concentration associated with Summer upwelling and mesoscale eddies in the western south China Sea. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 127, n. 1, 2022.

LOBANOVA, P.; TILSTONE, G. H.; BASHMACHNIKOV, I.; BROTAS, V. Accuracy assessment of primary production models with and without photoinhibition using ocean-colour climate change initiative data in the North East Atlantic Ocean. **Remote Sensing**, v. 10, n. 7, p. 1116, 2018.

LODI, L.; TARDIN, R. Citizen science contributes to the understanding of the occurrence and distribution of cetaceans in southeastern Brazil: a case study. **Ocean & Coastal Management**, v. 158, p. 45–55, 2018.

LOISEL, H.; LUBAC, B.; DESSAILLY, D.; DUFORET-GAURIER, L.; VANTREPOTTE, V. Effect of inherent optical properties variability on the chlorophyll retrieval from ocean color remote sensing: an in situ approach. **Optics Express**, v. 18, n. 20, p. 20949, 2010.

LOISEL, H.; MANGIN, A.; VANTREPOTTE, V.; DESSAILLY, D.; NGOC DINH, D.; GARNESON, P.; OUIILLON, S.; LEFEBVRE, J.-P.; MÉRIAUX, X.; MINH PHAN, T. Variability of suspended particulate matter concentration in coastal waters under the Mekong's influence from ocean color (MERIS) remote sensing over the last decade. **Remote Sensing of Environment**, v. 150, p. 218–230, 2014.

LOISEL, H.; VANTREPOTTE, V.; JAMET, C.; NGOC DAT, D. Challenges and new advances in ocean color remote sensing of coastal waters. In: ZAMBIANCHI, E. (Ed.). **Topics in oceanography**. London, UK: InTech, 2013. p. 1-37.

LONGHURST, A.; SATHYENDRANATH, S.; PLATT, T.; CAVERHILL, C. An estimate of global primary production in the ocean from satellite radiometer data. **Journal of Plankton Research**, v. 17, n. 6, p. 1245–1271, 1995.

LUTZ, V. A.; SEGURA, V.; DOGLIOTTI, A. I.; GAGLIARDINI, D. A.; BIANCHI, A. A.; BALESTRINI, C. F. Primary production in the Argentine Sea during spring estimated by field and satellite models. **Journal of Plankton Research**, v. 32, n. 2, p. 181–195, 2010.

LUTZ, V. A.; SUBRAMANIAM, A.; NEGRI, R. M.; SILVA, R. I.; CARRETO, J. I. Annual variations in bio-optical properties at the 'Estación Permanente de Estudios Ambientales (EPEA)' coastal station, Argentina. **Continental Shelf Research**, v. 26, n. 10, p. 1093–1112, 2006.

LUZ, L. F. G.; NOERNBERG, M. A. Spectral changing during a massive bloom event of *Dinophysis cf. accuminata* in south Brazil. **Regional Studies in Marine Science**, v. 56, p. 102681, 2022.

MANZAR ABBAS, M.; MELESSE, A. M.; SCINTO, L. J.; REHAGE, J. S. Satellite estimation of chlorophyll-a using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor in shallow coastal water bodies: validation and improvement. **Water**, v. 11, n. 8, p. 1621, 2019.

MARCOLIN, C. R.; GAETA, S.; LOPES, R. M. Seasonal and interannual variability of zooplankton vertical distribution and biomass size spectra off Ubatuba, Brazil. **Journal of Plankton Research**, v. 37, n. 4, p. 808–819, 2015.

MARITORENA, S.; SIEGEL, D. A.; PETERSON, A. R. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. **Applied Optics**, v. 41, n. 15, p. 2705, 2002.

MARQUES, L. V.; SHORT, F. T.; CREED, J. C. Sunspots drive seagrasses. **Biological Rhythm Research**, v. 46, n. 1, p. 63–68, 2015.

MARRARI, M.; PIOLA, A. R.; VALLA, D. Variability and 20-year trends in satellite-derived surface chlorophyll concentrations in large marine ecosystems around south and western Central America. **Frontiers in Marine Science**, v. 4, 2017.

