

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Lorena Braga Quintella Jucá

**Avaliação de métodos de correção atmosférica para Sentinel-2 em um sistema estuarino-
lagunar tropical**

Maceió

2020

Lorena Braga Quintella Jucá

Avaliação de métodos de correção atmosférica para Sentinel-2 em um sistema estuarino-lagunar tropical

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Maceió

2020

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos - CRB-4 - 2062

J91a Jucá, Lorena Braga Quintella.
Avaliação de métodos de correção atmosférica para Sentinel-2 em um sistema estuarino-lagunar tropical / Lorena Braga Quintella Jucá. – 2020.
89 f. il. : figs. ; grafs. ; tabs. color.

Orientador: Carlos Ruberto Fragoso Junior.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2020.

Bibliografia: f. 74-81.
Apêndices: f. 82-89.

1.Sensoriamento remoto. 2. Sentinel-2. 3. Qualidade da água. 4. Estuário. 5
Complexo lagunar Mundaú/Manguaba/AL. I. Título.

CDU: 528.8:556.5

DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

FORMULÁRIO DE REGISTRO DE NOTAS

Título:	Avaliação de métodos de correção atmosférica para Sentinel-2 em um sistema estuarino lagunar tropical
Discente:	Lorena Braga Quintella Jucá
Orientador(a):	Carlos Ruberto Fragoso Junior
Coorientador(a):	
Data:	06/02/2020
Horário:	
Local:	Sala multiuso do PPGRHS
Banca examinadora:	Carlos Ruberto F. Junior (Orientador - CTEC/UFAL) E1 – Regina Camara Lins (CTEC/UFAL) E2 – Amesson Marques da Costa (CTEC/UFAL)

Parecer:

Deverão ser dadas notas ao trabalho (de zero a 10) considerando o desempenho do(a) discente nas 3 áreas apresentadas no quadro abaixo

Conteúdo do Trabalho	Apresentação da Escrita do Trabalho	Apresentação Oral e Arguição do Trabalho
CT	AET	AOT

A nota final por avaliador, denominada **NFA**, será calculada da seguinte forma:

$$NFA = (0,6 \times CT + 0,2 \times AET + 0,2 \times AOT)$$

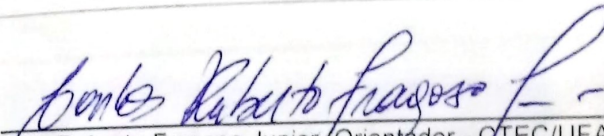
$$E1: NFA = (0,6 \times \underline{10,0} + 0,2 \times \underline{9,5} + 0,2 \times \underline{10,0}) = \underline{9,9}$$

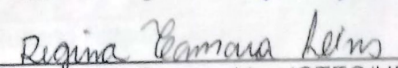
$$E2: NFA = (0,6 \times \underline{10,0} + 0,2 \times \underline{9,5} + 0,2 \times \underline{10,0}) = \underline{9,9}$$

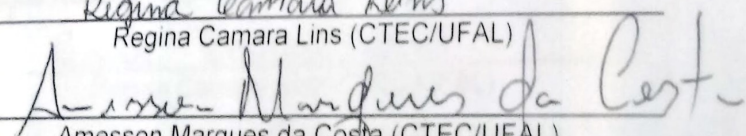
A nota final obtida pelo(a) discente, denominada **NF**, será a média aritmética das notas dos avaliadores:

$$NF = \underline{9,9}$$

Assinaturas:


 Carlos Ruberto Fragoso Junior (Orientador - CTEC/UFAL)


 Regina Camara Lins (CTEC/UFAL)


 Amesson Marques da Costa (CTEC/UFAL)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, que sempre prezaram por uma boa educação e sempre se mostraram disponíveis para me escutar em qualquer circunstância, seja no início do projeto de pesquisa ou ao longo do desenvolvimento do TCC - mesmo sem estarem por dentro do tema sensoramento remoto, com seus termos pra lá de específicos— sempre tentando me ajudar da maneira que podiam, e sempre tão presentes.

Aos meus irmãos, com os quais não convivo mais todos os dias mas sempre estiveram a par das novidades do meu cotidiano de idas à longínqua Ufal!

Agradeço ao meu orientador, prof. Dr. Carlos Ruberto, com quem aprendi a me interessar pela área da limnologia e pude estudar a qualidade da água numa abordagem diferenciada, desde a disciplina de Sistemas Estuarinos Costeiros até o PIBIC e posterior TCC.

Ao Amesson e à Regina pela oportunidade de discutir sobre os temas pertinentes ao TCC e disposição para tirar dúvidas, incluindo as contribuições no plano de trabalho.

Ao meu namorado, Artur, com quem podia contar a qualquer momento, seja para conversar, discutir sobre o tema de TCC ou dar aquele apoio moral de sempre!

À Quitéria, com quem pude conversar e conviver praticamente todos os dias da minha vida, e assim continua, sempre paciente e muito companheira.

Ao Rafael Matias, por me ambientar à temática de sensoramento remoto desde o PIBIC; ao Hugo Farias, pelas sugestões para meus gráficos do TCC e pelo Marllus, pelas dúvidas tiradas de estatística.

A todas as pessoas que contribuíram de alguma maneira para expandir meus conhecimentos ao longo do curso ou para me inspirar, em especial a Heloisa, a Ana Letícia, o Nicolas, a Isabella, a Fernanda e o Loran.

Aos meus amigos e colegas do estágio na Gerência de Controle Ambiental da CASAL, pelas conversas cotidianas e pela oportunidade de trabalhar na prática com a regularização das SAAs e SES do Estado perante os órgãos ambientais, permitindo uma integração de vários conhecimentos.

Ao PET Engenharia Ambiental, por ter sido palco para tamanho crescimento pessoal por três anos, além de motivação para o exercício da pesquisa e para buscar a excelência profissional e acadêmica.

Por último, à Universidade Federal de Alagoas, pela oportunidade do contato com o ensino público de qualidade.

RESUMO

Ecossistemas aquáticos continentais são passíveis de pressões ambientais naturais e antrópicas. O entendimento das consequências dessas pressões nestes ambientes é limitado pela ausência de dados de qualidade de água consistentes, medidos sistematicamente e numa resolução temporal e espacial suficientes. A realização de medições *in situ* se mostram cada vez mais desafiadoras, tendo em vista as interações complexas entre processos físicos, biológicos e químicos nesses ambientes, além de dificuldades como difícil acesso à área monitorada e custos para realização das idas a campo e análises em laboratório. O sensoriamento remoto se mostra, assim, uma ferramenta útil para um monitoramento contínuo e de grande abrangência espacial. A missão Sentinel-2, com seus sensores multiespectrais, apresenta características radiométricas e espectrais adequadas para aplicações ópticas em águas continentais, ambientes de transição e oceanos. Somando-se à resolução espacial de 10, 20 e 60 m e resolução temporal de 5 dias no equador, essas características são favoráveis para o monitoramento da qualidade de água de ecossistemas aquáticos continentais como, por exemplo, o Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM), situado no estado de Alagoas, que recebe aporte de fontes de poluição como efluentes sanitários e da atividade sucroalcooleira. Percebe-se uma lacuna na avaliação de métodos de correção atmosférica em sistemas estuarinos tropicais, sobretudo com um sensor de alta resolução espacial, dotado de bandas espectrais estratégicas para uso em modelos bio-ópticos e com perspectiva de continuidade nos próximos anos. Como os sensores multiespectrais da missão têm forte influência de espalhamentos atmosféricos causados por gases e aerossóis, reflexão especular na superfície, efeitos de adjacência e outros, a radiância, parâmetro medido pelos sensores, necessita ser corrigida. Portanto, este trabalho propõe avaliar a performance de diferentes algoritmos de correção atmosférica de imagens da Missão Sentinel-2 aplicados a um sistema estuarino-lagunar tropical, neste caso o CELMM. Na laguna Manguaba, constatou-se melhor desempenho do iCOR e Sen2Cor de uma maneira geral, ainda que tenham sofrido de efeitos de adjacência provocados por nuvens. Para a laguna Mundaú, os métodos de correção mostraram grande variabilidade entre os valores de R^2 e grandes divergências da assinatura espectral da coluna d'água. Sobre o CELMM avaliado na forma de medianas, de forma geral iCOR mostrou melhor correlação com as medições *in situ*. A alta cobertura de nuvens na região dificultou a aplicação dos algoritmos, seja prejudicando a remoção de aerossóis ou provocando espalhamento próprio, além das características de uso e ocupação do solo em torno do CELMM que provocaram diferenças no desempenho dos algoritmos entre as lagunas Manguaba e Mundaú.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto. Qualidade da água. CELMM.

ABSTRACT

Continental aquatic ecosystems are subject to natural and anthropogenic environmental pressures. The understanding of the consequences of these pressures on those environments is limited by the absence of consistent water quality data, measured systematically and at sufficient temporal and spatial resolutions. Execution of in situ measurements are proving to be increasingly challenging considering complex interactions among physical, biological and chemical processes on these environments, aside from other adversities such as difficult access to the monitored area and costs for field campaigns and laboratory analysis. Thus, remote sensing proves to be a useful tool for continuous and wide-ranging monitoring. Sentinel-2 mission, with its multispectral sensors, has radiometric and spectral characteristics suitable for optical applications on inland waters, transition environments and oceans. In addition to the spatial resolution of 10, 20 and 60 m and temporal resolution of 5 days at the equator, these characteristics are favorable to water quality monitoring of continental aquatic ecosystems such as Mundaú-Manguaba Estuarine-Lagoon System (MMELS), located at the state of Alagoas, which receives input from pollution sources such as sanitary effluents and from sugarcane industry. A gap is noticeable in the evaluation of atmospheric correction methods on tropical estuarine systems, especially using a sensor equipped with high spatial resolution and strategic spectral bands for use in bio-optical models and with a perspective of continuity for the next years. As the mission's multispectral sensors undergo strong influence of atmospheric scattering caused by gases and aerosols, specular reflection, adjacency effects and others, radiance, a parameter which is measured by sensors, needs to be corrected. Therefore, this work proposes to evaluate the performance of different algorithms for atmospheric correction of images from the Sentinel-2 Mission applied to a tropical estuarine-lagoon system, in this case, MMELS. On Manguaba lagoon, iCOR and Sen2Cor performed better in general, despite undergoing adjacency effects caused by clouds. For the Mundaú lagoon, the correction methods showed great variability among R^2 values and big discrepancies from water column spectral signature. Regarding MMELS evaluated in terms of median values, in general iCOR has showed better general correlation considering in situ measurements. High cloud coverage on the region made it difficult to apply the algorithms, either undermining aerosol removal or causing scattering itself, in addition to the characteristics of land use and occupation around MMELS, which lead to differences in the performance of the algorithms between the Manguaba and Mundaú lagoons.

Keywords: Remote sensing. Water quality. MMELS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Diagrama esquemático das contribuições da radiação ascendente.....	18
Figura 2- Trajetória da luz entre o sol, o corpo d'água e o sensor orbital. (1) Processo de espalhamento atmosférico; 2) Processo de processo de reflexão especular da luz difusa do céu, (3) processo de reflexão especular da luz solar direta, (4) radiação emergente da coluna d'água, (5) processo de espalhamento e absorção da luz por fitoplâncton, (6) processo de espalhamento da luz por sedimentos, (7) processo de absorção da luz por matéria orgânica dissolvida.....	19
Figura 3- Fluxograma das etapas do Trabalho de Conclusão de Curso.	22
Figura 4- Mapa da área de estudo com os pontos onde houve campanhas	24
Figura 5 – Radiômetros hiperespectrais TriOS RAMSES	25
Figura 6– Ilustração dos sensores radiométricos utilizados nas campanhas no CELMM.	26
Figura 7- Curvas da Função de Resposta Espectral dos sensores multiespectrais dos satélites S2A e S2B para o espectro do visível e NIR.....	27
Figura 8- Exemplo de gráfico de reflectância em função do comprimento de onda em que os sensores hiperespectrais TriOS RAMSES operam.....	27
Figura 9 – Recorte do portal <i>Copernicus Open Access Hub</i> para escolha da imagem. Em (a), busca da cena e da data de captura. Em (b), produtos 1C retornados como resultados.	30
Figura 10- Fluxograma representando o processamento de uma imagem do nível 1C para o nível 2A pela ferramenta Sen2Cor	33
Figura 11- Exemplo de mapa de classificação de cena criado após processamento de imagem do MSI pelo Sen2Cor com auxílio do software SNAP/ESA, acompanhado das frequências de aparecimento dos constituintes da imagem. A data de sensoriamento neste caso foi 19 de março de 2018	34
Figura 12- Janela de execução do complemento Sen2Cor com as configurações aplicadas neste trabalho. Na aba I/O Parameters, foi previamente inserido o arquivo de extensão .xml correspondente aos metadados da imagem bruta do MSI, que será processada pelo Sen2Cor. O arquivo de configuração pode ser visualizado no APÊNDICE A.	37
Figura 13- Componentes de radiação levados em conta pelo modelo ATCOR3, usado no módulo de CA do Sen2Cor.....	38
Figura 14- Metodologia do iCOR de inversão - nível 1C (TOA) para nível 2A (superfície da água)	39
Figura 15- Janela de execução do complemento iCOR com as configurações aplicadas neste trabalho. Na aba I/O Parameters, foi previamente inserido o arquivo de extensão .xml	

correspondente à imagem bruta do MSI, que foi processada pelo iCOR. O arquivo de configuração pode ser visualizado no APÊNDICE B	41
Figura 16- Janela de execução do complemento C2RCC com as configurações aplicadas neste trabalho. Na aba I/O Parameters, foi previamente inserido o arquivo de extensão .xml correspondente à imagem bruta do MSI, que foi processada pelo iCOR. O arquivo de configuração pode ser visualizado no APÊNDICE C.	43
Figura 17- Fluxograma da aplicação de modelos de bandas adaptados ao MSI	48
Figura 18- Fluxograma da abordagem da discussão	48
Figura 19- Curvas espectrais registradas <i>in situ</i> ao longo da Manguaba: (a) reflectâncias na resolução espectral dos radiômetros usados (todos os pontos onde houve campanhas) e (b) reflectâncias nas bandas simuladas do MSI (pontos considerados para validação)	50
Figura 20 - Curvas espectrais de reflectância de satélite sobre a Manguaba para cada um dos algoritmos testados: (a) iCOR, (b) Sen2Cor e (c) C2RCC. Os gráficos são do tipo Reflectância de sensoriamento remoto <i>versus</i> comprimento de onda.....	51
Figura 21- Curvas espectrais extraídas do MSI sem correções (Topo-da-Atmosfera) para a Manguaba	52
Figura 22- Métricas usadas na avaliação do desempenho dos algoritmos de CA para a Manguaba.	53
Figura 23- Métricas usadas na avaliação do desempenho dos algoritmos de CA para a Mundaú	55
Figura 24- Curvas espectrais registradas <i>in situ</i> ao longo da Mundaú: (a) reflectâncias na resolução espectral dos radiômetros usados (todos os pontos onde houve campanhas) e (b) reflectâncias nas bandas simuladas do MSI (pontos considerados para validação)	56
Figura 25- Curvas espectrais extraídas do MSI sem correções (Topo-da-Atmosfera) para a Mundaú.....	57
Figura 26 - Curvas espectrais de reflectância de satélite sobre a Mundaú para cada um dos algoritmos testados: (a) iCOR, (b) Sen2Cor e (c) C2RCC. Os gráficos são do tipo Reflectância de sensoriamento remoto <i>versus</i> comprimento de onda.....	58
Figura 27- Correlação entre Rrs de satélite: com Sen2Cor <i>versus</i> iCOR.....	62
Figura 28- Curvas espectrais de reflectância de satélite para cada um dos algoritmos testados: (a) iCOR, (b) Sen2Cor e (c) C2RCC. Os gráficos são do tipo Reflectância de sensoriamento remoto <i>versus</i> comprimento de onda.....	64

Figura 29- Gráfico de <i>bias</i> para cada um dos algoritmos aplicados nos pontos do CELMM. O <i>bias</i> indica se o método aplicado subestimou ou superestimou a reflectância da água.....	65
Figura 30- Em (a), correlações entre as séries de medianas de cada uma das bandas do MSI; em (b), uma comparação entre os coeficientes de determinação resultantes; em (c), gráfico da mediana de cada banda de satélite (reflectância processada)	67
Figura 31- Métricas usadas na avaliação do desempenho dos algoritmos de CA para o CELMM	67
Figura 32- Coeficientes de determinação (R^2) oriundos da correlação entre Razão NIR-red de satélite \times Razão NIR-Red simulada (<i>in situ</i>). As linhas de cores distintas representam o corpo d'água em questão. Em (a) modelo R_{rs704}/R_{rs665} ; em (b) modelo $(R_{665}^{-1} - R_{705}^{-1}) \times R_{740}$;	68
Figura 33- Coeficientes de determinação (R^2) oriundos da correlação entre Razão NIR-Red de satélite \times Razão NIR-Red simulada (<i>in situ</i>). As linhas de cores distintas representam os métodos de CA que renderam as reflectâncias corrigidas dos pontos da Manguaba.....	69
Figura 34- Coeficientes de determinação (R^2) oriundos da correlação entre Razão NIR-Red de satélite \times Razão NIR-Red simulada (<i>in situ</i>). As linhas de cores distintas representam os métodos de CA que renderam as reflectâncias corrigidas dos pontos da Mundaú.....	70
Figura 35- Coeficientes de determinação (R^2) oriundos da correlação entre Razão NIR-Red de satélite \times Razão NIR-Red simulada (<i>in situ</i>). As linhas de cores distintas representam os métodos de CA que renderam as reflectâncias corrigidas dos pontos do CELMM (Mundaú+Manguaba).....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Respostas espectrais medidas para cada banda do Instrumento Multiespectral (MSI) a bordo dos satélites Sentinel-2A e 2B	16
Tabela 2 – Datas em que foram feitas campanhas de medição nas lagunas Mundaú e Manguaba	25
Tabela 3 – Campanhas efetuadas juntamente com a quantidade de pontos visitados e os que foram efetivamente considerados na validação (após controle de qualidade).....	46
Tabela 4 - Coeficientes de determinação (R^2) entre Rrs de satélite e Rrs <i>in situ</i> simulada (Manguaba). Os realces indicam os valores para os quais o Valor-p<0,05 (maior significância estatística)	53
Tabela 5 - Coeficientes de determinação (R^2) entre Rrs de satélite e Rrs <i>in situ</i> simulada (Mundaú). Os realces indicam os valores para os quais o Valor-p<0,05 (maior significância estatística)	54
Tabela 6 - Performance estimada da razão sinal-ruído (SNR) para Sentinel-2A e 2B na radiância de referência.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AOT	<i>Aerosol Optical Thickness</i> (Carga Óptica do Aerossol)
C2RCC	<i>Case 2 Regional Coast Colour processor</i>
CA	Correção Atmosférica
CDOM	<i>Colored Dissolved Organic Matter</i> (Matéria Orgânica Dissolvida Colorida)
CELMM	Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba
Chl-a	Clorofila-a
COA	Componente Opticamente Ativo
CZCS	<i>Coastal Zone Color Scanner</i>
DDV	<i>Dark Dense Vegetation</i>
ESA	European Space Agency (Agência Espacial Europeia)
FRE	Função de Resposta Espectral
iCOR	<i>Image Correction for Atmospheric Effects</i>
IOP	<i>Inherent Optical Property</i> (Propriedade Óptica Inerente)
MSI	<i>Multispectral Instrument</i> (Instrumento Multiespectral dos satélites Sentinel-2)
NAP	<i>Non-algal Particles</i> (Partículas não-algais)
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço)
NIR	<i>Near Infrared</i> (Infravermelho Próximo)
OLCI	<i>Ocean and Land Colour Instrument</i>
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i> (Raiz do Erro Médio Quadrático)
Rrs	<i>Remote Sensing Reflectance</i> (Reflectância de Sensoriamento Remoto)
Sen2Cor	<i>Sentinel-2 Correction processor</i>
SIMEC	<i>SIMilarity Environment Correction</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> (Razão Sinal-Ruído)
SST	Sólidos Suspensos Totais
SWIR	<i>Short-Wave Infrared</i> (Infravermelho de Ondas Curtas)
TOA	<i>Top-of-Atmosphere</i> (Topo da Atmosfera)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	OBJETIVOS.....	10
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1	Origem dos componentes opticamente ativos na água.....	11
3.2	Uso de satélites para monitoramento da qualidade da água.....	12
3.3	Sobre a missão imageadora Sentinel-2.....	15
3.4	Correção atmosférica.....	17
3.4.1	Breve histórico.....	17
3.4.2	A teoria da transferência radiativa.....	17
3.4.3	Algoritmos de correção atmosférica.....	18
4	METODOLOGIA.....	21
4.1	Definição da área de estudo.....	22
4.2	Coleta de dados em campo.....	23
4.3	Cálculo de reflectância e seleção dos valores válidos.....	25
4.4	Simulação de bandas do MSI.....	26
4.5	Obtenção de imagens Sentinel-2.....	28
4.6	Processamento de algoritmos de correção atmosférica nas imagens.....	32
4.6.1	Sentinel-2 Correction processor – Sen2Cor.....	32
4.6.2	Image Correction for Atmospheric Effects -iCOR.....	39
4.6.3	Case 2 Regional CoastColour processor – C2RCC.....	41
4.7	Validação dos algoritmos de correção atmosférica.....	44
4.7.1	Extração dos valores de reflectância.....	44
4.7.2	Distinção de pixels válidos.....	44
4.7.3	Correlação entre Rrs de satélite e Rrs simulada.....	46
4.7.4	Aplicação de modelos de razão de bandas adaptados ao MSI.....	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48

5.1	Validação da reflectância de sensoriamento remoto de satélite	48
5.2	Aplicação de modelos de razão de bandas adaptados ao MSI.....	68
6	CONCLUSÕES.....	72
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICE A	82
	APÊNDICE B.....	83
	APÊNDICE C.....	84
	APÊNDICE D	85
	APÊNDICE E.....	88

1 INTRODUÇÃO

Ambientes estuarinos costeiros representam o principal meio de transporte de nutrientes do continente para o oceano (DAGG *et al.*, 2004). Suas águas superficiais estão, assim, sujeitas a pressões ambientais naturais e antrópicas. O entendimento das consequências dessas pressões é limitado pela ausência de dados consistentes medidos sistematicamente e numa resolução temporal e espacial suficientes. Além disso, as interações complexas entre processos físicos, biológicos e químicos nesses ambientes fazem com que a realização de medições *in situ* sejam cada vez mais desafiadoras (TYLER *et al.*, 2016). Os métodos convencionais para a determinação de parâmetros de qualidade da água possuem restrições (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019), como:

- a) custo e tempo requeridos para idas a campo no intuito de coletar dados;
- b) custo e tempo para a realização das análises em laboratório;
- c) as variações espaço-temporais nem sempre são registradas em amostras pontuais coletadas;
- d) o monitoramento contínuo é inviável em regiões remotas ou de difícil acesso.

Nesse sentido, o sensoriamento remoto a partir de satélites pode ser utilizado como uma alternativa ao monitoramento contínuo frente a essas dificuldades (e.g. ANSPER; ALIKAS, 2019; BROCKMANN *et al.*, 2016; MOSES *et al.*, 2009; PAHLEVAN *et al.*, 2017; TYLER *et al.*, 2016).

Existem diversas variáveis passíveis de serem monitoradas por sensoriamento remoto, uma vez que interagem com a radiação eletromagnética e modificam as propriedades ópticas da coluna d'água (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019) sendo assim chamadas Componentes Ópticamente Ativos (COAs) da água. Dentre elas, podemos citar:

- a) a concentração de clorofila-a (Chl-a), como indicador da biomassa fitoplanctônica e do estado trófico dos sistemas;
- b) a absorção pela matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM), que é a fração da matéria orgânica dissolvida contida na coluna d'água que interage com a radiação eletromagnética;
- c) e a concentração total do material em suspensão (sólidos suspensos totais - SST), que inclui tanto material orgânico quanto inorgânico, sendo importante na avaliação da qualidade da água para consumo humano, além de ser um indicador da disponibilidade de luz na coluna d'água.

Reflectância espectral é uma propriedade inerente a um objeto e independe de localização, tempo, intensidade da luz incidente e condições atmosféricas (PEDDLE *et al.*, 2001). A reflectância armazena informações espectrais provindas da interação da radiação eletromagnética com os constituintes da coluna d'água (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019, p. 20) e, por isso, é uma variável importante no estudo desses componentes.

Quando um fóton de luz interage com a matéria, pode haver sua destruição através da absorção - conversão dessa energia a calor ou uma ligação química – ou espalhamento – mudança de direção e/ou energia. Podem ser expressas em forma de propriedades ópticas inerentes (IOPs – *Inherent Optical Properties*), que dependem apenas da coluna d'água e não levam em conta fontes de luz externas, ou de propriedades ópticas aparentes (AOPs – *Apparent Optical Properties*), que dependem tanto das condições do corpo d'água quanto do vento, estação do ano e outras condições ambientais (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019; MUELLER *et al.*, 2000; OLMANSON; BREZONIK; BAUER, 2015). A teoria da transferência radiativa faz a conexão entre as propriedades ópticas inerentes, bem como as condições ambientais de um sistema aquático, e as AOPs do corpo d'água (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019).

O espalhamento e absorção de moléculas e aerossóis presentes na atmosfera modificam a reflectância pura originária do objeto-alvo (DE KEUKELAERE *et al.*, 2018, p. 525), gerando uma necessidade de correção atmosférica (CA) da imagem captada pelo sensor orbital para viabilizar sua aplicação no monitoramento ambiental. Devido a essa demanda, foram desenvolvidos modelos de CA que focam em águas continentais, costeiras e oceânicas, que necessitam de validação. As validações são geralmente feitas para águas costeiras e há poucos registros na literatura recente de casos de validação em águas interiores (DOXANI *et al.*, 2018; PEREIRA-SANDOVAL *et al.*, 2019).

Embora haja satélites com sensores de média resolução espacial disponíveis como alternativa para as aplicações em recursos naturais, como por exemplo o sensor MUX presente no satélite brasileiro CBERS-4, suas desvantagens são a baixa resolução temporal e radiométrica (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019, p. 122), o que desfavorece seu uso para o monitoramento de qualidade da água.

O sensor OLI já foi utilizado em muitos estudos de qualidade de águas (e.g. ILORI; PAHLEVAN; KNUDBY, 2019; KUHN *et al.*, 2019; MACIEL, 2019) contudo a missão imageadora Sentinel-2, da Agência Espacial Europeia, possui uma Função de Resposta

Espectral (FRE) tal que o sensor registra mais bandas espectrais na região do infravermelho próximo (D'ODORICO *et al.*, 2013) comparado a esse sensor. O MSI (Instrumento Multiespectral), que é o sensor presente nos satélites Sentinel-2, possui 13 bandas que abrangem a faixa do visível (VIS), do Infravermelho Próximo (NIR) e do infravermelho de ondas curtas (SWIR) em resoluções de 10, 20 e 60 metros, incluindo uma banda importante na estimativa de Chl-a em corpos d'água continentais produtivos, a de 705 nm (GITELSON; MERZLYAK; LICHTENTHALER, 1996; MITTENZWEY *et al.*, 1992), situada no chamado *red edge*. Além disso, o MSI conta com uma banda - B10 - cujo papel na correção atmosférica é detectar nuvens cirros, que são parcialmente transparentes e, portanto, de difícil detecção por parte de sensores multiespectrais de banda larga (MULLER-WILM *et al.*, 2013).

Tendo em vista que as águas continentais e costeiras abrigam grande biodiversidade, são as principais fontes de água de abastecimento e ainda são utilizadas para diversas atividades socioeconômicas, é crescente o interesse pela avaliação de diferentes métodos de CA sobre produtos de satélites no monitoramento de recursos hídricos (PEREIRA-SANDOVAL *et al.*, 2019). Uma lacuna existente no âmbito do monitoramento de qualidade de água está na avaliação de diferentes metodologias de CA em ambientes estuarinos tropicais, sobretudo com a utilização do Sentinel-2. Uma vez identificada a necessidade de correção do efeito de variáveis atmosféricas em imagens de satélite, foi feita uma avaliação da aplicação de diferentes métodos sobre as águas de um sistema estuarino-lagunar tropical.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a performance de diferentes algoritmos de correção atmosférica (CA) de imagens da Missão Sentinel-2 aplicados a um sistema estuarino lagunar tropical, neste caso o Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM).

Os objetivos específicos são:

- a) Obter imagens do CELMM que tenham passado por diferentes métodos de correção atmosférica e discutir os principais fatores que tornaram um ou mais métodos representativo(s) do comportamento óptico do Complexo levando em consideração as medições realizadas *in situ*;
- b) Ampliar a compreensão acerca da influência das variáveis atmosféricas na estimativa de reflectância de sensoriamento remoto (Rrs) através da missão Sentinel-2;
- c) Entender como a configuração orbital desses satélites influencia na estimativa de reflectância.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Origem dos componentes opticamente ativos na água

Toda água que ocorre naturalmente contém outras substâncias. Como já mencionado, aquelas que interferem nas propriedades ópticas da coluna d'água podem ser chamadas de componentes opticamente ativos. Alguns dos mais importantes são o sólidos suspensos, a matéria orgânica dissolvida colorida, a clorofila – pigmento presente no fitoplâncton – e outros pigmentos algais, e o carbono orgânico dissolvido (COD) (LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2015).

Plumas fluviais frequentemente carregam nutrientes provindos da zona urbana ou de terras agrícolas, e esses nutrientes podem modificar o estado trófico de um corpo d'água (LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2015). Um bom indicador do estado trófico de um lago é a presença de algas flutuantes. Concentrações excessivas de algas azuis (cianofíceas) e verdes prevalecem sob condições eutróficas. As diferentes classes de algas têm diferentes padrões de resposta espectral e, por isso, podem ser distinguidas através do imageamento aéreo e espacial. Contudo, os picos de reflectância de cianofíceas e algas verdes estão usualmente bastante próximos, então essa distinção é melhor realizada por *scanners* multi e hiperespectrais que tenham diversas bandas compreendidas entre os 450 nm e os 600 nm do espectro eletromagnético. Florações de algas próximas ou sobre a superfície da água também refletem bastante no infravermelho próximo (LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2015).

Quando as propriedades ópticas da água são significativamente influenciadas por outros constituintes, como partículas minerais e CDOM, e suas concentrações não variam concomitantemente com o fitoplâncton, podemos classificar esse tipo de água como sendo do Caso 2, de acordo com definição criada por Morel e Prieur (1977) e alterada por Gordon e Morel (1983).

A descarga de nutrientes e sedimentos podem determinar quais componentes opticamente ativos predominam em determinado corpo d'água, e existem aspectos que podem tornar um corpo hídrico naturalmente mais vulnerável a impactos. Lagunas costeiras são um exemplo. Elas são comumente presentes em todos os continentes, porém são mais encontradas ao longo de litorais tropicais marcados pela força da maré. Foram formadas através do carreamento de sedimentos provocado pelo aumento do nível do mar no Holoceno (período Quaternário), o que criou uma barreira de sedimentos entre o oceano e as lagunas. Por isso, quando isso toma maiores proporções, muitas lagunas passam a ter apenas um único canal

que as conectam com o oceano. Essa condição as deixa mais vulneráveis a impactos antrópicos e naturais, tendo em vista a menor taxa de renovação de suas águas e maior tempo de residência, além de profundidades pequenas (OLIVEIRA; KJERFVE, 1993). Essas características do corpo d'água conferem uma maior vulnerabilidade à eutrofização e contaminação (LINS *et al.*, 2017).

3.2 Uso de satélites para monitoramento da qualidade da água

A primeira missão espacial de observação da terra foi a Landsat-1, lançada em 1972, com o sensor multiespectral MSS - *Multispectral Scanner*. Não foi voltada especificamente à observação de águas, mas ainda assim garantiu o desenvolvimento de estudos voltados à sua qualidade, mais especificamente para estimativa da transparência da água e/ou turbidez em lagos e outros tipos de águas interiores. Ainda assim, era desafiador obter informações acuradas de qualidade de água com satélites de baixa resolução espacial, espectral e radiométrica, como os primeiros da série Landsat (TYLER *et al.*, 2016).

O primeiro sensor voltado ao monitoramento de águas da superfície da Terra, com resoluções espectral, radiométrica e espacial apropriadas para tal, foi o *Coastal Zone Color Scanner* (CZCS). Foi lançado em 1978 a bordo da plataforma Nimbus-7 (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019). Como ele foi projetado a princípio para observação de oceanos, sua resolução espacial era de 825 m, limitando a observação a grandes sistemas aquáticos. Ainda com essa limitação, houve alguns estudos em águas continentais de grandes proporções que eram opticamente complexas – como Lake Michigan e Lake Superior (TYLER *et al.*, 2016)

A missão teve fim em 1986 e a missão seguinte só foi lançada em 1997. SeaWiFS, como era chamada a missão espacial *Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor*, possuía resoluções radiométrica e espectral superiores às de seu antecessor, porém ainda mantinha uma baixa resolução espacial, de 1,1 km, e isso limitava o seu uso em locais de grande complexidade espacial como sistemas de águas interiores ou próximas à costa (TYLER *et al.*, 2016).

As três missões lançadas em sequência, MODIS-Terra (1999), MODIS-Aqua e MERIS (2002) viabilizaram o estudo da variabilidade temporal de componentes da água, como a clorofila-a, devido à resolução temporal: MODIS captura imagens a cada dia enquanto MERIS tem um tempo de revisita de 2 a 3 dias, ambos numa escala global. MERIS possui vantagem em relação ao MODIS no que diz respeito à estimativa desse parâmetro, tendo em

vista que possui uma banda espectral centrada em 708 nm e uma resolução espacial maior (i.e. 260 m × 290 m ,contra 1 km × 1 km do MODIS) (MOSES *et al.*, 2009). A configuração das bandas espectrais favoreceu também a sensibilidade à presença de CDOM (412 nm), turbidez (510 e 620 nm) e fluorescência de clorofila (681 e 709 nm) (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019). Isso contribuiu para a utilização desse sensor em estudos em águas interiores, estuarinas ou costeiras (e.g. DALL’OLMO; GITELSON, 2005; DOERFFER; SCHILLER, 2007; GITELSON; SCHALLES; HLADIK, 2007; MA *et al.*, 2014; MOSES *et al.*, 2009; PEREIRA-SANDOVAL *et al.*, 2019). No entanto, essas resoluções espaciais limitaram o estudo em corpos d’água pequenos (TYLER *et al.*, 2016) Ainda, a heterogeneidade espacial de um corpo d’água podia ser tal que um pixel não representasse um ponto de medição *in situ* (MOSES *et al.*, 2009).

O primeiro sensor hiperespectral experimental a orbitar a Terra foi o *Hyperion imaging spectrometer*, lançado em 2001, que foi utilizado na estimativa detalhada de parâmetros de qualidade de águas interiores e de transição próximas da costa, contando com resolução espacial de 30 m, 220 bandas entre 0,4 e 2,5 μm , e um tempo de revisita de 16 dias. Outro sensor experimental lançado foi o *Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean* (HICO), projetado especificamente para o monitoramento de ambientes costeiros, dotado de resolução espacial de 90 m e altos valores de Razão Sinal-Ruído (SNR). No entanto, ambos já encerraram suas missões.

O SNR de um sensor é um aspecto importante para a comunidade do sensoriamento remoto, pois uma grande parte do sinal é provinda de interferência atmosférica, o que aumenta o ruído. Um outro fator que aumenta o ruído é a resolução espectral do sensor, pois bandas estreitas são mais sensíveis a picos de absorção. Aplicações de sensores orbitais no sensoriamento de águas interiores com baixas radiâncias podem ser bastante afetadas pelo ruído do sensor (JORGE *et al.*, 2017). É importante, então, que as bandas espectrais usadas na estimativa de parâmetros de qualidade de água sejam de alto SNR.

No tocante a satélites comerciais, os sensores WorldView-2 e 3 possuem resolução espacial de menos de 2m, além de resoluções espectral – 8 bandas na faixa de 400 a 1040 nm – e radiométrica – 11 bits no visível e no NIR – apropriadas para aplicações em águas túrbidas. O grande entrave para a utilização dos dados desses sensores é, no entanto, os custos associados a eles, apesar da tendência em decrescerem com o tempo (TYLER *et al.*, 2016). Outros sensores comerciais de alta resolução já foram usados em estudos para estimativa de

diversos parâmetros de qualidade de águas interiores e de transição, como o IKONOS, LISS 3 e 4, SPOT 4 e 5 e ALI (MATTHEWS, 2011).

O uso de sensores comerciais é inviável para o monitoramento aquático devido aos custos associados, sobretudo quando há disponibilidade de produtos de livre acesso, capturados por outros sensores.

A missão Sentinel-2 tem suas imagens disponibilizadas gratuitamente no portal *Copernicus Open Access Hub* (ESA, 2019a). O primeiro instrumento da série MSI (*Multi-Spectral Imager*), da Agência Espacial Europeia (ESA) foi lançado a bordo do satélite Sentinel-2A em 2015; em 2017, foi lançado o segundo, junto ao satélite Sentinel-2B. O instrumento possui um tempo de revisita de 5 dias (no Equador) com a constelação dos dois satélites e fornece imagens com alta resolução espacial – 10 a 60 m. Ainda que projetado para aplicações sobre terra, o MSI pode ser usado no monitoramento de qualidade de água de regiões litorâneas e águas interiores que não são observáveis por sensores atuais de *ocean colour*, como MODIS (resolução espacial de 250-1000 m) e OLCI (resolução espacial de 300m), que é o sensor a bordo da missão Sentinel-3. A configuração das bandas do MSI remete à das missões Landsat 7 e 8 da agência espacial americana (NASA)(WARREN *et al.*, 2019) , que têm mostrado utilidade no sensoriamento remoto de águas (e.g. ILORI; PAHLEVAN; KNUDBY, 2019; KUHN *et al.*, 2019), tendo o mais recente apresentado melhorias em relação às missões anteriores da série Landsat - acréscimo de banda para aquisição de aerossóis sobre terra em área de costa (443 nm) e de nuvens cirros (1374nm) (KUHN *et al.*, 2019).

Kuhn *et al.* (2019) aplicaram algoritmos de estimativa de Chl-a e turbidez sobre águas interiores do rio Amazonas após efetuarem correção atmosférica de imagens do OLI e do MSI. A turbidez foi estimada através de um algoritmo semi-empírico que usa a banda do vermelho, tanto do MSI quanto do OLI (centrada em 665 nm); já as concentrações de Chl-a foram estimadas com o modelo OC3, que utiliza um polinômio de 4ª ordem para relacionar o máximo de duas bandas do azul (443 ou 490) e do verde (560 nm). Contudo, a sensibilidade de seus resultados com o OLI para métodos de correção, sensores e a escolha do modelo bio-óptico usado indicou que os valores de Chl-a estimados devem ser interpretados com bastante cuidado, tendo em vista que o design do sensor não foi otimizado para detecção de sinais aquáticos em ambientes opticamente complexos.

Em comparação com Landsat-8, Sentinel-2 possui uma resolução espacial maior e menor tempo de revisita, além de três bandas adicionais no NIR (705, 740 e 783), o que é uma vantagem sobre águas costeiras/interiores opticamente complexas (KUHN *et al.*, 2019; PAHLEVAN *et al.*, 2017).

O catálogo de instrumentos imageadores operando atualmente pode ser consultado no portal de base de dados do Comitê de Satélites de Observação da Terra (CEOS – *Committee on Earth Observation Satellites*) (CEOS, 2020).

3.3 Sobre a missão imageadora Sentinel-2

Os Sentinel-2A e 2B são satélites que compõem a missão imageadora multiespectral Sentinel-2, do Programa Copernicus, sendo administrada pela Agência Espacial Europeia em conjunto com a Comunidade Europeia para captura de imagens da Terra, voltando-se prioritariamente ao monitoramento da cobertura do solo, de ecossistemas marinhos e de desastres naturais. A missão possui como principais características:

- a) Resolução temporal de 10 dias para cada satélite individualmente. Os satélites Sentinel-2A e 2B possuem a mesma órbita, porém separados em 180 graus. Por haver dois satélites funcionando em conjunto, o tempo de revisita passa a ser de 5 dias no equador;
- b) Largura de faixa imageada (*swath width*) de 290 km;
- c) Captura de imagens de 13 bandas espectrais (ver **Tabela 1**), sendo:

4 bandas com resolução espacial de 10 m, operando na faixa do visível e do infravermelho;

6 bandas com resolução espacial de 20 m, operando na faixa do *red edge* e no SWIR;

3 bandas com resolução espacial de 60 m, voltadas a correções atmosféricas.

Sua alta capacidade de revisita (5 dias) permite que seja possível o planejamento dos melhores dias para realização de medições *in situ* sobre a área de estudo e para o monitoramento da água a longo prazo após calibração e validação de modelos.