MARTINS, M. A.; PELEGRÍ, J. L. CZCS chlorophyll patterns in the South Atlantic Bight during low vertical stratification conditions. **Continental Shelf Research**, v. 26, n. 4, p. 429–457, 2006.

MARTINS, M. S.; MASSOCATO, T. F.; HORTA, P. A.; BARUFI, J. B. First record of red macroalgae bloom in Southern Atlantic Brazil. **ALGAE**, v. 31, n. 1, p. 33–39, 2016.

MATTHEWS, M. W.; ODERMATT, D. Improved algorithm for routine monitoring of cyanobacteria and eutrophication in inland and near-coastal waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 156, p. 374–382, 2015.

MEARS, C.; LEE, T.; RICCIARDULLI, L.; WANG, X.; WENTZ, F. Improving the accuracy of the Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP) ocean vector winds. **Remote Sensing**, v. 14, n. 17, p. 4230, 2022.

MEDEIROS, T. A. G.; ZOFFOLI, M. L.; FROUIN, R.; CORTIVO, F. D.; CESAR, G. M.; KAMPEL, M. Bio-optical properties of the Brazilian Abrolhos Bank's shallow coral-reef waters. **Frontiers in Remote Sensing**, v. 3, p. 1-24, 2022.

MELER, J.; KOWALCZUK, P.; OSTROWSKA, M.; FICEK, D.; ZABŁOCKA, M.; ZDUN, A. Parameterization of the light absorption properties of chromophoric dissolved organic matter in the Baltic Sea and Pomeranian lakes. **Ocean Science**, v. 12, n. 4, p. 1013–1032, 2016.

MÉLIN, F.; HOEPFFNER, N. Case study 6 monitoring phytoplankton productivity from satellite: an aid to marine resources management. In: MORALES, J.; STUART, V.; PLATT, T.; SATHYENDRANATH, S. (Ed.). **Handbook of satellite remote sensing image interpretation: applications for marine living resources conservation and management (2011)**, EU PRESPO and IOCCG. Dartmouth, Canada: [s.n.], 2011. p. 79–93.

MÉLIN, F.; VANTREPOTTE, V. How optically diverse is the coastal ocean? **Remote Sensing of Environment**, v. 160, p. 235–251, 2015.

MÉLIN, F.; VANTREPOTTE, V.; CHUPRIN, A.; GRANT, M.; JACKSON, T.; SATHYENDRANATH, S. Assessing the fitness-for-purpose of satellite multi-mission ocean color climate data records: a protocol applied to OC-CCI chlorophyll- a data. **Remote Sensing of Environment**, v. 203, p. 139–151, 2017.

MITCHELL, B. G.; KAHRU, M.; WIELAND, J.; STRAMSKA, M.; MUELLER, J. L. Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for discrete water samples. **Ocean Optics Protocols**, v. 4, p. 39–60, 2002.

MOBLEY, C. **Light and water: radiative transfer in natural waters inverse methods for estimating inherent optical properties from radiometric measurements**. 2004. Disponível em: <http://www.oceanopticsbook.info/view/references/publications>.

MOBLEY, C.; BOSS, E.; ROESLER, C. **Ocean optics web book**. 2020. Disponível em: <https://www.oceanopticsbook.info/>. Acesso em: 02 abr. 2020.

MOBLEY, C. D. The optical properties of water. In: BASS, M. (Ed.). **Handbook of optics**. New York: McGraw-Hill, 1995. p. 43.

MOBLEY, C. D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. **Applied Optics**, v. 38, n. 36, p. 7442, 1999.

MÖLLER, O. O.; PIOLA, A. R.; FREITAS, A. C.; CAMPOS, E. J. D. The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf off southeastern South America. **Continental Shelf Research**, v. 28, n. 13, p. 1607–1624, 2008.

MOORE, T. S.; DOWELL, M. D.; BRADT, S.; RUIZ VERDU, A. An optical water type framework for selecting and blending retrievals from bio-optical algorithms in lakes and coastal waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 143, p. 97–111, 2014.