Tabela 1 - Respostas espectrais medidas para cada banda do Instrumento Multiespectral (MSI) a bordo dos satélites Sentinel-2A e 2B

Resolução espacial (m)	Banda	S2A		S2B		Propósito na transformação a nível 2A
		Comprimento de onda central	Largura de banda	Comprimento de onda central	Largura de banda	
		(nm)	(nm)	(nm)	(nm)	
10	2	492,4	66	492,1	66	Sensível ao espalhamento de aerossóis sobre vegetação
	3	559,8	36	559,0	36	Pico no verde, sensível a clorofila total em vegetação
	4	664,6	31	665,0	31	Máxima absorção de clorofila
	8	832,8	106	833,0	106	Índice de Área Foliar (IAF)
20	5	704,1	15	703,8	16	Não usada no contexto do nível 2A
	6	740,5	15	739,1	15	Não usada no contexto do nível 2A
	7	782,8	20	779,7	20	Não usada no contexto do nível 2A
	8a	832,8	106	833	106	Usada na correção atmosférica como banda de referência para absorção por vapor d'água
	11	1613,7	91	1610,4	94	Detecção de solo
	12	2202,4	175	2185,7	185	Determinação de Carga Óptica do Aerossol (AOT)
	1	442,7	21	442,3	21	Correção atmosférica – espalhamento devido a aerossóis
	9	945,1	20	943,2	21	Correção atmosférica - absorção de vapor d'água (usado na correção atmosférica)
60	10	1373,5	31	1376,9	30	Detecção de nuvens cirros finas para correção atmosférica

Fonte: Adaptado de ESA, 2019

3.4 Correção atmosférica

3.4.1 Breve histórico

Wang (2014) citou Gordon (1978;1980) como responsável pelo desenvolvimento de um algoritmo de correção atmosférica de espalhamento único para processamento de dados de cor de oceano do CZCS, demonstrando a viabilidade no sensoriamento remoto de *ocean color* por satélite. Dando seguimento ao CZCS, um algoritmo avançado de correção atmosférica foi desenvolvido para diversos sensores mais desenvolvidos de *ocean color*, como o SeaWiFS, MODIS, MERIS e outros.

Os esforços de correção atmosférica nos últimos anos se concentraram no manejo das propriedades mais complexas de águas interiores e costeiras, além dos aerossóis de alta absorção_(WANG, 2014).

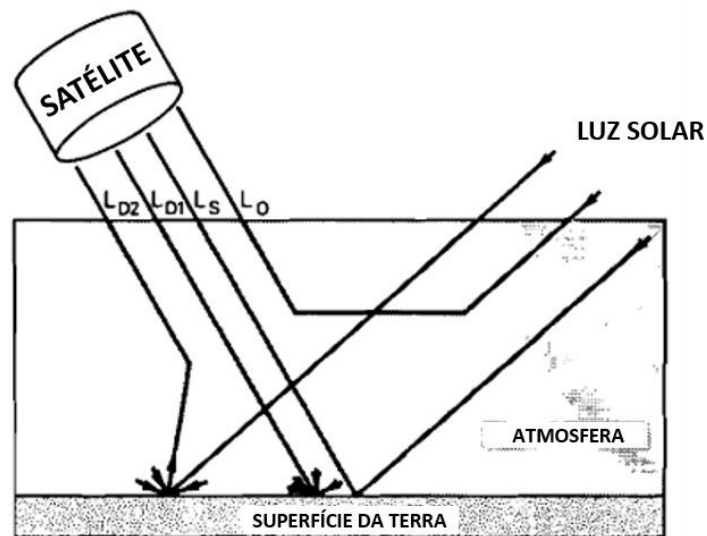
3.4.2 A teoria da transferência radiativa

A teoria da transferência radiativa é a que rege os diversos mecanismos de correção atmosférica desenvolvidos. Segundo a equação da transferência radiativa, a radiância da luz refletida do sistema Terra-atmosfera para um céu limpo de nuvens é composta de três componentes:

$$L = L_0 + L_s + L_D \quad \text{Equação 1}$$

Em que L_0 é a radiância de luz oriunda do feixe de luz solar que sofreu espalhamento na direção do sensor devido à atmosfera, sem entrar em contato com a superfície – é o elemento que aumenta o brilho da imagem, independente da reflectância de superfície; L_s é a radiância da luz solar refletida pela superfície e transmitida diretamente pela atmosfera, sendo o elemento responsável por fornecer a informação remota da superfície; e L_D é a radiância da luz refletida pela superfície que, após espalhamento atmosférico, chega ao sensor (KAUFMAN; SENDRA, 1988).

Figura 1- Diagrama esquemático das contribuições da radiância ascendente



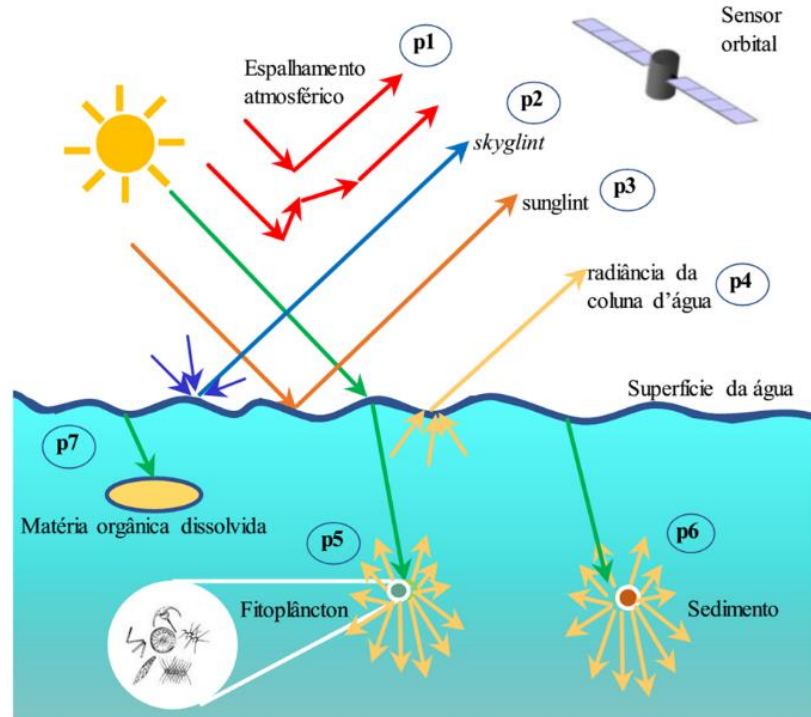
Fonte: Adaptado de Kaufman e Sendra, 1988

3.4.3 Algoritmos de correção atmosférica

O sinal do satélite é convertido em radiância espectral para efeito de estudo. O sinal registrado é resultante dos componentes (ver **Figura 2**):

- radiância proveniente da própria coluna d'água;
- contribuição dos espalhamentos atmosféricos causados por gases e aerossóis (como poeira, fuligem e fumaça);
- reflexão especular na superfície – *sunlint* e *skylint*;
- efeitos do fundo em corpos d'água rasos (menores que 2 m);
- e efeitos de adjacência causados pela radiância de alvos vizinhos.

Figura 2- Trajetória da luz entre o sol, o corpo d'água e o sensor orbital. (1) Processo de espalhamento atmosférico; 2) Processo de reflexão especular da luz difusa do céu, (3) processo de reflexão especular da luz solar direta, (4) radiação emergente da coluna d'água, (5) processo de espalhamento e absorção da luz por fitoplâncton, (6) processo de espalhamento da luz por sedimentos, (7) processo de absorção da luz por matéria orgânica dissolvida.



Fonte: Barbosa; Novo; Martins (2019)

O espalhamento e absorção de aerossóis são as principais variáveis do efeito atmosférico em imagens de satélite, uma vez que a absorção por gases é mais facilmente minimizada. O espalhamento de aerossóis é o componente majoritário do efeito atmosférico sobre superfícies escuras enquanto sua absorção é importante em superfícies claras (KAUFMAN; SENDRA, 1988).

Um dos parâmetros de entrada da equação da transferência radiativa que são inicialmente desconhecidos é a Carga Óptica do Aerossol (AOT, do inglês *Aerosol Optical Thickness*). Existem vários métodos para determinação da AOT, que podem usar a própria imagem de entrada ou fontes externas, como por exemplo a estação AERONET, da NASA (DE KEUKELAERE *et al.*, 2018). A AOT fornece uma medida da luz que é impedida de atingir o chão devido à presença das partículas de aerossol (DE KEUKELAERE *et al.*, 2018).

A inversão de um modelo de aerossol em oceanos, ou seja, águas do Caso 1, se baseia na suposição de reflectância nula no NIR, de 670 nm até 865 nm. Para águas eutróficas e típicas do Caso 2, no entanto, essa suposição não é válida, pois a absorção pela água pura é contrabalanceada pelo espalhamento de partículas, sejam elas orgânicas ou inorgânicas (WANG, 2010).

A qualidade da estimativa de reflectâncias é altamente dependente do método de correção atmosférica, das características da superfície-atmosfera e do design do sensor (MARTINS *et al.*, 2017).

De Keukelaere *et al.* (2018) efetuaram a correção atmosférica de dados do Landsat-8/OLI e Sentinel-2/MSI através do algoritmo Image Correction for Atmospheric Effects (iCOR) para águas continentais, costeiras e de transição. A validação da performance do iCOR foi feita por duas comparações, sendo: i) comparação entre a imagem corrigida e dados coletados *in situ* em campanhas; ii) comparação entre a imagem corrigida e dados do AERONET-OC (conjunto de radiômetros autônomos operados sobre plataformas fixas em águas costeiras) para águas costeiras. Para (i), houve uma boa performance para todas as bandas ($R^2 > 0.88$) exceto a de 865 nm; e para (ii), a atuação do iCOR sobre águas continentais promoveu uma melhora dos resultados na região do NIR e do *red edge*. em relação aos dados *in situ*.

Numa abordagem com o sensor MSI (Sentinel-2), Warren *et al.* (2019) fizeram uma avaliação de algoritmos de CA sobre águas costeiras e interiores da Europa com características de qualidade de água variadas, numa escala continental. Os algoritmos foram iCOR v1.0, C2RCC v1.0, Sen2Cor v2.4.0, Polymer v4.6, ACOLITE v20170718 e l2gen v. 7.5.1. Focaremos no iCOR, Sen2Cor e C2RCC, pois foram escolhidos dentro da metodologia deste trabalho. Sobre as áreas costeiras, identificaram subcorreções feitas pelo iCOR e Sen2Cor e atribuíram a isso a metodologia de estimativa de modelo e parâmetros de aerossol. Essa metodologia depende da presença de pixels de terra e constataram que, por ser área de costa, não houve variabilidade espectral suficiente para uma estimativa acurada, e por isso o algoritmo usa um valor padrão, que é baixo – 0,2 para Sen2Cor e 0,1 para iCOR. Já na série de dados de águas interiores, alterações no formato espectral não ficaram evidentes, pois houve maior disponibilidade de pixels continentais para estimativa de AOT. Segundo os autores, o formato espectral dos demais algoritmos pareciam acompanhar a reflectância emergente da coluna d'água, e isso sugeriu que o espalhamento de aerossóis não fosse a principal causa de erros.

Como uma medida da similaridade espectral entre a reflectância de satélite e de campo, usou o chamado ângulo espectral, em que quanto mais próximo de zero, maior a similaridade. C2RCC alcançou menores valores para águas interiores, seguido de Sen2Cor e iCOR. Ainda, aplicaram modelos de razão de bandas para estimativa de clorofila-a. A análise

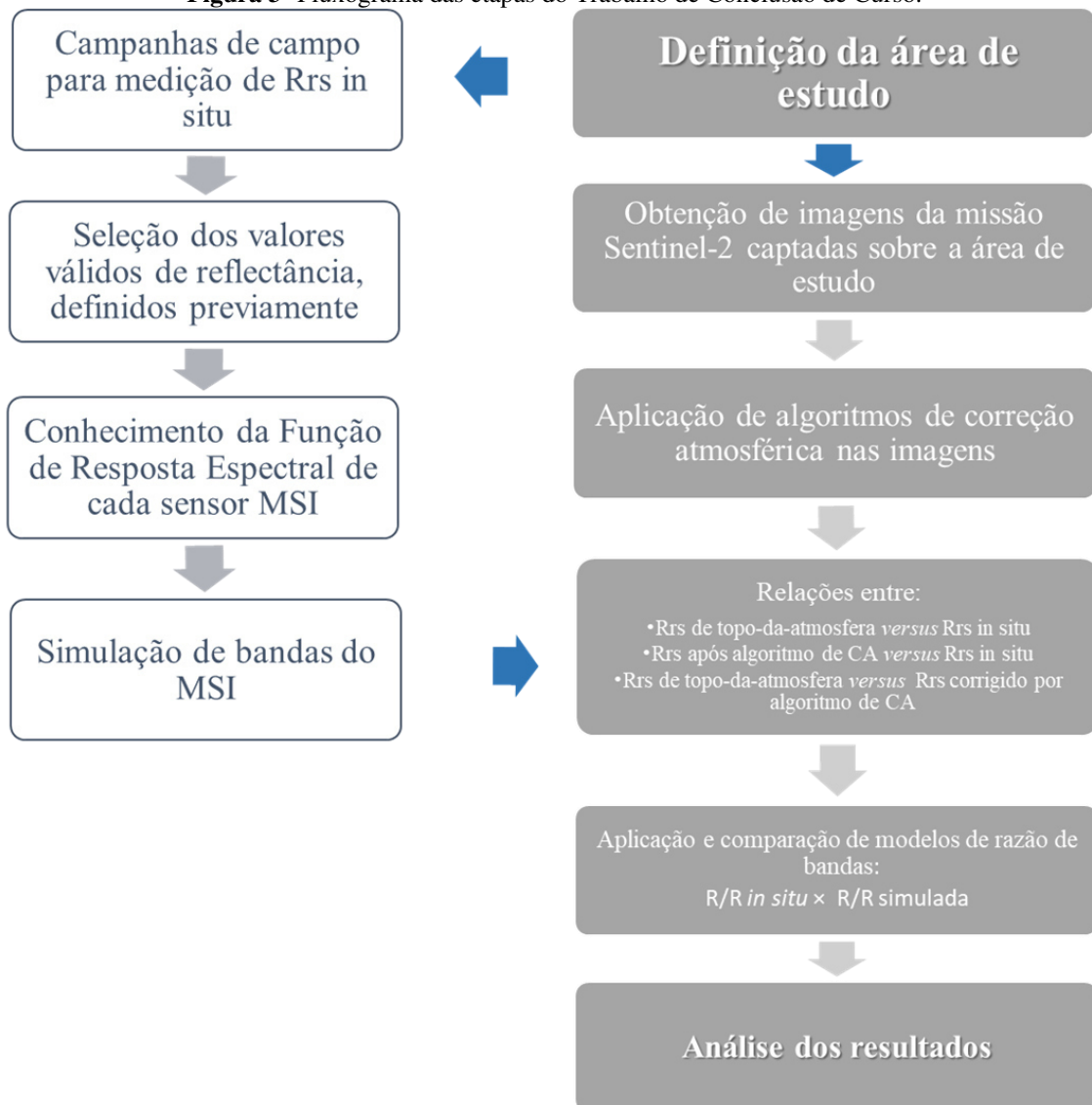
estatística das séries de dados mostrou grandes níveis de incertezas, acompanhados de baixas correlações, inclusive para o uso de modelos de bandas adaptados ao MSI.

Uma aplicação em águas tropicais brasileiras foi feita por Martins *et al.* (2017). Aplicaram os algoritmos Sen2Cor, 6SV e ACOLITE sobre cenas de quatro lagos da planície de inundação do Amazonas, captadas pelo MSI. São lagos estreitos e marcados por pequena variabilidade espacial. Constataram contribuições atmosféricas acima de 50% em relação ao produto de topo-da-atmosfera para todas as bandas, especialmente no azul. Detectaram alta influência do efeito de adjacência devido à floresta Amazônica, particularmente após os 705 nm na curva espectral das águas, e todos os algoritmos de CA testados mostraram limitações na aquisição acurada de reflectâncias no NIR devido a isso.

4 METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido de acordo com as seguintes etapas:

Figura 3- Fluxograma das etapas do Trabalho de Conclusão de Curso.



Fonte: Autora, 2019

4.1 Definição da área de estudo

O Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM) é um sistema tropical de lagunas rasas situado no estado de Alagoas entre as latitudes 9°35'00" S e 9°46'00" S e as longitudes 35°34'00" O e 35°58'00" O. O Complexo é dividido em três compartimentos: Laguna Manguaba, com área estimada de 42 km², que recebe águas doces provindas principalmente da bacia do Paraíba do Meio e do Sumaúma; Laguna Mundaú, de aproximadamente 27 km², que recebe águas doces provindas da bacia do Mundaú.; e um sistema de canais estreitos de 12 km², que conecta as duas lagunas por meio de uma única entrada de maré com largura de 250 m no Oceano Atlântico. O clima do CELMM é do tipo tropical semiúmido, havendo períodos secos e úmidos bem definidos (LINS *et al.*, 2017; OLIVEIRA; KJERFVE, 1993).

O problema da poluição das águas do CELMM existe há mais de 30 anos, já sendo reportado em estudo conduzido por Oliveira e Kjerfve em 1993. O lançamento de esgotos in natura dos municípios e vilas situados ao redor dos rios e áreas costeiras é uma fonte contínua de patógenos e matéria orgânica. Na maré vazante, o transporte de poluentes para o sistema é acelerado, contendo material orgânico e inorgânico proveniente de atividades de agricultura, aumentando a concentração de material suspenso. Tal problema é agravado na estação seca, de dezembro a março, pela indústria da cana-de-açúcar (OLIVEIRA; KJERFVE, 1993).

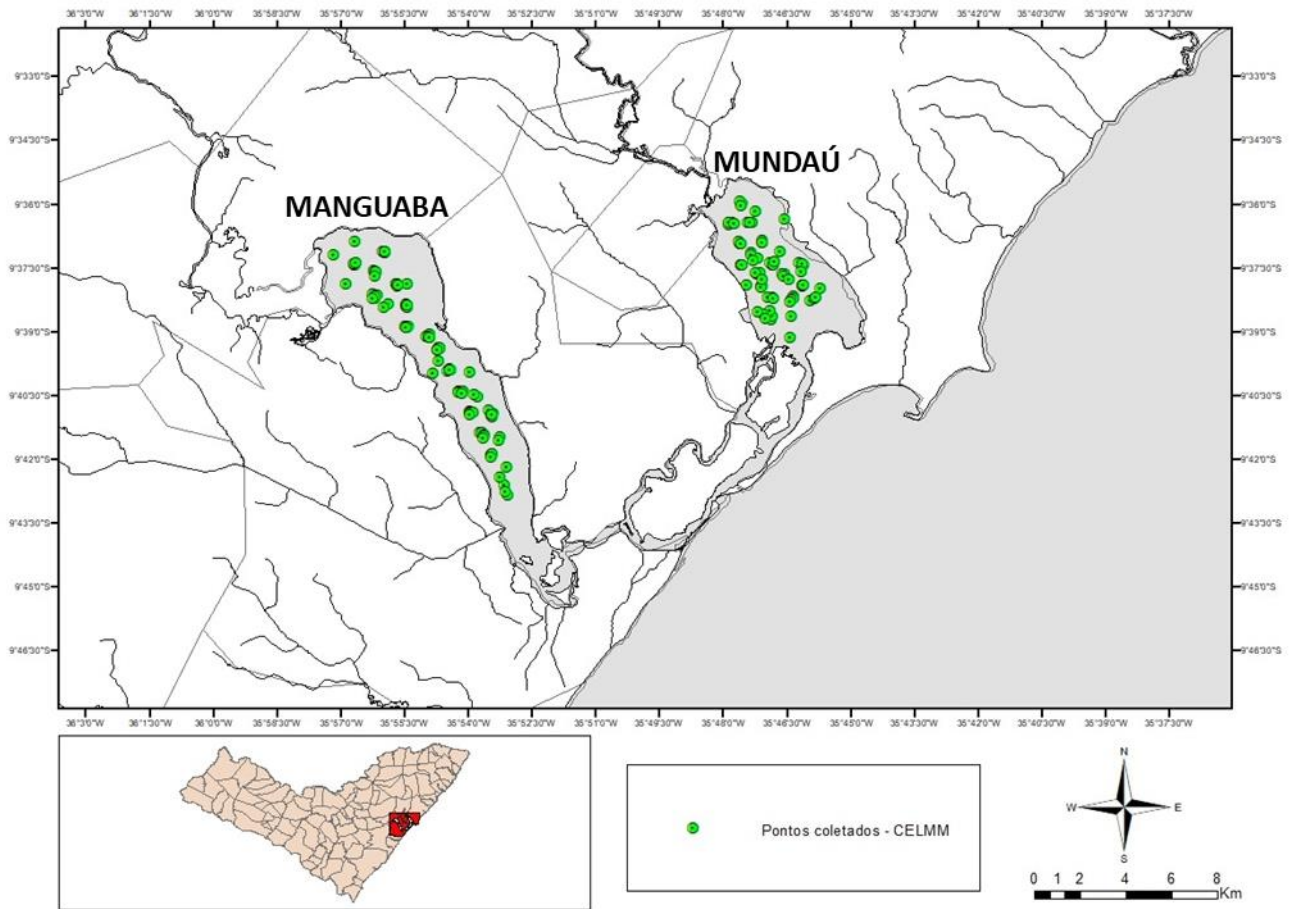
Lins *et al.* (2017) encontraram baixa correlação entre as concentrações de Chl-a e de SST no CELMM, e isso o caracteriza como um ambiente opticamente complexo, permitindo que suas águas sejam consideradas como do Caso 2.