MOREL, A. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (case I waters). **Journal of Geophysical Research**, v. 93, n. C9, p. 10749, 1988.

MOREL, A.; BERTHON, J. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications. **Limnology and Oceanography**, v. 34, n. 8, p. 1545–1562, 1989.

MOREL, A.; HUOT, Y.; GENTILI, B.; WERDELL, P. J.; HOOKER, S. B.; FRANZ, B. A. Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (Case 1) waters in the perspective of a multi-sensor approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 111, n. 1, p. 69–88, 2007.

MOREL, A.; PRIEUR, L. Analysis of variations in ocean color1. **Limnology and Oceanography**, v. 22, n. 4, p. 709–722, 1977.

MUELLER, J. L. Overview of radiometric measurement and data analysis methods. In: MUELLER, J. L.; FARGION, G. S.; McCLAIN, C. R. (Ed.). **Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation**. Greenbelt: NASA, 2003. p. 7-20.

MURAKAMI, H. Ocean color estimation by Himawari-8/AHI. **Proceedings of the SPIE**, v. 9878, 2016.

NARAYANA, S.; CHITRA, J.; TAPASE, S. R.; THAMKE, V.; KARTHICK, P.; RAMESH, CH.; MURTHY, K. N.; RAMASAMY, M.; KODAM, K. M.; MOHANRAJU, R. Toxicity studies of *Trichodesmium erythraeum* (Ehrenberg, 1830) bloom extracts, from Phoenix Bay, Port Blair, Andamans. **Harmful Algae**, v. 40, p. 34–39, 2014.

NEIL, C.; SPYRAKOS, E.; HUNTER, P. D.; TYLER, A. N. A global approach for chlorophyll-a retrieval across optically complex inland waters based on optical water types. **Remote Sensing of Environment**, v. 229, p. 159–178, 2019.

NOERNBERG, M. A.; MIZERKOWSKI, B. D.; MAFRA, L. L.; FREITAS, F. H. Seasonal evolution of particulate and dissolved absorption coefficients in a subtropical estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 244, p. 106907, 2020.

NOERNBERG, M. A.; MIZERKOWSKI, B. D.; PALOSCHI, N. G.; BENTO, J. P. Hydrodynamics and bio-optical assessment of two pristine subtropical estuaries in southern Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 62, n. 4, p. 265–278, 2014.

O'BRIEN, T. D.; LORENZONI, L.; ISENSEE, K.; VALDÉS, L. **What are marine ecological time series telling us about the ocean? a status report**. Paris: IOC-UNESCO, 2017. 296 p.

OLIVEIRA, A. L.; KAMPEL, M. Assessing the effects of the passage of cold fronts on satellite-derived chlorophyll in the south Brazil bight. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2019, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2019.

OLIVEIRA, A. L.; RUDORFF, N.; KAMPEL, M.; SATHYENDRANATH, S.; POMPEU, M.; DETONI, A. M. S.; CESAR, G. M. Phytoplankton assemblages and optical properties in a coastal region of the South Brazil Bight. **Continental Shelf Research**, v. 227, p. 104509, 2021.

OLIVEIRA, E. N.; FERNANDES, A. M.; KAMPEL, M.; CORDEIRO, R. C.; BRANDINI, N.; VINZON, S. B.; GRASSI, R. M.; PINTO, F. N.; FILLIPO, A. M.; PARANHOS, R. Assessment of remotely sensed chlorophyll- a concentration in Guanabara Bay, Brazil. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 026003, 2016.

O'REILLY, J.E.; MARITORENA, S.; SIEGEL, D.; O'BRIEN, M.C.; TOOLE, D.; MITCHELL, B.G.; KAHRU, M.; CHAVEZ, F.P.; STRUTTON, P.; COTA, G.; HOOKER, S. B.; MCCLAIN, C.R.; CARDER, K.L.; MULLER-KARGER, F.; HARDING, L.; MAGNUSON, A.; PHINNEY, D.; MOORE, G.F.; AIKEN, J.; ARRIGO, K.R.; LETELIER, R.; CULVER, M. Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. In: HOOKER, S.B; FIRESTONE, E.R. (Ed.). **SeaWiFS Postlaunch calibration and validation analyses**, Part 3. Greenbelt, Maryland: NASA, Goddard Space Flight Center, 2000. v. 11. p. 9-23. (SeaWiFS Postlaunch Technical Report Series).