O CELMM é particularmente interessante para o monitoramento via sensoriamento remoto porque o tempo de retenção estimado da Mundaú é de 16 (OLIVEIRA; KJERFVE, 1993) a 19 dias (LARSSON; NILSSON, 2014) enquanto o da Manguaba é de 36 (OLIVEIRA; KJERFVE, 1993) a 42 dias (LARSSON; NILSSON, 2014), permitindo que haja uma tolerância de tempo de observação entre o momento da campanha e o da passagem do satélite, no tocante ao dia e hora exatos.

4.2 Coleta de dados em campo

Medições de radiância e irradiância em campo foram executadas no período de março de 2018 a março de 2019 num total de 161 pontos ao longo das lagunas Mundaú e Manguaba (**Figura 4**). Primeiramente, foram consultadas as datas de passagem dos satélites Sentinel-2A e 2B sobre as lagunas Mundaú e Manguaba, levando em consideração o tempo de revisita de 5 dias. Com isso, foram planejados os melhores dias para realização de medições *in situ* sobre essas lagunas, objetivando posterior calibração de modelos.

Figura 4- Mapa da área de estudo com os pontos onde houve campanhas



Fonte: Autora, 2020. Hidrografia unifilar e bifilar – CPRM.

As campanhas foram feitas com os radiômetros hiperespectrais TriOS RAMSES acima da superfície da água (Figura 5), seguindo os protocolos de óptica oceânica da NASA (MUELLER *et al.*, 2003). Este conjunto de equipamentos realiza medições de radiância e irradiância dentro da faixa espectral de 320 nm a 950 nm com uma resolução espectral de aproximadamente 3,3 nm. As datas das campanhas são mostradas na **Tabela 2**.

Figura 5 – Radiômetros hiperespectrais TriOS
RAMSES



Fonte: Autora, 2019

Tabela 2 – Datas em que foram feitas campanhas de medição nas lagoas Mundaú e Manguaba

Manguaba	Mundaú
22/03/2018	-
23/05/2018	22/05/2018
06/08/2018	25/10/2018
27/02/2019	26/02/2019
23/03/2019	24/03/2019

Fonte: Autora, 2019

4.3 Cálculo de reflectância e seleção dos valores válidos

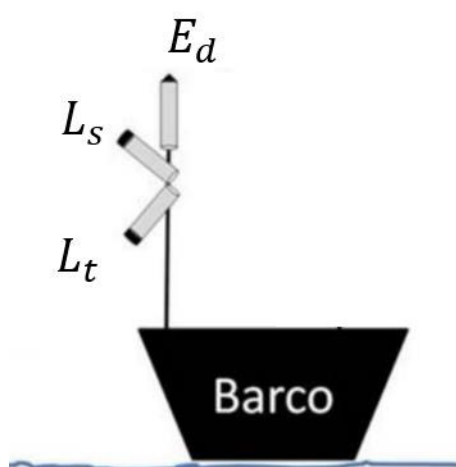
Apesar de ser um parâmetro-chave no sensoriamento remoto, a reflectância não é medida diretamente (PEDDLE *et al.*, 2001). O cálculo da reflectância de sensoriamento remoto foi feito com base na metodologia utilizada por Mobley (1999), que usa a seguinte equação:

$$R_{rs}(\lambda) = (L_t(\lambda) - \rho \cdot L_s(\lambda)) / E_d(\lambda) \quad \text{Equação 2}$$

onde R_{rs} é a reflectância de sensoriamento remoto (sr^{-1}); L_t é a radiância total acima da superfície da água ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$); L_s é a radiância proveniente do céu ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$); E_d é a

irradiância descendente na coluna d'água ($W.m^{-2}$); e ρ é um fator de proporcionalidade que depende da velocidade e direção dos ventos, condições atmosféricas, ângulo de visada e ângulo zenital da luz solar. Conforme recomendações constantes na literatura (FOUGNIE *et al.*, 1999; MOBLEY, CURTIS D., 1999), as medições de L_s e L_t foram feitas com ângulo de visada de 40° em relação ao nadir e ângulo de 135° em relação ao sol, sob velocidades de vento menores do que 5 m/s (INMET, 2019) e ângulos solares de até 30° em relação ao zênite. Com isso, foi possível assumir $\rho=0,028$.

Figura 6– Ilustração dos sensores radiométricos utilizados nas campanhas no CELMM.



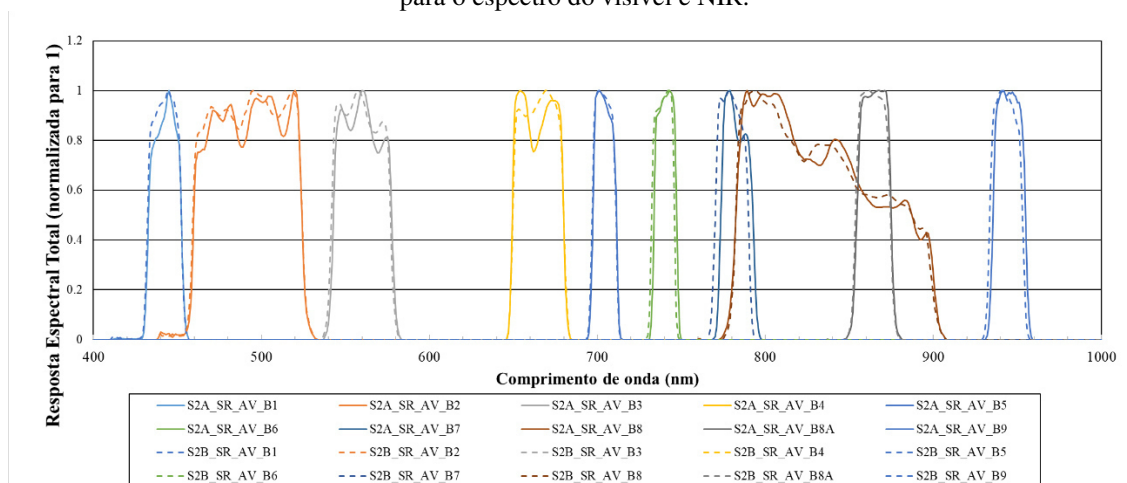
Fonte: Adaptado de Barbosa *et al.* (2019)

Calculados os valores de R_{rs} , foram eliminados do estudo os pontos visitados onde houve valores de reflectância negativos, uma vez que valores negativos estão relacionados com a precisão do equipamento radiométrico e não representam o significado físico de reflectância, que é de valor sempre positivo.

4.4 Simulação de bandas do MSI

A função de resposta espectral caracteriza a sensibilidade de um satélite para imagear determinadas bandas espectrais. Cada sensor da missão Sentinel-2 tem diferentes faixas de resposta espectral, e o comprimento de onda de cada uma dessas faixas foi mostrado na **Tabela 1**, disponível no portal da Agência Espacial Europeia - ESA (ESA, 2019). A **Figura 7** mostra as respostas espectrais do sensor de cada satélite para o espectro do visível até o NIR.

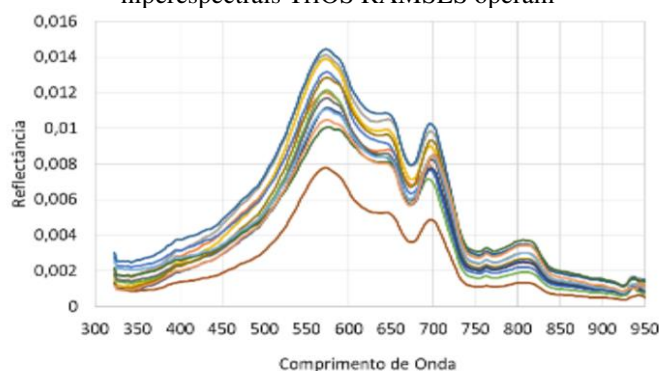
Figura 7- Curvas da Função de Resposta Espectral dos sensores multiespectrais dos satélites S2A e S2B para o espectro do visível e NIR.



Fonte: ESA, 2019

Considerando-se que os radiômetros do TriOS RAMSES são hiperespectrais (a Figura 8 ilustra um exemplo de curvas de Rrs geradas após o uso do equipamento) e, portanto, sensíveis a uma faixa espectral maior do que o sensor MSI dos satélites Sentinel-2, deve ser feita uma compatibilização entre dados do satélite e de campo de maneira que possam ser comparados. Desse modo, calculou-se novos valores de reflectância correspondentes aos comprimentos de onda centrais do MSI, definidos por uma função de resposta espectral (FRE). Esses valores calculados correspondem às reflectâncias de sensoriamento remoto (Rrs).

Figura 8- Exemplo de gráfico de reflectância em função do comprimento de onda em que os sensores hiperespectrais TriOS RAMSES operam



Fonte: Santos *et al.*, 2019

Para a simulação de bandas de satélite, é utilizado o método de reamostragem (o termo convolução também é utilizado) de dados radiométricos hiperespectrais para bandas de satélites multiespectrais. Ao dado hiperespectral, é aplicada a função de resposta espectral

(FRE) dos sensores multiespectrais. Para cada banda de cada sensor orbital há uma resposta espectral, que indica a sensibilidade da banda em questão para cada comprimento de onda, fazendo com que seja possível simular uma reflectância medida por ele. A técnica de reamostragem é, então, executada pela **Equação 3**.(BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019), onde:

- j é o número da banda do MSI;
- λ_j é o comprimento de onda central do MSI na banda j ;
- $Rrs(\lambda_j)$ é a reflectância in situ simulada para a banda j ;
- i é o número de comprimentos de onda suportados pelo sensor hiperespectral;
- λ_i é o comprimento de onda medido pelo sensor hiperespectral, variando desde o menor até o maior comprimento de onda suportado por este sensor.

$$R_{rs}(\lambda_j) = \frac{\sum_{i=1}^n R_{rs}(\lambda_i) \times FRE(\lambda_i)}{\sum_{i=1}^n R_{rs}(\lambda_i)} \quad \text{Equação 3}$$

Assim, fixando $j=1$, teremos reflectância simulada para a banda 1 do MSI, usando, em seu cálculo, todos os comprimentos de onda reconhecidos pelos radiômetros hiperespectrais TriOS RAMSES – dos 320 nm aos 950 nm. Para as demais bandas, procedimento análogo é feito.

Considerando que a faixa espectral de 443 a 865 nm é de especial interesse da comunidade científica para a estimativa de Chl-a, de SST e de CDOM de águas do Caso 2 (ANSFER; ALIKAS, 2019; GITELSON, 1992; LINS *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2017; MARTINS *et al.*, 2017; O'REILLY *et al.*, 1998; TOMING *et al.*, 2016) e, por isso, estão na faixa de abrangência de equipamentos de medição radiométrica in situ como os radiômetros TriOS RAMSES utilizados nas campanhas do CELMM, restringimos este trabalho às respectivas bandas: B1 a B8A.

4.5 Obtenção de imagens Sentinel-2

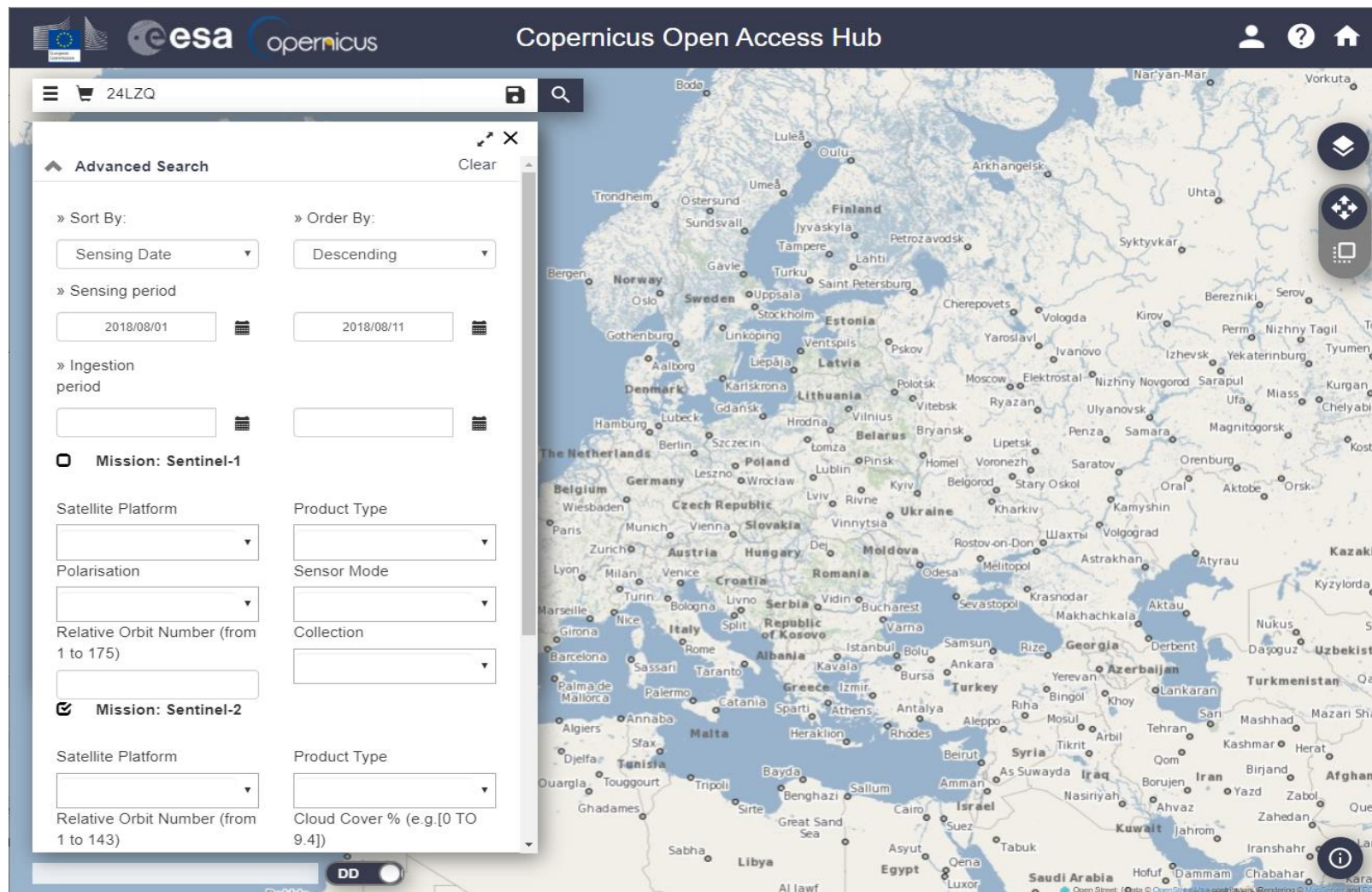
As imagens foram baixadas da internet através da plataforma *Copernicus Open Access Hub* da Agência Espacial Europeia (ESA, 2019). Nela, é disponibilizado um campo *Sensing Date* (Data de Sensoriamento), onde é possível inserir um intervalo que contém a data de cada campanha realizada. Assim, obtivemos uma imagem com data igual ou próxima da medição *in situ*, conforme planejado.

As imagens fornecidas pela plataforma que foram utilizadas neste trabalho são do nível 1C- este nível corresponde a reflectâncias do topo da atmosfera (*Top-of-atmosphere* - TOA), isto é, que necessitam passar por um processo de correção de variáveis atmosféricas para que tenham características similares às da superfície da Terra, passando a serem de nível 2A. Dessa maneira, foi viabilizada a comparação entre diferentes métodos de CA para o local de estudo. A cena que contém o CELMM possui o código 24LZQ, e representa uma porção de 100 x 100 km² (orto-imagem) na projeção UTM/WGS84 (ESA, 2019).

A **Figura 9** mostra um recorte do portal Copernicus Open Access Hub para escolha da imagem a ser trabalhada. Através do mapa, foi selecionada a área de estudo - CELMM – e constatou-se que ele está contido na cena 24LZQ, que foi colocada no campo de busca, como ilustrado em (a). No exemplo mostrado, foi selecionado o campo Sensing Date e foi procurada a imagem mais próxima à campanha realizada em 06/08/2018 ao colocar um intervalo de datas: 01/08/2018 a 11/08/2018. O produto a ser usado é do nível 1C, então foi selecionado Product Type: S2MSI1C. Como resultado (b), o portal retornou imagens com, no máximo, 5 dias de diferença da imagem desejada.

Figura 9 – Recorte do portal *Copernicus Open Access Hub* para escolha da imagem. Em (a), busca da cena e da data de captura. Em (b), produtos 1C retornados como resultados.

(a)



Display 1 to 4 of 4 products.
 Order By: Sensing Date ↓ 1 product selected

Request Done: 24LZQ AND (beginPosition:[2018-08-01T00:00:00.000Z TO 2018-08-11T23:59:59.999Z] AND endPosition:[2018-08-01T00:00:00.000Z TO 2018-08-11T23:59:59.999Z])

Product ID	Download URL	Mission	Instrument	Sensing Date
S2B MSI S2B_MSIL1C_20180811T124309_N0206_R009_T24LZQ...	https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Pn...	Sentinel-2	MSI	2018-08-11
S2A MSI S2A_MSIL1C_20180809T125311_N0206_R052_T24LZQ...	https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Pn...	Sentinel-2	MSI	2018-08-09
S2B MSI S2B_MSIL1C_20180804T125309_N0206_R052_T24LZQ...	https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Pn...	Sentinel-2	MSI	2018-08-04
S2B MSI S2B_MSIL1C_20180801T124319_N0206_R009_T24LZQ...	https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Pn...	Sentinel-2	MSI	2018-08-01

25 << < page: 1 of 1 >>

(b)

Fonte: ESA, 2019

Os nomes dos arquivos relativos aos produtos baixados constam no **Quadro 1**.

Quadro 1 - Lista de produtos de nível 1C utilizados como imagem de entrada dos algoritmos

Produto	Data passagem MSI	Data campanha correspondente
S2A_MSIL1C_20180319T124311_N0206_R009_T24LZQ_20180319T155758.SAFE	19/03/2018	22/03/2018
S2B_MSIL1C_20180523T124319_N0206_R009_T24LZQ_20180523T160118.SAFE	23/05/2018	22/05/2018 e 23/05/2018
S2B_MSIL1C_20180811T124309_N0206_R009_T24LZQ_20180811T175718.SAFE	11/08/2018	06/08/2018
S2B_MSIL1C_20181020T124319_N0206_R009_T24LZQ_20181020T174514.SAFE	20/10/2018	25/10/2018
S2B_MSIL1C_20190227T124319_N0207_R009_T24LZQ_20190227T191252.SAFE	27/02/2019	26/02/2019 e 27/02/2019
S2A_MSIL1C_20190324T124301_N0207_R009_T24LZQ_20190324T191236.SAFE	24/03/2019	23/03/2019 e 24/03/2019

Fonte: Autora, 2019

4.6 Processamento de algoritmos de correção atmosférica nas imagens

Através do software SNAP, desenvolvido pela Agência Espacial Europeia, foram testados algoritmos de CA através de complementos (*plugins*) disponibilizados a seguir. Nesses complementos, os arquivos de entrada são as imagens adquiridas na etapa anterior da metodologia deste trabalho.

Os algoritmos testados foram:

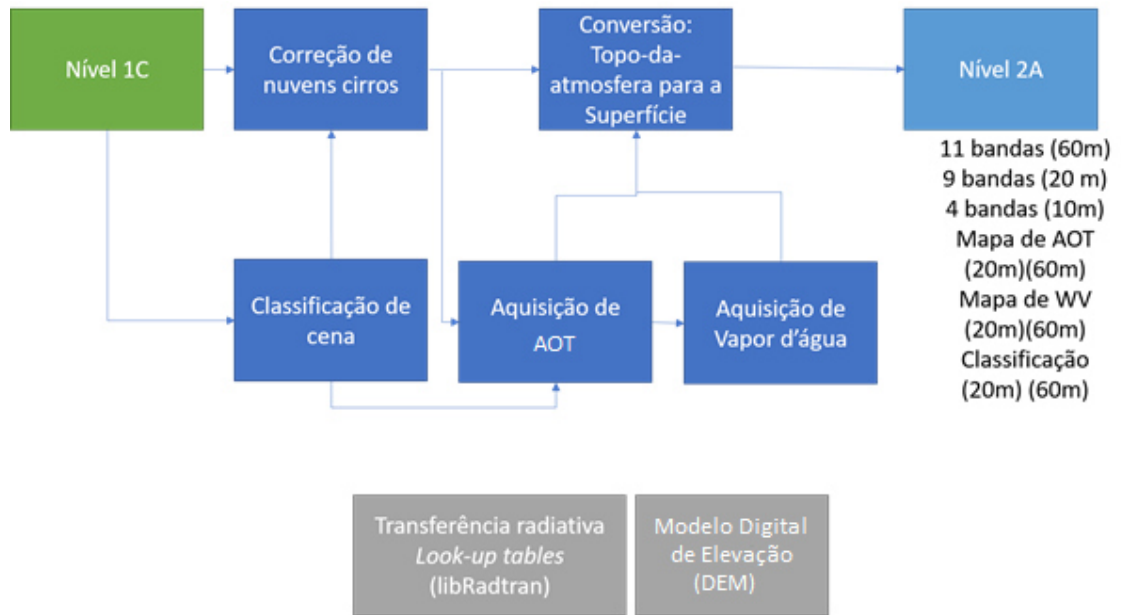
- Image Correction for Atmospheric Effects -iCOR;
- Sentinel-2 Correction processor -Sen2Cor;
- Case 2 Regional Coast Colour processor – C2RCC.

4.6.1 Sentinel-2 Correction processor – Sen2Cor

O Sen2Cor é uma ferramenta que recebe de entrada dados de reflectância de imagens de nível 1C (TOA) com o objetivo principal de atenuar efeitos atmosféricos, convertendo, assim, os dados de entrada em um produto de nível 2A (superfície da água). O processo de inversão está ilustrado na **Figura 10**. O módulo de correções atmosféricas é adaptado do software ATCOR e a base de dados atmosférica contém valores numéricos armazenados em tabelas *Look-Up* (LUT) do modelo libRadtran (MAYER; KYLLING, 2005; RICHTER, 1998), que é um pacote de ferramentas computacionais para cálculos de transferência radiativa na atmosfera terrestre. Os produtos de saída são um mapa de aerossóis, um mapa de vapor d'água e uma mapa de classificação de cena (este pode ser visualizado na **Figura 11**), do qual são gerados dois indicadores de qualidade: um mapa de probabilidade de nuvens e um de neve (LOUIS *et al.*,

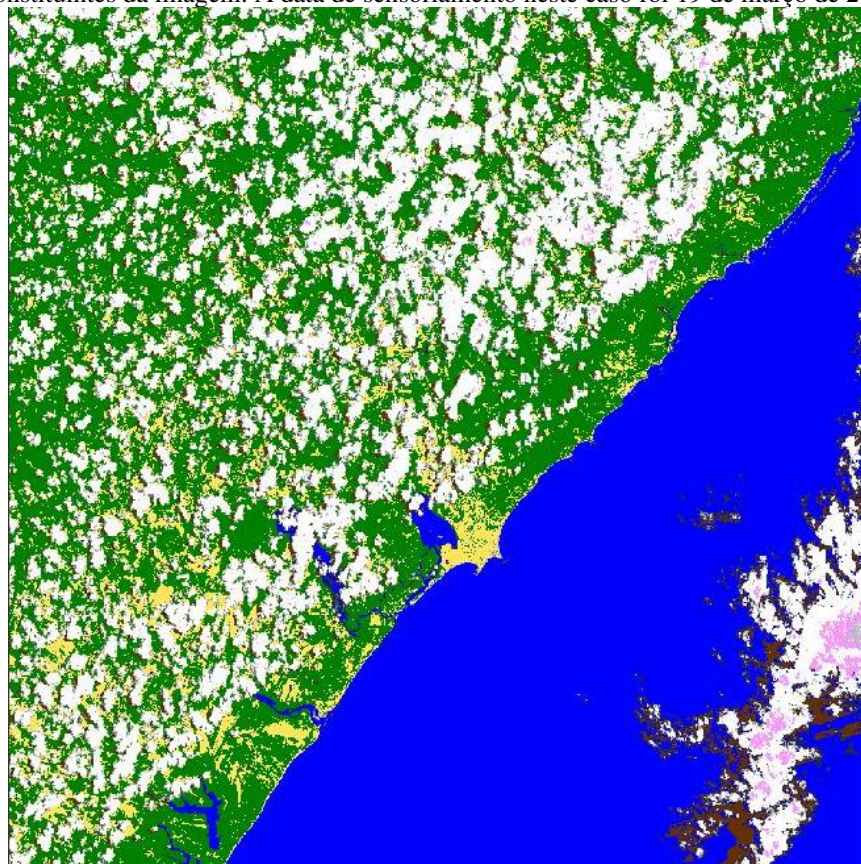
2016). O processador ainda disponibiliza correções opcionais como correção de nuvens cirros, de terreno, de efeitos de adjacência e correções empíricas usando Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional. As correções adicionais ativadas para este trabalho foram somente de nuvens cirros e efeito de adjacência.

Figura 10- Fluxograma representando o processamento de uma imagem do nível 1C para o nível 2A pela ferramenta Sen2Cor



Fonte: Adaptado de Main-Knorn *et al.*, 2017

Figura 11- Exemplo de mapa de classificação de cena criado após processamento de imagem do MSI pelo Sen2Cor com auxílio do software SNAP/ESA, acompanhado das frequências de aparecimento dos constituintes da imagem. A data de sensoriamento neste caso foi 19 de março de 2018



Legenda	Cor	Valor	Frequência
Sem dados		0	0,00%
Saturado ou defeituoso		1	0,00%
Pixels escuros		2	1,73%
Sombra de nuvens		3	2,46%
Área vegetada		4	30,26%
Área não vegetada		5	6,78%
Água		6	29,08%
Sem classificação		7	3,75%
Média probabilidade de nuvens		8	4,12%
Alta probabilidade de nuvens		9	21,35%
Nuvens cirros finas		10	0,00%
Neve ou gelo		11	0,47%

Fonte: Autora, 2019. Mapa gerado com o *plugin* Sen2Cor no software SNAP/ESA (MAIN-KNORN *et al.*, 2017)

A remoção de nuvens cirros é o primeiro passo no processo de CA do Sen2Cor, quando ativada, seguida pela remoção de aerossóis e vapor d'água (RICHTER *et al.*, 2012).

A nuvens cirros ocorrem na troposfera superior e inferior, nas regiões espectrais do visível, do NIR e SWIR. São nuvens de difícil detecção a partir de sensores multiespectrais de banda larga, principalmente sobre terra, uma vez que essas nuvens são parcialmente transparentes e as cenas continentais não são homogêneas. Se for encontrada uma correlação entre o sinal de cirros na banda 10 (~1,38 μm) e outros comprimentos de onda no VIS, NIR e SWIR, logo a contribuição de cirros pode ser removida do sinal de radiância recebido pelo sensor (RICHTER *et al.*, 2012).

O Sen2Cor foi desenvolvido originalmente para aplicações sobre terras continentais, então, para ser aplicado sobre a superfície da água, utiliza a Carga Óptica de Aerossol estimada a partir de pixels sobre o continente presentes na própria imagem (MAIN-KNORN *et al.*, 2017).

A contribuição de aerossóis pode se dar por um modelo de aerossol – urbano, rural, marítimo ou desértico – e pela AOT. Enquanto o modelo descreve propriedades ópticas do aerossol, a AOT fornece uma medida da luz que é impedida de atingir o chão devido à presença das partículas de aerossol (DE KEUKELAERE *et al.*, 2018) – em outras palavras, uma medida da transparência visual da atmosfera (MULLER-WILM *et al.*, 2013).

Para a extração de AOT a partir do produto 1C, o Sen2Cor utiliza uma adaptação do algoritmo de Kaufman e Sendra (1988) – este é baseado na presença de pixels de vegetação densa (DDV- *Dense Dark Vegetation*). Baseia-se em algumas considerações, dentre elas: de que existe ao menos uma fração de pixels na imagem que são totalmente cobertos por vegetação escura e densa; de que a reflectância de superfície dessas regiões é conhecida. No caso do Sen2Cor, podem ser utilizados também pixels de solo escuro e corpos d'água, que são de reflectância conhecida. O Sen2Cor inicia o processamento procurando por pixels escuros ou médios na banda 12, localizada no SWIR. Encontrando a reflectância nessa banda, é feita uma correlação entre ela e a reflectância na banda 4, no vermelho, e a banda 2, no azul. A correlação também funciona para solos escuros da imagem. Se a cena não contém qualquer área de referência, será utilizado um valor padrão de AOT, que é de 0,2 (adimensional) no nível do mar, aos 550 nm, para uma visibilidade padrão de 40 km. Esse processo gera um mapa de AOT, que acompanha o produto de nível 2A (RICHTER *et al.*, 2012).

Sobre terra, o mapa de vapor d'água, também usado na correção atmosférica, é gerado com o algoritmo de Absorção Diferencial Atmosférica Pré-corrigida, que é aplicado às bandas 8A

e 9 do Sentinel-2: a banda 8A serve como uma banda de referência e a banda 9 serve como um canal de medição de absorção de vapor d'água (RICHTER, R *et al.*, 2012).

Para correção aproximada de efeito adjacente devido ao espalhamento atmosférico sobre terrenos vizinhos de diferentes reflectâncias (metodologia melhor detalhada por Richter, 1998), é inserido um valor para o alcance da correção. Por padrão esse valor é de 1 km (campo *Adjacency range* na janela mostrada na **Figura 12**), que foi usado no nosso caso. Primeiramente, é calculada a reflectância num pixel desprezando o efeito adjacente - $\rho_i(x, y)$. Em seguida, é calculada a reflectância média na vizinhança de cada pixel dentro do alcance desejado (**Equação 4**).

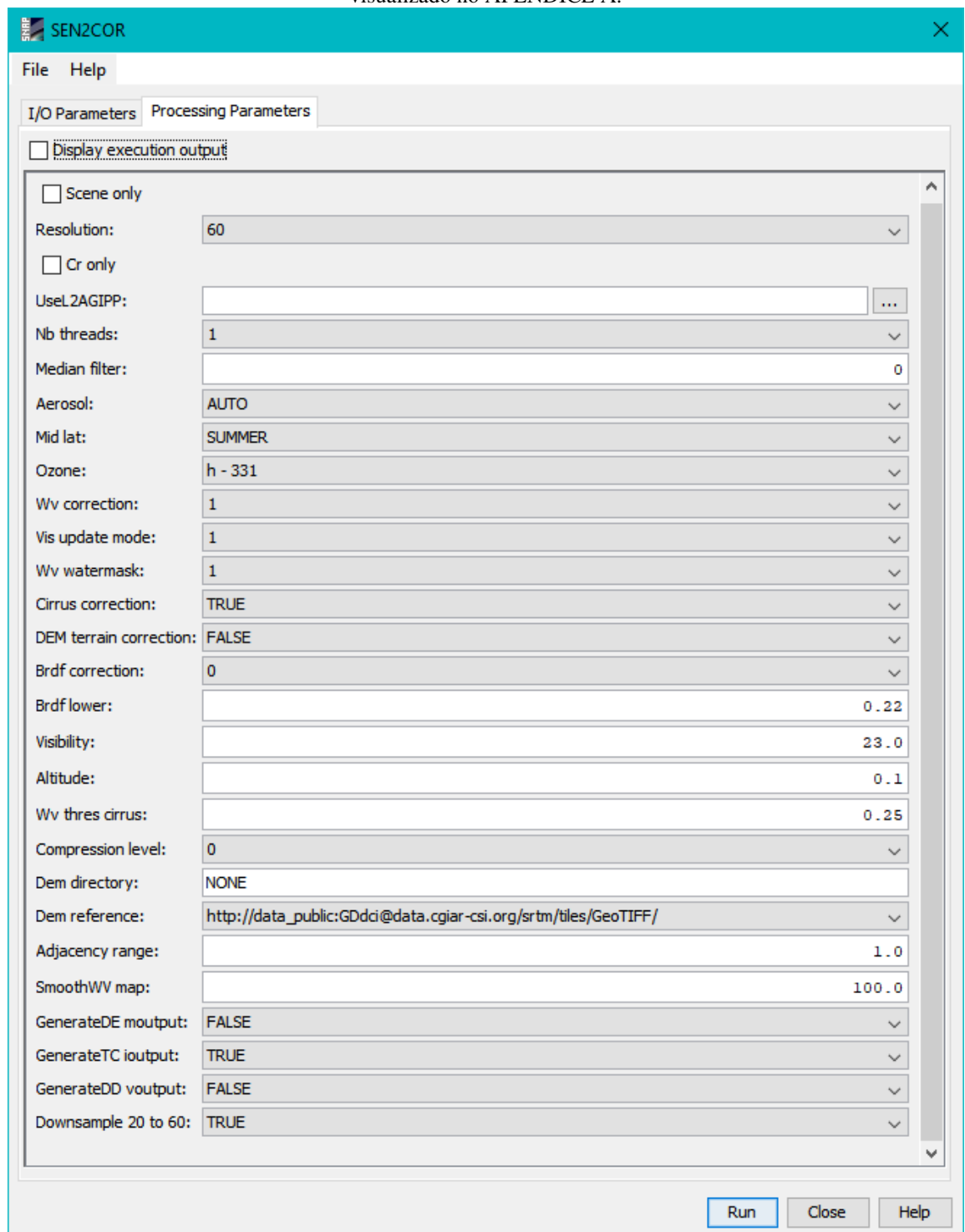
$$\bar{\rho} = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \rho_{i,j}^{(1)} \quad \text{Equação 4}$$

Onde N é o número de pixels dentro do alcance inserido e $\bar{\rho}$ é a média das reflectâncias desses pixels. Então, $\bar{\rho}$ é subtraído de $\rho_i(x, y)$. A essa subtração, é aplicada uma função q que depende da intensidade do espalhamento atmosférico:

$$\rho^{(2)}(x, y) = \rho^{(1)}(x, y) + q\{\rho^{(1)} - \bar{\rho}(x, y)\} \quad \text{Equação 5}$$

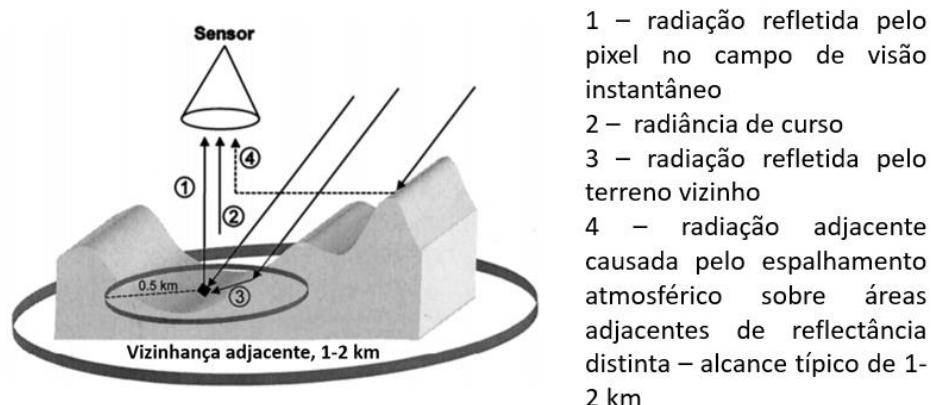
Esse processo é repetido para todos os outros pixels que compõem a imagem.

Figura 12- Janela de execução do complemento Sen2Cor com as configurações aplicadas neste trabalho. Na aba I/O Parameters, foi previamente inserido o arquivo de extensão .xml correspondente aos metadados da imagem bruta do MSI, que será processada pelo Sen2Cor. O arquivo de configuração pode ser visualizado no APÊNDICE A.



Fonte: Autora, 2019. *Print screen* do complemento Sen2Cor para SNAP (MAIN-KNORN *et al.*, 2017)

Figura 13- Componentes de radiação levados em conta pelo modelo ATCOR3, usado no módulo de CA do Sen2Cor.



Fonte: Adaptado de Richter, 1998

A documentação do Sen2Cor não explicita o mecanismo de correção de efeito adjacente no que diz respeito à função q usada. Parte das informações aqui mostradas foram obtidas após consulta a artigo sobre o ATCOR (RICHTER, 1998), módulo de correção atmosférica usado, que foi mencionado dentro da documentação do complemento. O único método de correção usado neste trabalho que explicita cada passo do mecanismo de correção de efeito adjacente é o iCOR.

Neste trabalho, os parâmetros de entrada do Sen2Cor foram mantidos conforme o modo padrão, sendo feitas as seguintes alterações:

- Mudança na estimativa de aerossóis para o modo Automático, que fez o algoritmo testar qual o melhor tipo de aerossol da imagem dentre as opções – rural ou continental;
- Foi ativada a correção de nuvens cirros;
- Resolução espacial de saída escolhida foi 60 m.

Quando o usuário não especifica um arquivo de modelo digital de elevação (DEM – *Digital Elevation Model*), o processador tenta adquirir arquivos de DEM da base de dados SRTM, com 90m resolução, provindos do CGIAR-CSI (*Consultative Group on International Agricultural Research – Consortium for Spatial Information*). Aplicou-se a este trabalho.

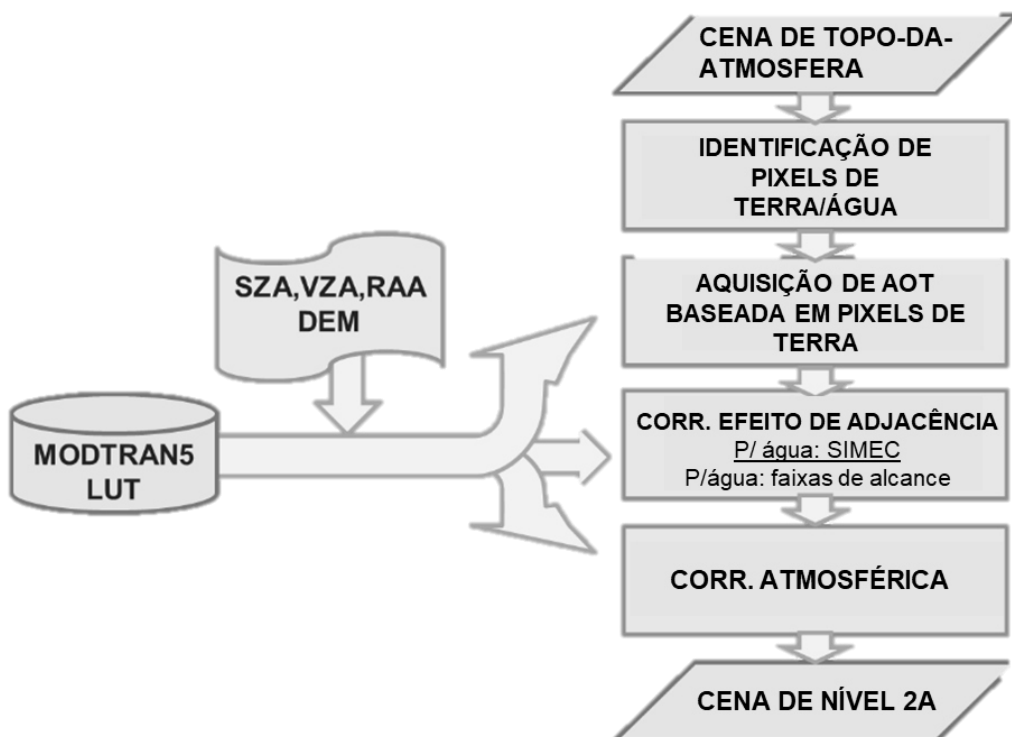
Para cada correção desejada, foi inserido na aba I/O Parameters (da **Figura 12**) o arquivo de metadados intitulado “MTD_MSIL1C.xml”, que está contido no interior da respectiva pasta de final .SAFE (arquivos do **Quadro 1** já mostrado).

A imagem de saída desejada, de nível 2A, é gerada em diferentes resoluções espaciais. Foi escolhida a resolução de saída 60m e, com isso, as bandas de saída de cada imagem corrigida foram: B1, B02, B3, B4, B5, B6, B7, B8A, B11 e B12.

4.6.2 Image Correction for Atmospheric Effects -iCOR

O iCOR é um algoritmo de correção de efeitos atmosféricos desenvolvido para aplicações em águas continentais, costeiras e de transição, além de ambientes terrestres. Ele faz a distinção entre pixels de água e do ambiente terrestre, identifica o efeito da dispersão de aerossóis, corrige o efeito do espalhamento de luz por pixels adjacentes e executa correção atmosférica – esta é feita com as tabelas *Look-Up* do MODTRAN 5. Os dados de entrada usados para a correção atmosférica pelo iCOR (por dados externos ou através do próprio mapa) são: modelo digital de elevação - DEM, ângulo zenital solar - SZA, ângulo zenital de visada – VZA e ângulo azimutal relativo – RAA. A versão atual do iCOR não corrige a imagem dos efeitos de *sunlint* (KEUKELAERE *et al.*, 2018). A metodologia de inversão do iCOR é ilustrada na **Figura 14**.