O'REILLY, J. E.; MARITORENA, S.; MITCHELL, B. G.; SIEGEL, D. A.; CARDER, K. L.; GARVER, S. A.; KAHRU, M.; MCCLAIN, C. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 103, n. C11, p. 24937–24953, 1998.

O'REILLY, J. E.; WERDELL, P. J. Chlorophyll algorithms for ocean color sensors - OC4, OC5 & OC6. **Remote Sensing of Environment**, v. 229, p. 32–47, 2019.

PALMA, E. D.; MATANO, R. P. Disentangling the upwelling mechanisms of the South Brazil Bight. **Continental Shelf Research**, v. 29, n. 11–12, p. 1525–1534, 2009.

PATTI, B.; GUISANDE, C.; BONANNO, A.; BASILONE, G.; CUTTITTA, A.; MAZZOLA, S. Role of physical forcings and nutrient availability on the control of satellite-based chlorophyll a concentration in the coastal upwelling area of the Sicilian Channel. **Scientia Marina**, v. 74, n. 3, p. 577–588, 2010.

PETERSON, R. G.; STRAMMA, L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. **Progress in Oceanography**, v. 26, n. 1, p. 1–73, 1991.

PODDAR, S.; CHACKO, N.; SWAIN, D. Estimation of chlorophyll-a in northern coastal Bay of Bengal using Landsat-8 OLI and Sentinel-2 MSI sensors. **Frontiers in Marine Science**, v. 6, 2019.

POND, S.; PICKARD, G.L. **Introductory dynamical oceanography**. 2 ed. Oxford: Pergamon Press, 1983. 349p. ISBN 978-0-08-057054-9.

POOLE, H. H.; ATKINS, W. R. G. Photo-electric measurements of submarine illumination throughout the year. **Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom**, v. 16, n. 1, p. 297–324, 1929.

PREISENDORFER, R. W. **Hydrologic optics**. Honolulu: Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratory, 1976.

PRIEUR, L.; SATHYENDRANATH, S. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials. **Limnology and Oceanography**, v. 26, n. 4, p. 671–689, 1981.

REMBAUVILLE, M.; BRIGGS, N.; ARDYNA, M.; UITZ, J.; CATALA, P.; PENKERC'H, C.; POTEAU, A.; CLAUSTRE, H.; BLAIN, S. Plankton assemblage estimated with BGC-argo floats in the Southern Ocean: implications for seasonal successions and particle export. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 122, n. 10, p. 8278–8292, 2017.

RIDELNSKY, M. DA C.; SANTOS, A. R. Produção offshore recordista na Bacia de Santos: cenário atual frente ao controle ambiental. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 4, p. e20211425013, 2022.

ROBINSON, I. S. **Satellite oceanography: an introduction for oceanographers and remote sensing scientists**. Chichester: Ellis Horwood, 1985. 455 p.

ROESLER, C.; UITZ, J.; CLAUSTRE, H.; BOSS, E.; XING, X.; ORGANELLI, E.; BRIGGS, N.; BRICAUD, A.; SCHMECHTIG, C.; POTEAU, A.; D'ORTENZIO, F.; RAS, J.; DRAPEAU, S.; HAËNTJENS, N.; BARBIEUX, M. Recommendations for obtaining unbiased chlorophyll estimates from in situ chlorophyll fluorometers: a global analysis of WET Labs ECO sensors. **Limnology and Oceanography: Methods**, v. 15, n. 6, p. 572–585, 2017.

RÖTTGERS, R.; DOXARAN, D.; DUPOUY, C. Quantitative filter technique measurements of spectral light absorption by aquatic particles using a portable integrating cavity absorption meter (QFT-ICAM). **Optics Express**, v. 24, n. 2, p. A1, 2016.

ROXY, M. K.; MODI, A.; MURTUGUDDE, R.; VALSALA, V.; PANICKAL, S.; PRASANNA KUMAR, S.; RAVICHANDRAN, M.; VICHI, M.; LÉVY, M. A reduction in marine primary productivity driven by rapid warming over the tropical Indian Ocean. **Geophysical Research Letters**, v. 43, n. 2, p. 826–833, 2016.

RUDORFF, F. M.; KAMPEL, M.; GAETA, S. A.; POMPEU, M.; LORENZZETTI, J. A. Comparação de algoritmos empíricos na estimativa da concentração de clorofila-a na região costeira de Ubatuba, litoral norte de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007.

RUDORFF, N. M.; FROUIN, R.; KAMPEL, M.; GOYENS, C.; MERIAUX, X.; SCHIEBER, B.; MITCHELL, B. G. Ocean-color radiometry across the Southern Atlantic and Southeastern Pacific: accuracy and remote sensing implications. **Remote Sensing of Environment**, v. 149, p. 13–32, 2014.

SALGADO-HERNANZ, P. M.; RACAULT, M.-F.; FONT-MUÑOZ, J. S.; BASTERRETXEA, G. Trends in phytoplankton phenology in the Mediterranean Sea based on ocean-colour remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 221, p. 50–64, 2019.

SALMI, T.; MAATTA, A.; ANTTILA, P.; RUOHO-AIROLA, T.; AMNELL, T. **Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates: the excel template application MAKESENS**. [S.I.]: Finnish Meteorological Institute, 2002.

SANTOS, D. D.; GALVANI, E. Caracterização sazonal das precipitações no município de Caraguatatuba-SP, entre os anos de 1943 a 2004: eventos extremos e impactos hidrometeorológicos. **Revista Geonorte**, v. 1, n. 5, p. 1196–1203, 2012.

SANTOS, P. P. G. M. **Influência do campo de ventos e do meandramento da Corrente do Brasil na concentração de clorofila-a e nutrientes ao largo de Ubatuba - SP**. 2016. 81 p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Biológica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SASSI, R.; KUTNER, M. B. B. Variação sazonal do fitoplâncton da região do Saco da Ribeira (Lat. 23°30'S; Long. 45°07'W), Ubatuba, Brasil. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, v. 31, n. 2, p. 29–42, 1982.

SATHYENDRANATH, S.; BREWIN, R. J.; JACKSON, T.; MÉLIN, F.; PLATT, T. Ocean-colour products for climate-change studies: what are their ideal characteristics? **Remote Sensing of Environment**, v. 203, p. 125–138, 2017.

SATHYENDRANATH, S.; PLATT, T.; BREWIN, R. J. W.; JACKSON, T. Primary production distribution. In: COCHRA N, J. K.; BOKUNIEWICZ, H. J., YAGER, P. L. (Ed.). **Encyclopedia of ocean sciences**. Cambridge: Academic Press, 2019. p. 635–640.

SCHALLES, J. F. Optical remote sensing techniques to estimate phytoplankton chlorophyll a concentrations in coastal. In: RICHARDSON, L.; LEDREW, E. (Ed.). **Remote sensing of aquatic coastal ecosystem processes**. Dordrecht: Springer, 2006. p. 27–79.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote sensing, models, and methods for image processing**. London: Academic Press, 2012. 522 p.

SEEGERS, B. N.; STUMPF, R. P.; SCHAEFFER, B. A.; LOFTIN, K. A.; WERDELL, P. J. Performance metrics for the assessment of satellite data products: an ocean color case study. **Optics Express**, v. 26, n. 6, p. 7404, 2018.

SIEGEL, D. A. Colored dissolved organic matter and its influence on the satellite-based characterization of the ocean biosphere. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 20, p. L20605, 2005.

SIGNORINI, S. R.; FRANZ, B. A.; MCCLAIN, C. R. Chlorophyll variability in the oligotrophic gyres: mechanisms, seasonality and trends. **Frontiers in Marine Science**, v. 2, p. 1-11, 2015.

SILVA, G. S. M.; GARCIA, C. A. E. Evaluation of ocean chlorophyll-a remote sensing algorithms using in situ fluorescence data in Southern Brazilian Coastal Waters. **Ocean and Coastal Research**, v. 69, 2021.