Figura 14- Metodologia do iCOR de inversão - nível 1C (TOA) para nível 2A (superfície da água)



Fonte: VITO REMOTE SENSING UNIT, 2019

Por padrão, o iCOR estima a AOT com base nos pixels de terra presentes na imagem, utilizando, assim como o Sen2Cor, uma adaptação do método com DDV desenvolvido por Kaufman e Sendra (1988). Quando não encontra uma variabilidade espectral suficiente na imagem de entrada, uma mensagem de erro conduz o usuário a inserir um valor fixo de AOT (adimensional). Por padrão o valor fixo que consta na janela de configuração é de 0,1 (DE KEUKELAERE *et al.*, 2018; VITO REMOTE SENSING UNIT, 2019).

A aquisição de dados de vapor d'água por padrão é feita com o valor 2, mas pode ser ativada a estimativa a partir da imagem de entrada. Em nosso caso, foi usado o modo padrão.

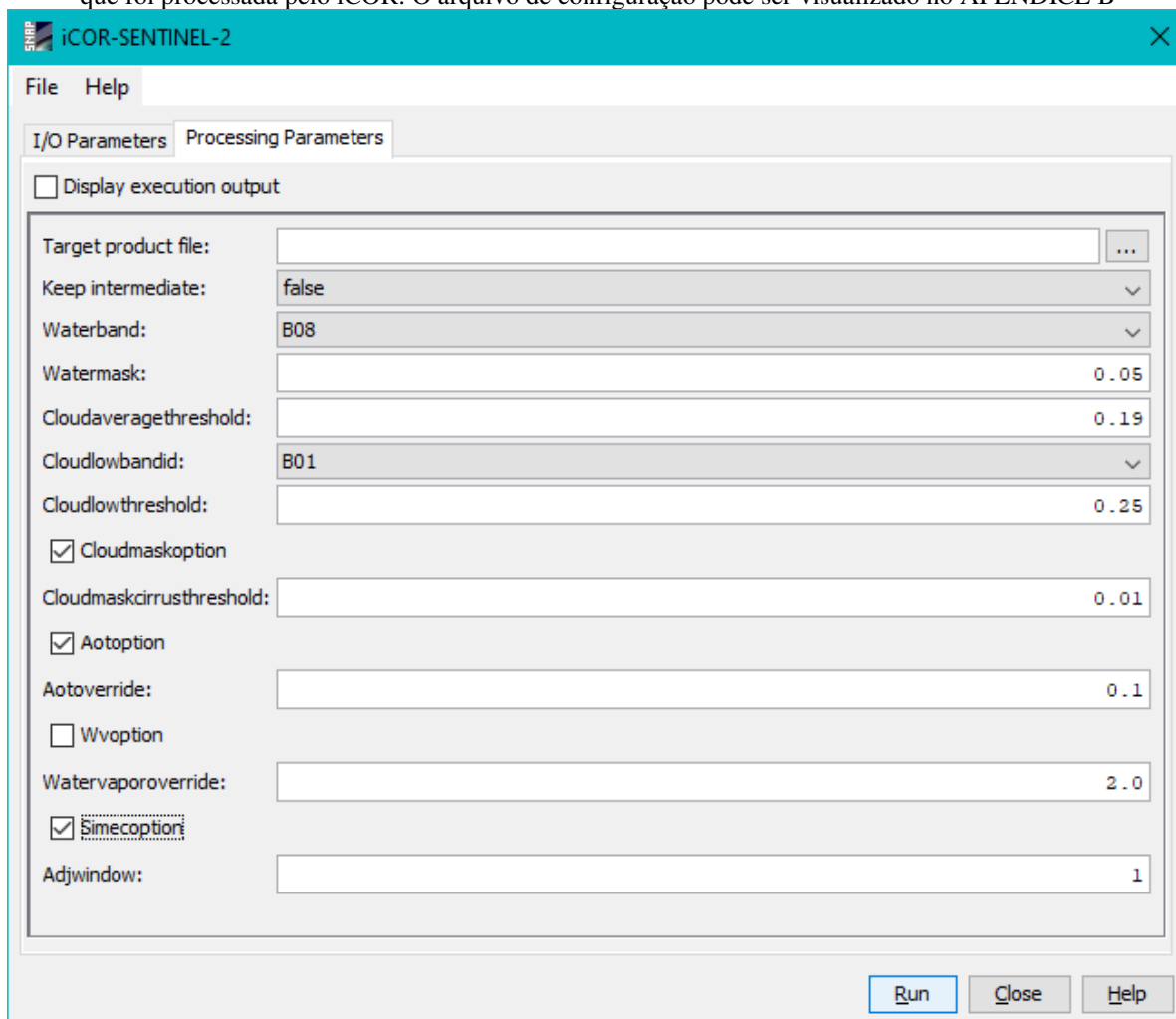
O iCOR conta com uma ferramenta de correção de efeitos de adjacência denominada SIMEC - SIMilarity Environment Correction.(STERCKX, S. *et al.*, 2015). Este utiliza como premissa básica a validade do *NIR Similarity Spectrum*, que considera como invariável a forma espectral da água no NIR. A reflectância da água (ρ_w) é normalizada para o comprimento de onda de 780 nm e o pixel é considerado válido – sem influência de efeitos adjacentes - se cumprir com a condição

$$\text{NIR}_{\text{sim}} - \text{Desvio padrão} \leq \frac{\rho_w^t}{\rho_w^r} \leq \text{NIR}_{\text{sim}} + \text{Desvio padrão}$$

em que ρ_w^t é a reflectância da água para a banda espectral atual (de teste) e ρ_w^r é a reflectância da água para uma banda espectral de referência situada em torno dos 780 nm (DE KEUKELAERE *et al.*, 2018; RUDDICK *et al.*, 2006).

O arquivo de metadados intitulado “MTD_MSIL1C.xml” da imagem a ser processada foi inserido como arquivo de entrada do Sen2Cor na aba I/O Parameters. Foram aplicadas as configurações padrão (olhar janela de execução na **Figura 15**), acrescidas do SIMEC (caixa de seleção “Simecoption”). São geradas imagens processadas em 10, 20 e 60m de resolução, mas aqui neste trabalho usamos a imagem de 60m para extração das reflectâncias. Com isso, as bandas geradas foram: B1, B2, B3, B4. B5, B6, B7, B8, B8A, B11 e B12.

Figura 15-Janela de execução do complemento iCOR com as configurações aplicadas neste trabalho. Na aba I/O Parameters, foi previamente inserido o arquivo de extensão .xml correspondente à imagem bruta do MSI, que foi processada pelo iCOR. O arquivo de configuração pode ser visualizado no APÊNDICE B



Fonte: Autora, 2019. *Print screen* do complemento iCOR (VITO REMOTE SENSING UNIT, 2019)

Ainda que a configuração padrão de estimativa de AOT tenha sido aplicada no momento de executar o algoritmo para todas as seis imagens usadas, o iCOR falhou no caso de duas imagens de entrada: do dia 27/02/2019 e do dia 24/03/2019. Nessas duas em específico, foi necessário definir um valor fixo de AOT constante na própria documentação do iCOR, que foi 0,1.

4.6.3 Case 2 Regional CoastColour processor – C2RCC

Desenvolvido por Doerffer e Schiller (2007) em sua primeira versão, que teve melhorias com o projeto CoastColour (www.coastcolour.org), o Case 2 Regional CoastColour Processor (C2RCC) utiliza uma grande base de dados de simulações de transferência radiativa de radiancias emergentes da água (sinal vindo da água), bem como reflectâncias de TOA, através do modelo numérico HydroLight (MOBLEY, C D; SUNDMAN, 2008). Este modelo resolve a equação da transferência radiativa para calcular a distribuições de radiancias e elementos relacionados –

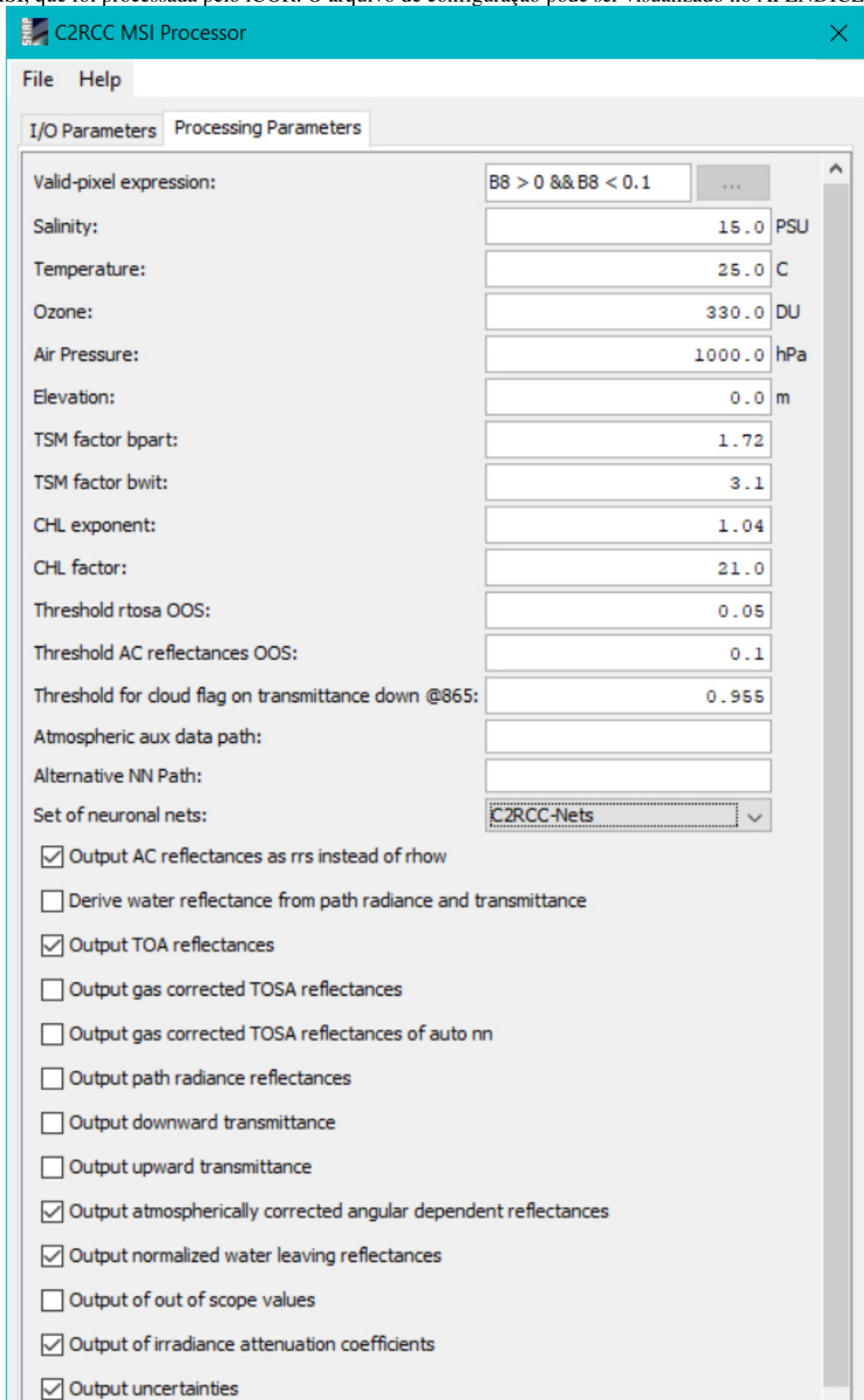
irradiâncias, reflectâncias e outros – em qualquer corpo d’água. Uma de suas funções é computar, então, a radiância emergente da coluna d’água ρ_{ω} e reflectância de sensoriamento remoto R_{rs} . Redes neurais são treinadas como tecnologia de processamento para realizar a inversão desses sinais e estimar propriedades ópticas inerentes ao corpo d’água estudado, além de concentrações de Chl-a e SST (BROCKMANN *et al.*, 2016). O modelo atmosférico presente no C2RCC (LENOBLE *et al.*, 2007) conta com propriedades ópticas de aerossóis derivadas de medições com o Aerosol Robotic Network (AERONET-OC) , equipamento da NASA, e para maior eficiência computacional o modelo foi relacionado com diversas tabelas *Look-Up* (LUTs). Ao contrário do iCOR e do Sen2Cor, a aquisição de AOT é feita por uma fonte externa, e não derivada do produto de entrada. O processador conta ainda com mecanismos internos de checagem de qualidade da reflectância calculada (BROCKMANN *et al.*, 2016).

Além da configuração normal para estimativa de COAs, existe um conjunto de redes neurais que foram treinadas para faixas extremas de absorção e espalhamento, denominado C2X; Neste trabalho, no entanto, foi utilizado o modo normal, intitulado C2RCC-Nets (escolhido dentre as duas opções em “Set of neuronal nets”, ver **Figura 16**).

Não foram identificados artifícios do C2RCC para correção do efeito da radiância de alvos vizinhos (adjacência).

O arquivo de entrada deve ser de uma mesma resolução para todas as bandas, então primeiramente foi aberto o arquivo de extensão .xml na própria área de trabalho do SNAP/ESA, e em seguida submeteu-se o produto à reamostragem para resolução espacial de 60m. Após reamostragem, o produto foi inserido na aba I/O Parameters (da janela da **Figura 16**) como entrada para o processamento.

Figura 16-Janela de execução do complemento C2RCC com as configurações aplicadas neste trabalho. Na aba I/O Parameters, foi previamente inserido o arquivo de extensão .xml correspondente à imagem bruta do MSI, que foi processada pelo iCOR. O arquivo de configuração pode ser visualizado no APÊNDICE C.



Fonte: Autora, 2019. *Print screen* do complemento C2RCC para SNAP (BROCKMANN *et al.*, 2016)

Como parâmetros de entrada, podem ser inseridos valores de salinidade, temperatura, ozônio, pressão atmosférica, elevação e outros. Neste trabalho, os parâmetros de entrada adotados seguiram a configuração padrão, sendo modificados apenas os valores de salinidade e temperatura para, respectivamente, 15 PSU e 25°C, correspondentes ao CELMM. Para que fossem retornadas reflectâncias de sensoriamento remoto no lugar de reflectâncias da água, foi necessário marcar a caixa “Output AC reflectances as rrs instead of rhow”.

Durante seu processamento, o C2RCC gera para cada imagem uma máscara de qualidade que considera válidos os pixels que atendem a uma determinada condição —.por padrão, a condição é a expressão $Rrs(B8) > 0$ e $Rrs(B8) < 0,1$. A partir daí, após processamento, apenas as reflectâncias que atendem a essa condição é que são fornecidas. Aqui, foi utilizada a expressão padrão. Com esse controle de qualidade do C2RCC, parcela dos pixels são descartados, logo a quantidade de pontos de campanha disponíveis para validação é reduzida.

A função de estimativa de concentrações de COAs não foi explorada neste trabalho, apenas as máscaras de qualidade e a própria reflectância de sensoriamento remoto processada.

4.7 Validação dos algoritmos de correção atmosférica

4.7.1 Extração dos valores de reflectância

Após cada processamento, os valores de Rrs foram extraídos de uma janela de 1 pixel × 1 pixel da imagem de saída com a ferramenta *Extract Pixel Values* do SNAP/ESA. Para isso, foram inseridas as coordenadas dos pontos da campanha correspondente (que é de data igual ou mais próxima possível à da passagem do satélite). O mesmo procedimento de extração foi feito para os produtos de nível 1C (TOA) para posteriores comparações.

4.7.2 Distinção de pixels válidos

O iCOR e o Sen2Cor fornecem reflectância da água (ρ_{ω}), então foi feita a conversão para Rrs (MOBLEY, 1999):

$$Rrs = \frac{\rho_{\omega}}{\pi} \quad \text{Equação 6}$$

Para a validação dos métodos de CA sobre o CELMM, foi feita, então, a separação dos pixels válidos para análise em relação aos demais. Para isso, foram aplicados manualmente dois filtros de qualidade:

- *opaque_clouds_60m*: máscara de cobertura de nuvens opacas de 60 m de resolução espacial. Os pixels de nuvens tinham valor 1, e os sem nuvens, valor 0.

Selecionado: valor 0.

- *quality_scene_classification*: mapa de classificação de cena gerado como subproduto do próprio processamento com Sen2Cor. Os valores dos pixels variam de 0 a 11 de acordo com a classificação – os classificados como exclusivamente água tinham valor 6. Por ser mais um indicador de qualidade mais conservador do que o mencionado anteriormente, por abranger sombras de nuvens e outros elementos indesejados, foi aplicado de maneira complementar.

Selecionado: valor 6.

A classificação de cena feita para o sensoriamento do dia 20/10/2018 apresentou falhas na identificação da água em toda a cena, identificáveis visualmente por serem grosseiras, então foi feita a identificação de nuvens por inspeção visual. Uma outra abordagem que pode ser testada é o uso do IdePix, ferramenta externa de classificação de cena também disponível no software SNAP/ESA, já usada como indicador de qualidade em outros estudos de validação (ANSPER; ALIKAS, 2019; WARREN *et al.*, 2019)

Todos os filtros de qualidade aplicados para a validação são oriundos de produtos de saída das próprias ferramentas aqui usadas e, quando não, do arquivo bruto de metadados de nível 1C. Isso permite uma avaliação mais direcionada para o próprio funcionamento dos processadores (quando aplicados) dentro do seu escopo de atuação. Não foram aplicados métodos complementares exclusivos para identificação e/ou remoção de pixels contaminados por *sun glint* ou outros fenômenos, permitindo que o maior número possível de pontos fosse usado na validação

Após os procedimentos descritos anteriormente, juntamente com os do item 4.3, 81 pontos foram considerados para validação de um total de 161 pontos visitados em campo, somando os da Mundaú e da Manguaba (**Tabela 3**):

Tabela 3 – Campanhas efetuadas juntamente com a quantidade de pontos visitados e os que foram efetivamente considerados na validação (após controle de qualidade)

Data da campanha	Quantidade de pontos visitados	Pontos considerados na validação
22/03/2018	20	4
22/05/2018	15	11
23/05/2018	18	13
06/08/2018	18	13
25/10/2018	18	13
26/02/2019	18	11
27/02/2019	18	9
24/03/2019	18	2
23/03/2019	18	5
TOTAL	161	81

Fonte: Autora, 2020

4.7.3 Correlação entre Rrs de satélite e Rrs simulada

Para cada banda trabalhada, isto é, da banda B1 a B8A – excetuando-se a banda B8 para os processadores que não geravam essa banda como saída – foram montados gráficos de correlação entre Rrs de satélite \times Rrs simulada, sendo Rrs de satélite aquela provinda do sensoriamento pelo MSI - com ou sem o processamento de um algoritmo de CA.

Para uma avaliação geral do CELMM, tomou-se as medianas de cada banda espectral e foi feita uma correlação entre duas séries de medianas: de satélite \times *in situ*. As medianas foram usadas em virtude da grande quantidade de curvas espectrais resultantes das medições, então a série de medianas funcionaria como uma curva espectral única (curva espectral central). Esta curva pôde, então, ser comparada a reflectâncias oriundas de satélite (também na forma de curva espectral central), e a correlação serviu como uma medida da similaridade do formato espectral entre medianas.

Após remoção de outlier, foram calculadas as métricas para avaliação da performance de cada algoritmo, bem como da não-utilização de um algoritmo, sendo elas o coeficiente de determinação (R^2) e Raiz do Erro Médio Quadrático (ou RMSE) em porcentagem, ao passo em que foi consultada a literatura do ramo do sensoriamento remoto em busca das variáveis ambientais que costumam interferir na performance desses algoritmos em águas interiores com características de turbidez. A análise estatística e geração de gráficos foi feita com linguagem

Python (versão 3.8, Python Software Foundation, <https://www.python.org/>) no ambiente de desenvolvimento virtual Spyder (<https://www.spyder-ide.org/>) e Microsoft Excel.

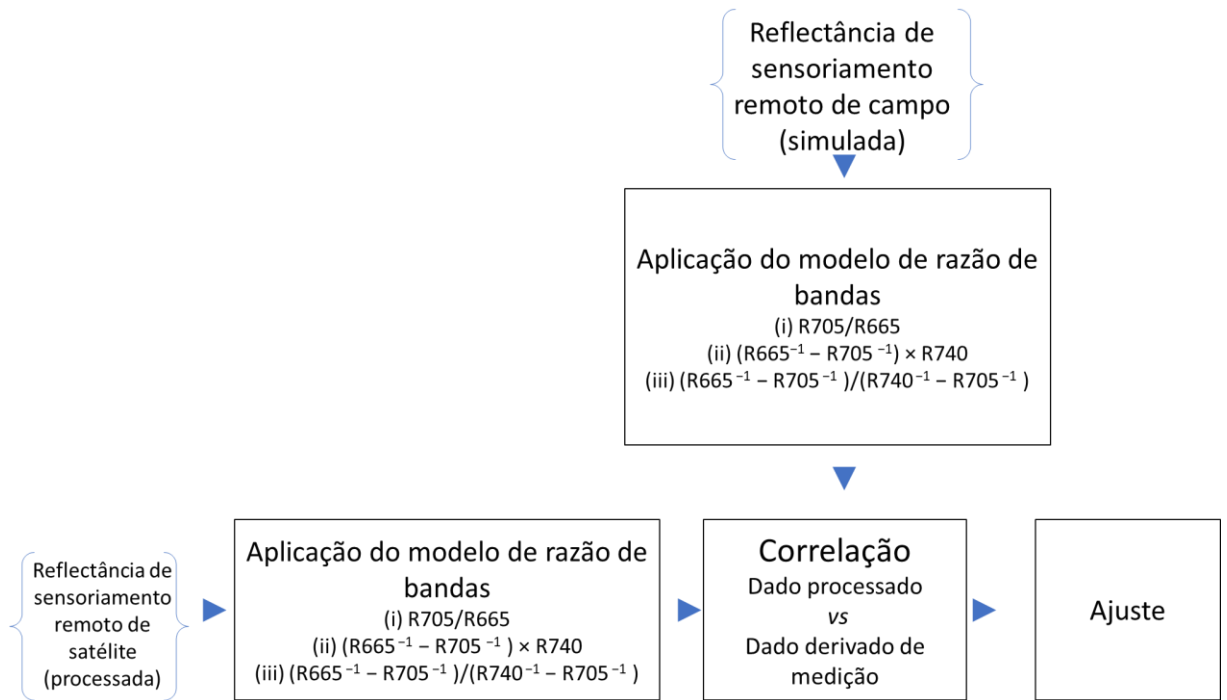
4.7.4 *Aplicação de modelos de razão de bandas adaptados ao MSI*

A literatura conta com diversas aplicações de modelos de razão de bandas para estimativa de Chl-a, CDOM e SST (BREZONIK; MENKEN; BAUER, 2005; GITELSON; SCHALLES; HLADIK, 2007; HOGE; WRIGHT; SWIFT, 1987; O'REILLY *et al.*, 1998), inclusive em lagos pequenos (ANSPER; ALIKAS, 2019; GITELSON, 1992; TOMING *et al.*, 2016), e de turbidez moderada a elevada (GITELSON *et al.*, 2009). No caso de Chl-a em águas túrbidas e produtivas, estudos demonstraram melhor performance dos modelos que usam bandas no NIR e no vermelho, chamados modelos NIR-Red (DALL'OLMO; GITELSON, 2005), seja usando 2, 3 ou 4 bandas. Além do uso dos modelos em comparações com concentrações medidas de COAs, podem ser feitas adaptações desses modelos às bandas de satélites (GITELSON *et al.*, 2009; MOSES *et al.*, 2009).

No CELMM, Lins *et al.* (2017) fizeram uma aplicação com bandas simuladas do MSI (a partir de sua FRE), entre outros sensores, e para este sensor foi usado o modelo NIR-Red $Rrs(705)/Rrs(665)$, que usa as bandas B4 e B5 do MSI, sendo observado bom desempenho ($R^2=0,78$) em correlações entre a razão de bandas simuladas e concentração de Chl-a. Assim, no presente trabalho, foi avaliado o potencial de aplicação desse mesmo modelo de razão de bandas adaptado ao MSI, mas com mudanças na abordagem: foram feitas correlações do tipo Razão de bandas simuladas (campo) vs Razão de bandas do satélite (processadas), por meio de ajuste linear.

Além desse modelo, foram testados outros dois modelos constantes na literatura para estimativa de Chl-a em águas túrbidas: um de três bandas (DALL'OLMO; GITELSON, 2005) e um de quatro bandas (LE *et al.*, 2009) usando, além das bandas B4 e B5, a banda B6 do MSI. A metodologia desta etapa do trabalho é ilustrada na **Figura 17**.

Figura 17- Fluxograma da aplicação de modelos de bandas adaptados ao MSI



Fonte: Autora, 2019

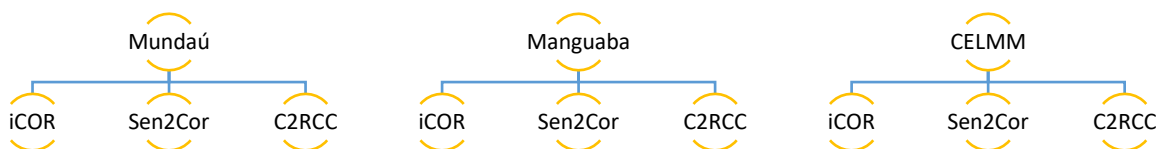
Uma vez que esses modelos têm forma de quocientes, a magnitude da reflectância usada tende a ser menos importante do que o formato da curva espectral (WARREN *et al.*, 2019) e a relação entre Rrs de diferentes bandas, por isso, a discussão neste trabalho foi pautada nesse aspecto.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Validação da reflectância de sensoriamento remoto de satélite

Nesta seção é feita uma análise do comportamento espectral do CELMM resultante do processamento com cada um dos métodos de correção atmosférica. Para efeito de discussão, é avaliado o desempenho de cada algoritmo em um corpo d'água específico.

Figura 18- Fluxograma da abordagem da discussão

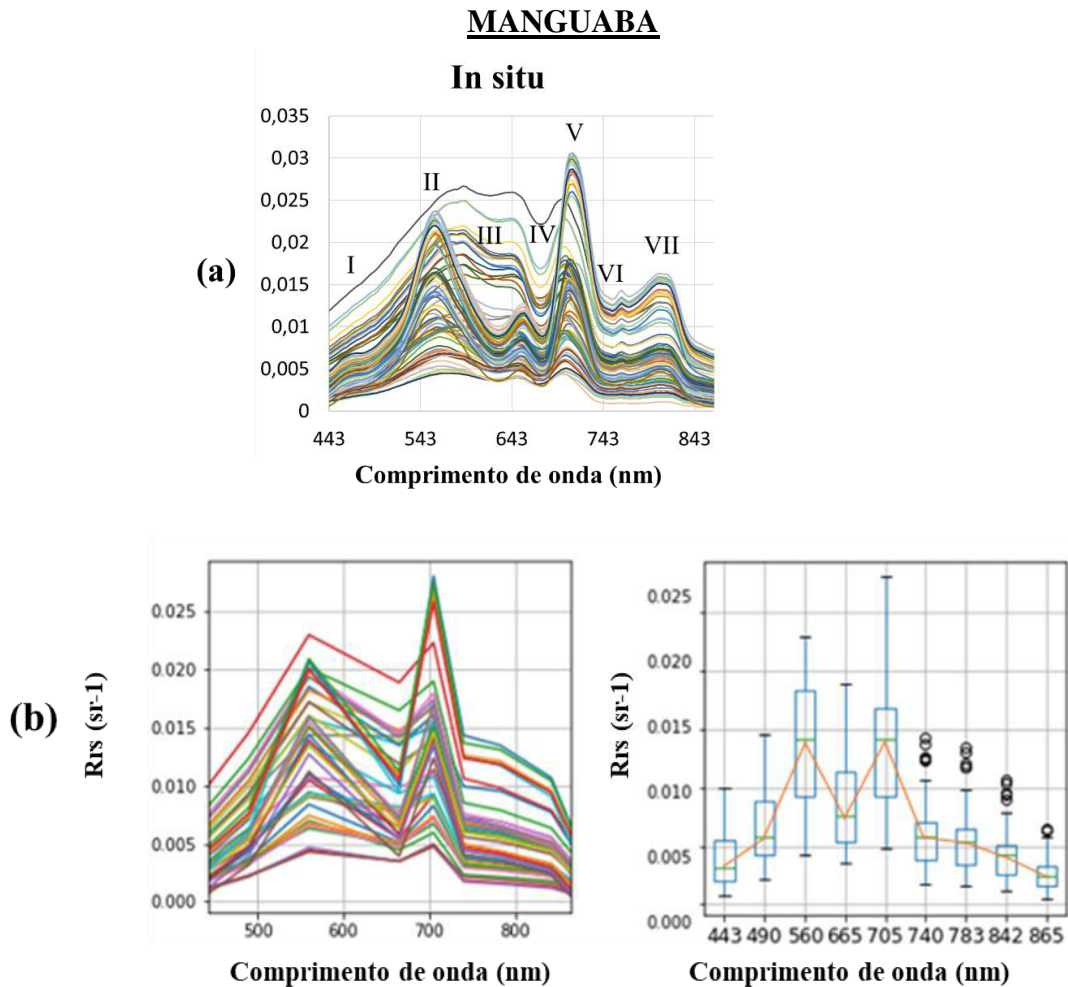


Fonte: Autora, 2019

As curvas hiperespectrais obtidas *in situ* na Manguaba (**Figura 19a**) mostraram comportamento típico de águas turbidas e produtivas de estudos constantes na literatura (DALL'OLMO; GITELSON, 2005; GITELSON; SCHALLES; HLADIK, 2007). Os padrões identificados foram: (I) valores mínimos no azul, entre 400 e 500 nm, atribuídos não só à absorção por pigmentos de fitoplâncton - Chl-a inclusa – como também por CDOM e NAP; (II) um pico no verde (~560) devido à mínima absorção por todos os COAs; (III) uma leve depressão em torno dos 625 nm devido à absorção pela ficocianina, pigmento das cianobactérias (OGASHAWARA; MISHRA; GITELSON, 2017); (IV) uma depressão no vermelho (~675 nm) devido à absorção por Chl-a; (V) um máximo em torno dos 700 nm (posição do *red edge*) devido a um mínimo na absorção total; (VI) redução nas reflectâncias devido à absorção por água pura após 700 nm. Ainda, observa-se um pico menor de reflectâncias em torno dos 810 (VII), atribuído ao efeito combinado de um leve decréscimo na absorção da água pura e retroespalhamento por material particulado (SST) (KUTSER *et al.*, 2016). No caso da Manguaba, o pico dos 700 nm por vezes supera o pico dos 560 nm.

Na abordagem com as bandas simuladas pela FRE do MSI (**Figura 19b**), nem todo o comportamento óptico dos COAs é mostrado pelas bandas simuladas, mas importantes padrões ainda podem ser identificados: I é representado pelas bandas B1 (443 nm) e B2 (490 nm); II é representado pela banda B3 (560 nm); IV é representado por B4 (665 nm); V é representado por B5 (705 nm) e VI equivale à banda B6 (740 nm). A configuração de bandas do MSI não permitiu a representação da absorção da ficocianina, nem do pico aos 810 nm.

Figura 19- Curvas espectrais registradas *in situ* ao longo da Manguaba: (a) reflectâncias na resolução espectral dos radiômetros usados (todos os pontos onde houve campanhas) e (b) reflectâncias nas bandas simuladas do MSI (pontos considerados para validação)



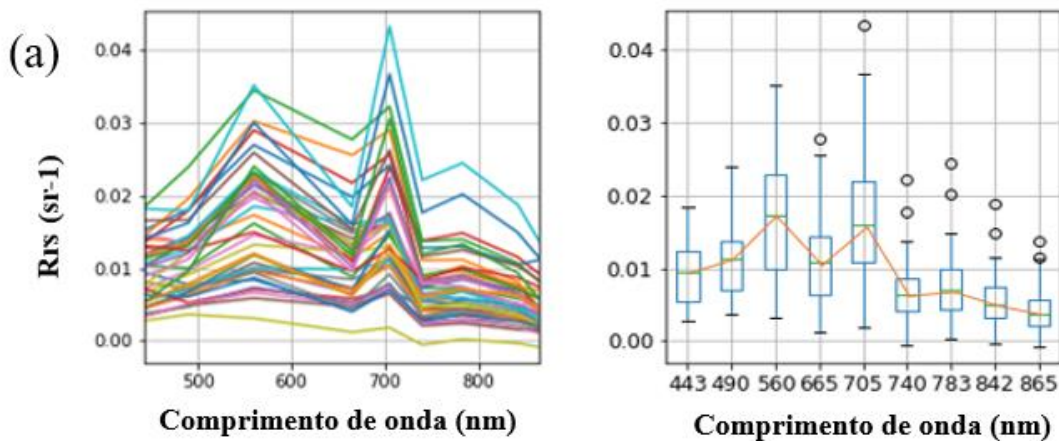
Fonte Autora, 2019

Em relação à Manguaba, os produtos gerados pelos três algoritmos (**Figura 20**) compartilham algumas semelhanças na forma espectral, mas foram as curvas geradas após iCOR e Sen2Cor que apresentaram padrão espectral que mais se aproxima ao das curvas das campanhas *in situ*. Para os três, as magnitudes de Rrs na região do azul (443 nm – B1) foram reduzidas substancialmente em relação ao produto de TOA (**Figura 21**). Visivelmente, o iCOR e o Sen2Cor provocaram os mesmos picos de reflectância nas bandas centradas em 560 nm, em 665 nm e em 705 nm, isto é, no verde, do vermelho e do NIR, o que é de grande interesse para a estimativa de Chl-a em águas do Caso 2. O C2RCC derivou curvas com características mais distintas das curvas *in situ* e, como consequência, do padrão espectral dos outros dois algoritmos. Este algoritmo ignorou a absorção aos 665 nm existente na medição *in situ*. Apesar de haver um decréscimo evidente a partir dos 560 nm, não houve o mesmo pico de reflectância observado em campo, e discutiremos as hipóteses que levaram a isso.

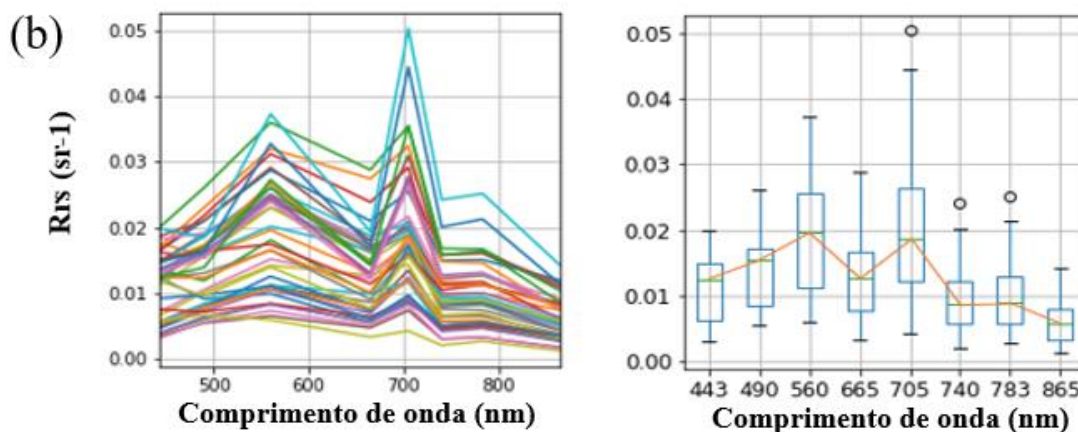
Figura 20 - Curvas espectrais de reflectância de satélite sobre a Manguaba para cada um dos algoritmos testados: (a) iCOR, (b) Sen2Cor e (c) C2RCC. Os gráficos são do tipo Reflectância de sensoriamento remoto *versus* comprimento de onda

MANGUABA

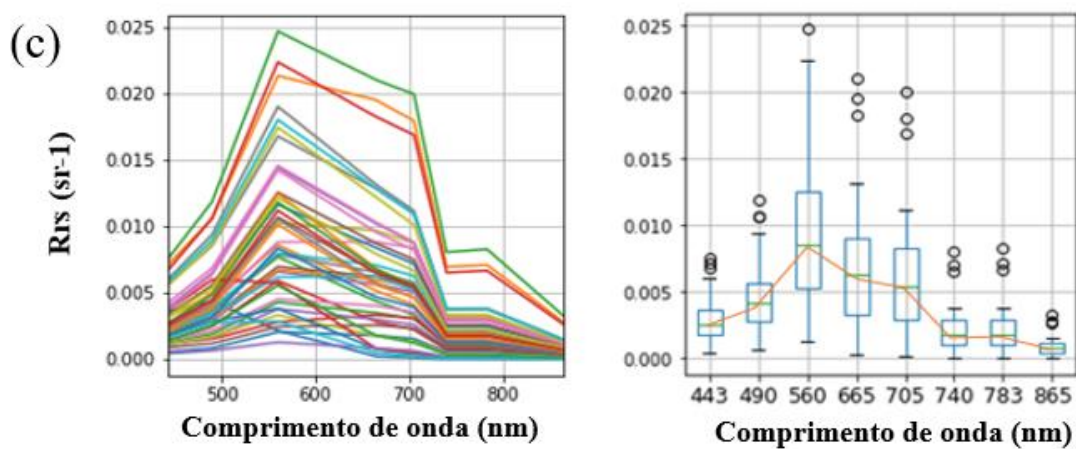
iCOR



Sen2Cor

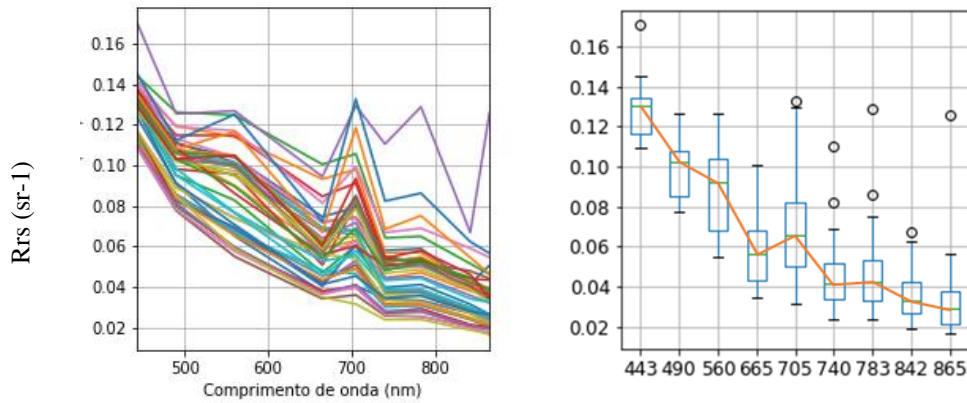


C2RCC



Fonte: Autora, 2019

Figura 21- Curvas espectrais extraídas do MSI sem correções (Topo-da-Atmosfera) para a Manguaba

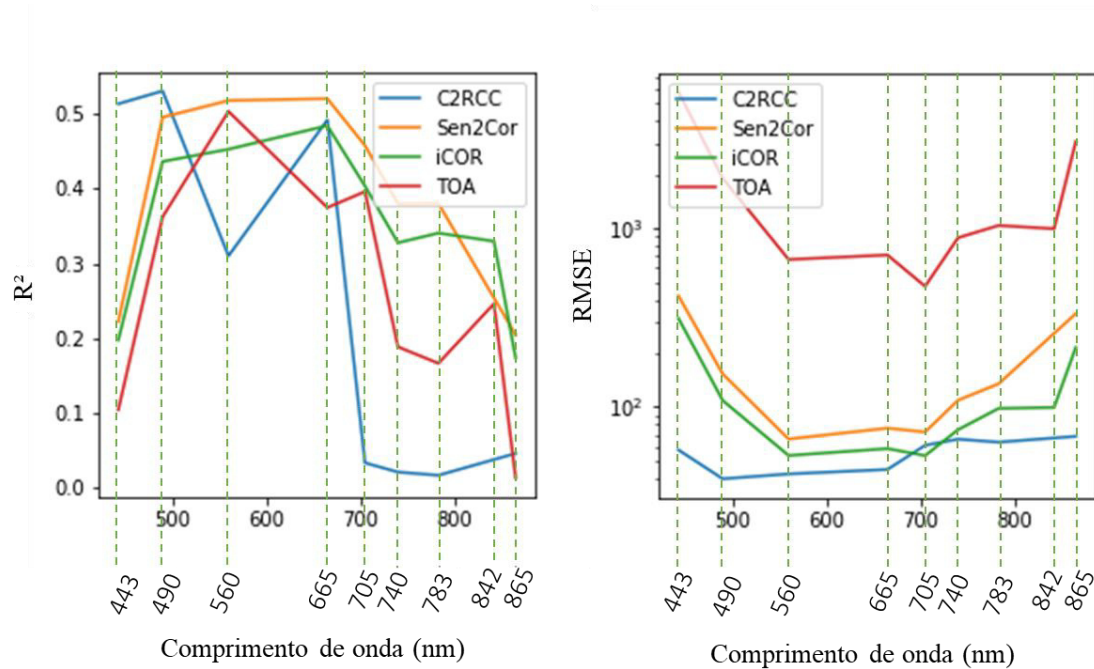


Fonte: Autora, 2019

Em relação às métricas sobre a Manguaba (**Figura 22** e **Tabela 4**), na banda B1 as reflectâncias processadas pelo C2RCC tiveram melhor correlação ($R^2=0,51$) com Rrs simulada (*in situ*) em comparação com a imagem de TOA e com os demais algoritmos. De fato, nessa primeira banda, é retratada uma grande absorção por todos os COAs (ver **Figura 20c**) assim como nas medições (**Figura 19b**). Os algoritmos iCOR e Sen2Cor apresentaram uma maior dispersão nessa região do que o C2RCC. Na banda B2, C2RCC permanece com maior R^2 (0,53), mas a diferença em relação ao Sen2Cor ($R^2=0,50$) e iCOR ($R^2=0,44$) não foi grande. Na banda B3, apenas Sen2Cor ($R^2=0,52$) superou o produto de TOA ($R^2=0,50$), enquanto C2RCC teve menor desempenho ($R^2=0,31$), para o qual houve grande dispersão. Na banda 4, Sen2Cor permaneceu acima dos demais ($R^2=0,52$) e se manteve com os melhores valores de R^2 juntamente com iCOR. Apesar dos picos de R^2 pelo C2RCC aos 490 e aos 665 nm, as quedas na correlação em 560 e, principalmente, em 705 nm, sugerem que a aplicação de modelos bio-ópticos com essas bandas seja feita com cuidado. A capacidade dos satélites Sentinel-2 de trabalhar com essas bandas é importante exatamente por identificar detalhes como esse, pois outros sensores como o OLI podem acabar subestimando o comportamento espectral no *red edge* (por não abranger essa banda) e gerar resultados não representativos. Em resumo, o algoritmo Sen2Cor se destacou em relação aos demais para a laguna Manguaba. Os erros representados pelo RMSE foram os menores para o C2RCC (sendo o menor RMSE=39,69%, na banda B2, e maior RMSE=68,57%, na banda B8A) ao longo de todas as bandas avaliadas exceto na banda B5, onde iCOR teve menor RMSE (53,49 %). Já os maiores erros foram alcançados pelo produto sem correção (TOA), sendo o mínimo RMSE = 474,16%, na banda B5, e o maior RMSE= 5808,78% , na banda B1.