SILVA, P. V.; KAMPEL, M.; PAIVA, V. G.; CORTIVO, F. D. Evolução temporal da interação entre a concentração de clorofila- a na superfície do mar e a temperatura da superfície do mar na Plataforma Continental Sudeste Brasileira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2023, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2023.

SILVEIRA, I. C. A.; SCHMIDT, A. C. K.; CAMPOS, E. J. D.; GODOI, S. S. DE; IKEDA, Y. A corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 48, n. 2, p. 171–183, 2000.

SMAYDA, T. J. Adaptive ecology, growth strategies and the global bloom expansion of dinoflagellates. **Journal of Oceanography**, v. 58, n. 2, p. 281–294, 2002.

SPYRAKOS, E.; O'DONNELL, R.; HUNTER, P. D.; MILLER, C.; SCOTT, M.; SIMIS, S. G. H.; NEIL, C.; BARBOSA, C. C. F.; BINDING, C. E.; BRADT, S.; BRESCIANI, M.; DALL'OLMO, G.; GIARDINO, C.; GITELSON, A. A.; KUTSER, T.; LI, L.; MATSUSHITA, B.; MARTINEZ-VICENTE, V.; MATTHEWS, M. W.; OGASHAWARA, I.; RUIZ-VERDÚ, A.; SCHALLES, J. F.; TEBBS, E.; ZHANG, Y.; TYLER, A. N. Optical types of inland and coastal waters. **Limnology and Oceanography**, v. 63, n. 2, p. 846–870, 2018.

STOCK, A.; SUBRAMANIAM, A. Accuracy of empirical satellite algorithms for mapping phytoplankton diagnostic pigments in the open ocean: a supervised learning perspective. **Frontiers in Marine Science**, v. 7, p. 1-19, 2020.

SUBRAMANIAM, A.; CARPENTER, E. J.; KARENTZ, D.; FALKOWSKI, P. G. Bio-optical properties of the marine diazotrophic cyanobacteria *Trichodesmium* spp. I. Absorption and photosynthetic action spectra. **Limnology and Oceanography**, v. 44, n. 3, p. 608–617, 1999.

SZETO, M.; WERDELL, P. J.; MOORE, T. S.; CAMPBELL, J. W. Are the world's oceans optically different? **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 116, n. C7, p. 2011JC007230, 2011.

TASSAN, S.; FERRARI, G. M. A sensitivity analysis of the “Transmittance-Reflectance” method for measuring light absorption by aquatic particles. **Journal of Plankton Research**, v. 24, n. 8, p. 757–774, 2002.

TEIXEIRA, C. Preliminary studies of primary production in the Ubatuba region (Lat. 23°30'S - Long. 45°06'W), Brazil. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, v. 22, p. 49–58, 1973.

TEIXEIRA, C.; TUNDÍSI, J. G. The effects of nitrogen and phosphorus enrichments on phytoplankton in the region of Ubatuba (Lat. 23°30'S - Long. 45°06'W), Brazil. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, v. 30, n. 1, p. 77–86, 1981.

THOMALLA, S. J.; OGUNKOYA, A. G.; VICHI, M.; SWART, S. Using optical sensors on gliders to estimate phytoplankton carbon concentrations and chlorophyll-to-carbon ratios in the southern ocean. **Frontiers in Marine Science**, v. 4, p. 1-19, 2017.

TIBSHIRANI, R.; WALTHER, G.; HASTIE, T. Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)**, v. 63, n. 2, p. 411–423, 2001.

TURNER, K. J.; TZORTZIOU, M.; GRUNERT, B. K.; GOES, J.; SHERMAN, J. Optical classification of an urbanized estuary using hyperspectral remote sensing reflectance. **Optics Express**, v. 30, n. 23, p. 41590, 2022.

UNESCO. **The International system of units (SI) in oceanography : report of IAPSO Working Group on Symbols, Units and Nomenclature in Physical Oceanography (SUN)**. Paris: Viva Rio, 1985. 131 p.

U.S. CENSUS BUREAU. **X-13ARIMA-SEATS reference manual: time series research staff center for statistical research and methodology**. 2017.

Disponível em: <https://www.census.gov/topics/research/stat-research/expertise/ts-seasonal-adj.html> . Acesso em: 15 abr. 2020.

VALENTE, A.; SATHYENDRANATH, S.; BROTHAS, V.; GROOM, S.; GRANT, M.; TABERNER, M.; ANTOINE, D.; ARNONE, R.; BALCH, W. M.; BARKER, K.; BARLOW, R.; BÉLANGER, S.; BERTHON, J.-F.; BEŞİKTEPE, Ş.; BRANDO, V.; CANUTI, E.; CHAVEZ, F.; CLAUSTRE, H.; CROUT, R.; FROUIN, R.; GARCÍA-SOTO, C.; GIBB, S. W.; GOULD, R.; HOOKER, S.; KAHRU, M.; KLEIN, H.; KRATZER, S.; LOISEL, H.; MCKEE, D.; MITCHELL, B. G.; MOISAN, T.; MULLER-KARGER, F.; O'DOWD, L.; ONDRUSEK, M.; POULTON, A. J.; REPECAUD, M.; SMYTH, T.; SOSIK, H. M.; TWARDOWSKI, M.; VOSS, K.; WERDELL, J.; WERNAND, M.; ZIBORDI, G. A compilation of global bio-optical in situ data for ocean-colour satellite applications. **Earth System Science Data**, v. 8, n. 1, p. 235–252, 2016.

VALENTI, D.; DENARO, G.; SPAGNOLO, B.; CONVERSANO, F.; BRUNET, C. How diffusivity, thermocline and incident light intensity modulate the dynamics of deep chlorophyll maximum in tyrrhenian sea. **PLOS ONE**, v. 10, n. 1, p. e0115468, 2015.

VALERIO, A. DE M.; KAMPEL, M.; VANTREPOTTE, V.; WARD, N. D.; RICHEY, J. E. Optical classification of lower Amazon waters based on in situ data and Sentinel-3 ocean and land color instrument imagery. **Remote Sensing**, v. 13, n. 16, p. 3057, 2021.

VALERIO, A. DE M.; KAMPEL, M.; VANTREPOTTE, V.; WARD, N. D.; SAWAKUCHI, H. O.; LESS, D. F. D. S.; NEU, V.; CUNHA, A.; RICHEY, J. Using CDOM optical properties for estimating DOC concentrations and pCO₂ in the Lower Amazon River. **Optics Express**, v. 26, n. 14, p. A657, 2018.

VALÉRIO, L. P. **Análises e estimativas bio-ópticas de dados da estação ANTARES-Ubatuba, litoral norte de São Paulo**. 2013. 186 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013.

VAN HEUKELEM, L.; HOOKER, S. B. The importance of a quality assurance plan for method validation and minimizing uncertainties in the HPLC analysis of phytoplankton pigments. In: ROY, S.; LLEWELLYN, C. A.; EGELAND, E. S.; JOHNSEN, G. (Ed.). **Phytoplankton pigments**. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. p. 195–256.

VANDERMEULEN, R. A.; MANNINO, A.; CRAIG, S. E.; WERDELL, P. J. 150 shades of green: using the full spectrum of remote sensing reflectance to elucidate color shifts in the ocean. **Remote Sensing of Environment**, v. 247, p. 111900, 2020.

VANTREPOTTE, V.; DANHIEZ, F.-P.; LOISEL, H.; OUILLON, S.; MÉRIAUX, X.; CAUVIN, A.; DESSAILLY, D. CDOM-DOC relationship in contrasted coastal waters: implication for DOC retrieval from ocean color remote sensing observation. **Optics Express**, v. 23, n. 1, p. 33, 2015.

VANTREPOTTE, V.; LOISEL, H.; DESSAILLY, D.; MÉRIAUX, X. Optical classification of contrasted coastal waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 123, p. 306–323, 2012.

VANTREPOTTE, V.; MÉLIN, F. Temporal variability of 10-year global SeaWiFS time-series of phytoplankton chlorophyll a concentration. **ICES Journal of Marine Science**, v. 66, n. 7, p. 1547–1556, 2009.

VANTREPOTTE, V.; MÉLIN, F. Inter-annual variations in the SeaWiFS global chlorophyll a concentration (1997–2007). **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 58, n. 4, p. 429–441, 2011.

VASCONCELLOS, M.; GASALLA, M. A. Fisheries catches and the carrying capacity of marine ecosystems in southern Brazil. **Fisheries Research**, v. 50, n. 3, p. 279–295, 2001.

VERMOTE, E. F.; EL SALEOUS, N.; JUSTICE, C. O.; KAUFMAN, Y. J.; PRIVETTE, J. L.; REMER, L.; ROGER, J. C.; TANRÉ, D. Atmospheric correction of visible to middle-infrared EOS-MODIS data over land surfaces: Background, operational algorithm and validation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 102, n. D14, p. 17131–17141, 1997.

VIANNA, L. F. N.; DE SOUZA, R. V.; SCHRAMM, M. A.; ALVES, T. P. Using climate reanalysis and remote sensing-derived data to create the basis for predicting the occurrence of algal blooms, harmful algal blooms and toxic events in Santa Catarina, Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 880, p. 163086, 2023.

WANG, Y.; LIU, Y.; CHEN, X.; CUI, Z.; QU, K.; WEI, Y. Exploring the key factors affecting the seasonal variation of phytoplankton in the coastal Yellow Sea. **Frontiers in Marine Science**, v. 9, p. 1-13, 2022.

WATANABE, F.; MISHRA, D. R.; ASTUTI, I.; RODRIGUES, T.; ALCÂNTARA, E.; IMAI, N. N.; BARBOSA, C. Parametrization and calibration of a quasi-analytical algorithm for tropical eutrophic waters. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 121, p. 28–47, 2016.

WEI, J.; LEE, Z.; SHANG, S. A system to measure the data quality of spectral remote sensing reflectance of aquatic environments. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, 2016.

WELSCHMEYER, N. A. Fluorometric analysis of chlorophyll a in the presence of chlorophyll b and pheopigments. **Limnology and Oceanography**, v. 39, n. 8, p. 1985–1992, 1994.

WERDELL, P. J.; BAILEY, S. W. An improved in-situ bio-optical data set for ocean color algorithm development and satellite data product validation. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, n. 1, p. 122–140, 2005.

WHITE, A. E.; SPITZ, Y. H.; LETELIER, R. M. What factors are driving summer phytoplankton blooms in the North Pacific Subtropical Gyre? **Journal of Geophysical Research**, v. 112, n. C12, p. C12006, 2007.

YU, Y.; XING, X.; LIU, H.; YUAN, Y.; WANG, Y.; CHAI, F. The variability of chlorophyll-a and its relationship with dynamic factors in the basin of the South China Sea. **Journal of Marine Systems**, v. 200, p. 103230, 2019.

ZHAO, X.; LIU, R.; MA, Y.; XIAO, Y.; DING, J.; LIU, J.; WANG, Q. Red tide detection method for HY-1D coastal zone imager based on U-Net convolutional neural network. **Remote Sensing**, v. 14, n. 1, p. 88, 2021.

ZHENG, G.; TANG, D. Offshore and nearshore chlorophyll increases induced by typhoon winds and subsequent terrestrial rainwater runoff. **Marine Ecology Progress Series**, v. 333, p. 61–74, 2007.

ZIBORDI, G.; HOLBEN, B.; HOOKER, S. B.; MÉLIN, F.; BERTHON, J.-F.; SLUTSKER, I.; GILES, D.; VANDEMARK, D.; FENG, H.; RUTLEDGE, K.; SCHUSTER, G.; AL MANDOOS, A. A network for standardized ocean color validation measurements. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 87, n. 30, p. 293, 2006.

ZOFFOLI, M. L. **Analysis of the potential of in situ hyperspectral optical data and high spatial resolution satellite imagery to map bottom types in the Abrolhos Coral Reef Bank (Brazil)**. 2014. 213 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014.