Figura 22- Métricas usadas na avaliação do desempenho dos algoritmos de CA para a Manguaba.

MANGUABA



Fonte: Autora, 2019

Tabela 4- Coeficientes de determinação (R^2) entre Rrs de satélite e Rrs *in situ* simulada (Manguaba). Os reais indicam os valores para os quais o Valor-p<0,05 (maior significância estatística)

MANGUABA

			B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8A
		N	443	490	560	665	705	740	783	842	865
R^2	TOA	44	0,1	0,36	0,5	0,37	0,4	0,19	0,17	0,25	0,01
	iCOR	43	0,20	0,44	0,45	0,48	0,40	0,33	0,34	0,33	0,17
	Sen2Cor	43	0,22	0,50	0,52	0,52	0,46	0,38	0,38	-	0,20
	C2RCC	44	0,51	0,53	0,31	0,49	0,03	0,02	0,02	-	0,04
RMSE (%)	TOA	44	5808,78	1908,67	670,05	710,14	474,16	886,72	1038,77	995,79	3057,21
	iCOR	43	313,86	108,85	53,57	58,55	53,49	74,69	98,24	99,57	215,34
	Sen2Cor	43	419,40	153,17	66,23	76,18	72,50	109,20	134,92	-	333,13
	C2RCC	44	57,55	39,69	42,24	44,75	61,09	66,11	63,60	-	68,57

Fonte: Autora, 2019

O gráfico de RMSE foi inserido aqui para uma maior noção das diferenças de magnitude entre Rrs de satélite e Rrs simulada (*in situ*). É visível a redução dos erros após o processamento de algoritmos de CA. É interessante observar que o C2RCC admitiu os menores erros, seguido de iCOR e Sen2Cor, sem necessariamente admitir maiores correlações. É importante que haja essa redução de valores de reflectância em relação ao produto de TOA uma vez que mais de 80% do

sinal que chega ao sensor é oriundo do espalhamento de aerossóis e gases (PEREIRA-SANDOVAL *et al.*, 2019; WANG, 2010) e é desejável a remoção dessa contribuição, sendo Rrs proporcional ao sinal digital. Porém, para que Rrs de satélite possa ser usada na estimativa de COAs, nos deparamos com razões de bandas, e o mais importante é perceber as diferenças de magnitudes entre as bandas de uma mesma curva espectral do que analisar magnitudes de maneira isolada. Por esse motivo, o conceito de desempenho neste trabalho está sendo mais associado ao R² do que ao RMSE.

As métricas resultantes do processamento dos algoritmos sobre a Mundaú estão na **Tabela 5** e os respectivos gráficos estão na **Figura 23**. Para a Mundaú, o processamento com C2RCC rendeu as melhores correlações da banda B4 (centrada em 665 nm, onde houve R²=0,32) em diante, comparado com os demais algoritmos. Ainda assim, foi uma baixa correlação. Os erros (RMSE) permaneceram os menores em relação à magnitude geral.

Sen2Cor e iCOR não apresentaram boas correlações. O maior R² do Sen2Cor foi alcançado aos 443 nm (R²=0,26), e seguiu decrescendo, até ter um pico na *red edge* aos 705 nm. O maior R² do iCOR ocorreu no azul também (R²= 0,10), e a partir daí também não houve boas correlações.

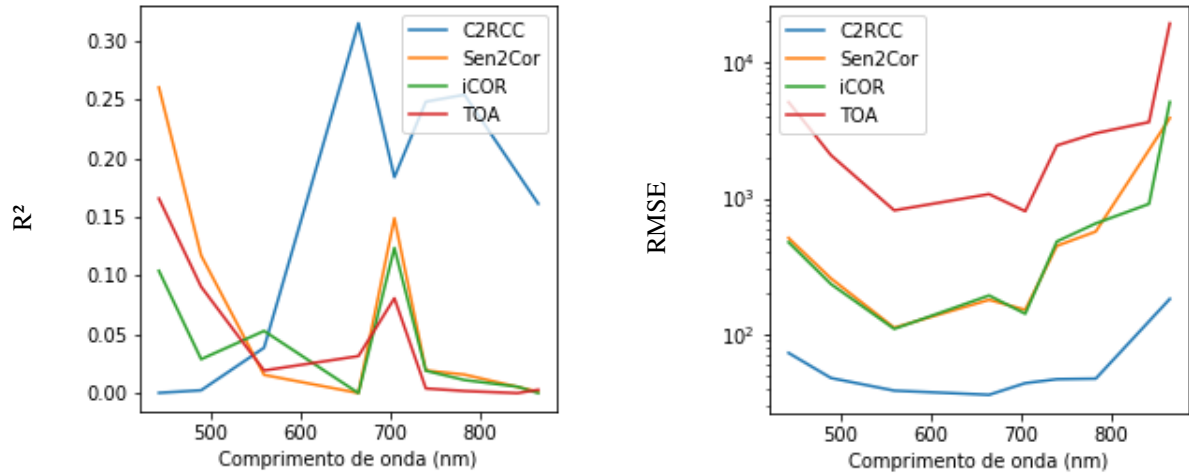
Tabela 5 - Coeficientes de determinação (R²) entre Rrs de satélite e Rrs *in situ* simulada (Mundaú). Os realces indicam os valores para os quais o Valor-p<0,05 (maior significância estatística)

		MUNDAÚ									
			B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8A
		N	443	490	560	665	705	740	783	842	865
R²	TOA	37	0,17	0,09	0,02	0,03	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
	iCOR	37	0,10	0,03	0,05	0,00	0,12	0,02	0,01	0,01	0,00
	Sen2Cor	37	0,26	0,12	0,02	0,00	0,15	0,02	0,02	-	0,00
	C2RCC	37	0,00	0,00	0,04	0,32	0,18	0,25	0,25	-	0,16
RMSE (%)	TOA	37	5101,22	2075,08	815,45	1073,89	803,94	2447,72	3008,11	3634,96	19309,05
	iCOR	37	475,18	234,00	109,64	193,02	141,65	481,91	653,68	909,75	5106,13
	Sen2Cor	37	511,02	257,43	111,85	179,33	151,50	447,28	569,65	-	3892,49
	C2RCC	37	72,99	47,72	38,55	35,92	43,77	46,78	47,19	-	182,08

Fonte: Autora, 2019

Figura 23- Métricas usadas na avaliação do desempenho dos algoritmos de CA para a Mundaú

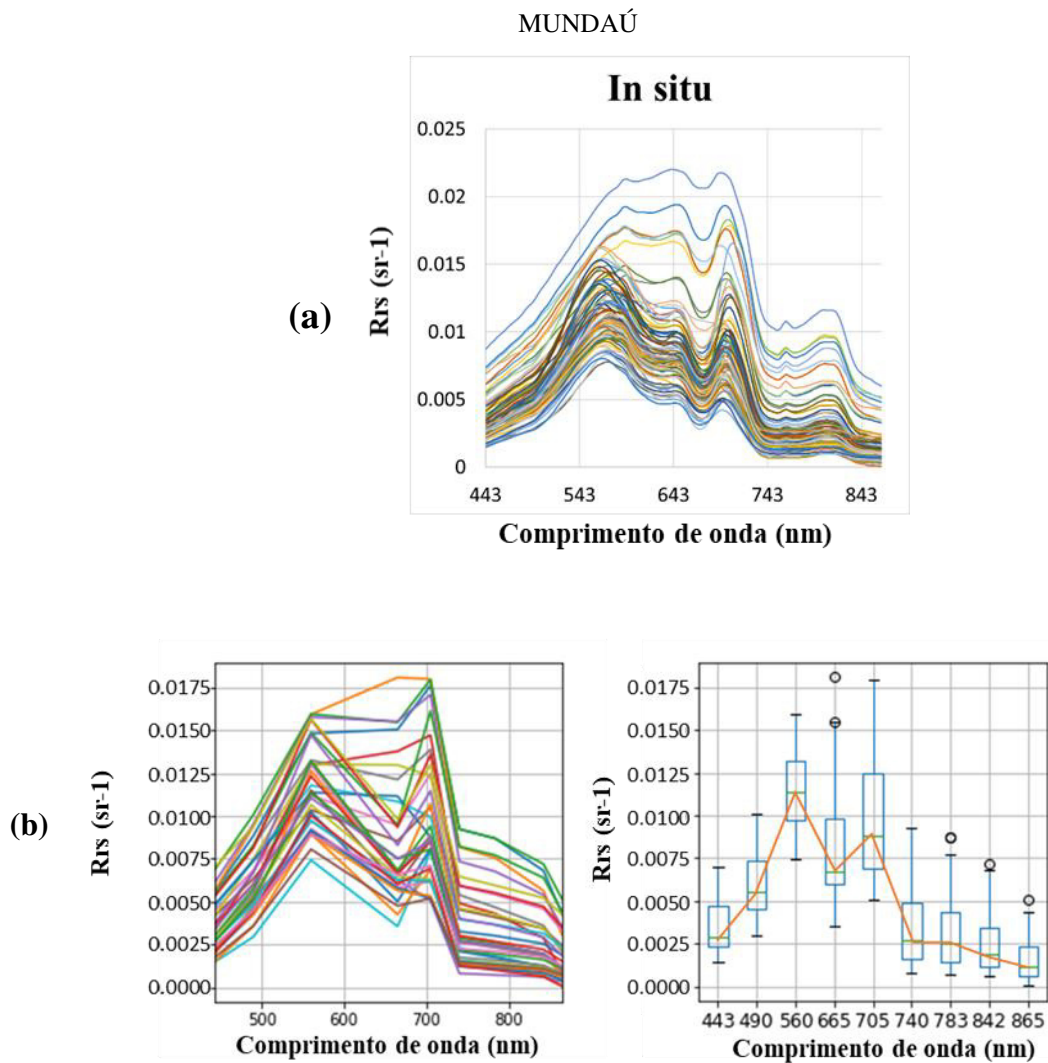
MUNDAÚ



Fonte: Autora, 2019

O comportamento das curvas espectrais *in situ* sobre a Mundaú é retratado na **Figura 24**. A principal diferença das curvas espectrais simuladas da Mundaú em relação às curvas espectrais simuladas da Manguaba ocorre na relação entre os picos de reflectância no verde (B3 – 560 nm) e no *red edge* (B5 – 705 nm), pois na Manguaba o pico em B5 torna, por vezes, mais acentuado do que o pico em B3.

Figura 24- Curvas espectrais registradas *in situ* ao longo da Mundaú: (a) reflectâncias na resolução espectral dos radiômetros usados (todos os pontos onde houve campanhas) e (b) reflectâncias nas bandas simuladas do MSI (pontos considerados para validação)

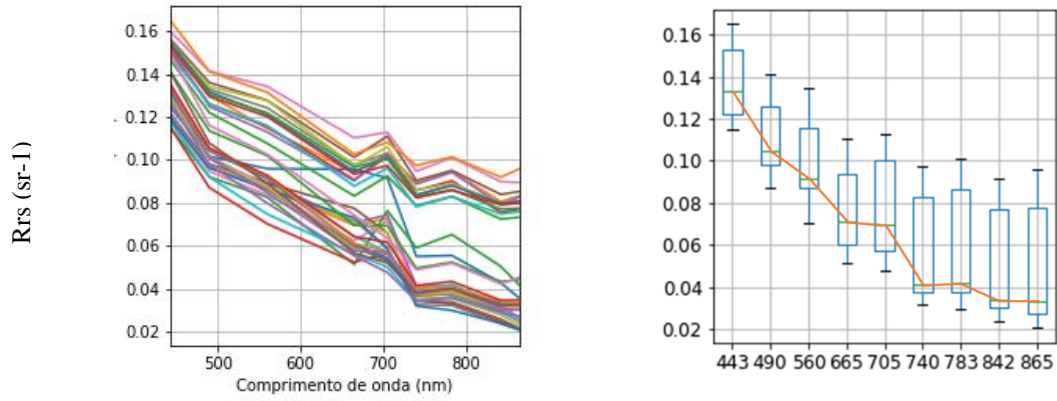


Fonte Autora, 2019

As curvas derivadas do produto de TOA são exibidas pela **Figura 25**. Vemos que em direção ao NIR as curvas espectrais obtidas pelo MSI se dispersam.

Figura 25- Curvas espectrais extraídas do MSI sem correções (Topo-da-Atmosfera) para a Mundaú

MUNDAÚ

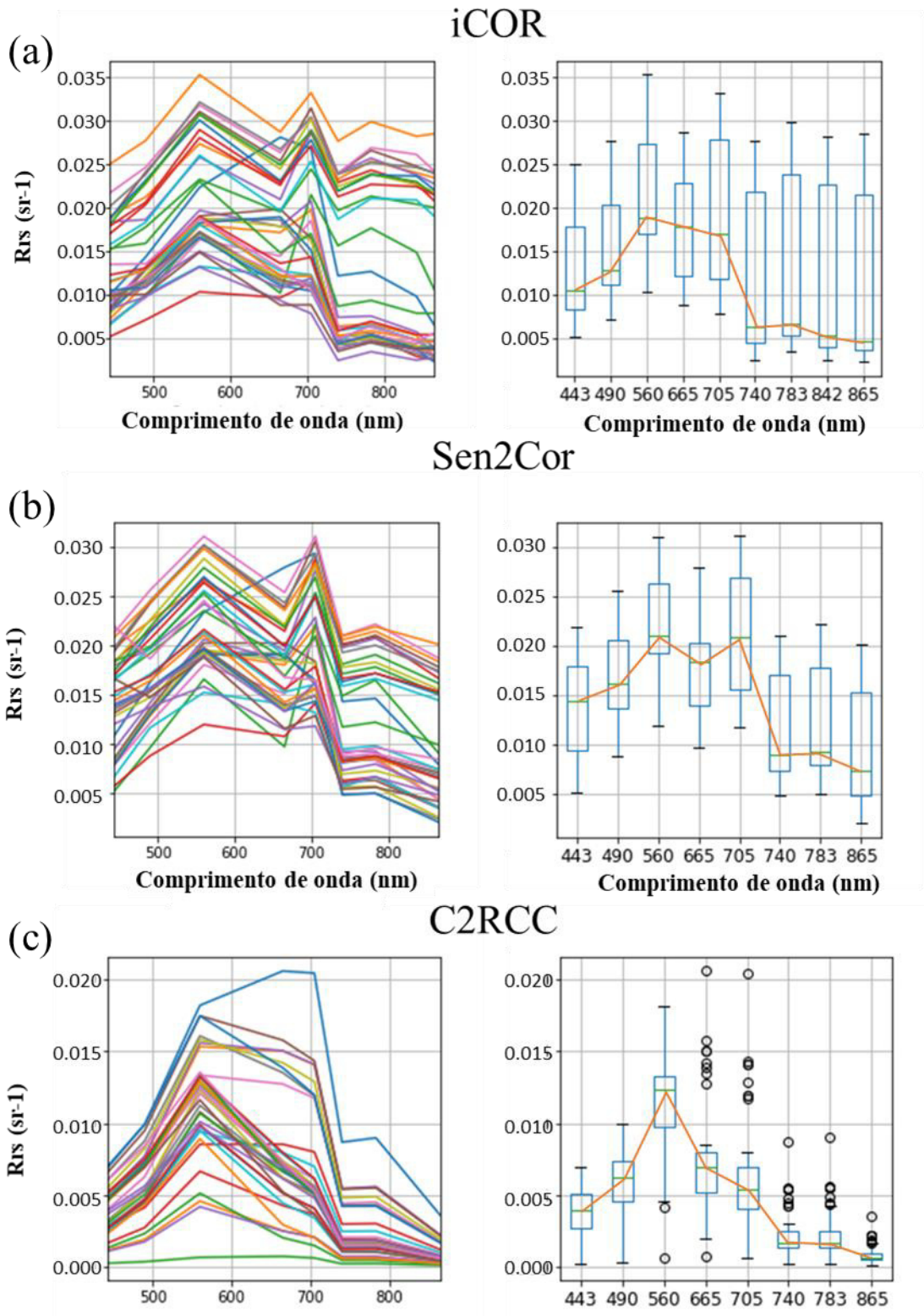


Fonte: Autora, 2019

Após processamento por iCOR, Sen2Cor e C2RCC, foram obtidas as curvas da **Figura 26**. As magnitudes de Rrs na região do azul (443 nm – B1) foram reduzidas substancialmente em relação às do produto de TOA exibidas anteriormente. Os resultados com iCOR e Sen2Cor também mostraram uma dispersão no NIR, e os resultados com C2RCC apontaram dispersão bem menor nessa região.

Figura 26 - Curvas espectrais de reflectância de satélite sobre a Mundaú para cada um dos algoritmos testados: (a) iCOR, (b) Sen2Cor e (c) C2RCC. Os gráficos são do tipo Reflectância de sensoriamento remoto *versus* comprimento de onda

MUNDAÚ



Fonte: Autora, 2019

A contribuição atmosférica dos 400 – 500 nm nas reflectâncias de topo-da-atmosfera foi removida por todos os algoritmos. Isso significa que todos têm capacidade de corrigir o espalhamento de Rayleigh, cuja reflectância é mais alta aos 335 nm no azul e segue decrescendo em direção ao NIR (WANG, 2014, p. 34).

Para a Manguaba, no resultado do iCOR, os incrementos de reflectância no NIR não são tão significantes, e podem estar atrelados ao pico de reflectância existente aos 810 nm no local de medição e que, na realidade, não foi abrangido pelo MSI. Contudo, na Mundaú, esses incrementos são mais acentuados, havendo ainda dispersão muito maior do que a medida. Nessa laguna, especialmente aos 783 nm, esses incrementos podem ser associados num primeiro momento à reflectância oriunda de vegetação nativa que sofreu espalhamento e atingiu o sensor. É exatamente no NIR onde a vegetação reflete mais (STERCKX, S. *et al.*, 2015; STERCKX, SINDY; KNAEPS; RUDDICK, 2011). Com isso, podemos considerar uma falha no iCOR em minimizar esse efeito de adjacência. Analisar-se-á o mecanismo do SIMEC mais adiante.

Após o Sen2Cor, a Manguaba também teve suas reflectâncias incrementadas na banda dos 783 nm (B7), menos pronunciada do que o iCOR. Ainda que a banda B8 tenha sido omitida pelo iCor, a percepção de um leve incremento na Rrs do infravermelho não foi prejudicada. Novamente, percebemos a ausência de uma banda centrada em 810 nm para representar a absorção de água pura e espalhamento de material particulado. Na última banda aqui analisada, B8A, os valores de Rrs convergem para zero, respondendo à grande absorção pela água pura (DALL'OLMO; GITELSON, 2005).

Sendo o CELMM um sistema de águas rasas (OLIVEIRA; KJERFVE, 1993), uma preocupação seria a interferência do fundo sobre o sinal captado pelo MSI. Ocasionalmente, a profundidade óptica aparente (*apparent optical depth* - AOD) da água, também referida como a zona fótica, excede a profundidade real do ponto de medição (LEE *et al.*, 1999; SPITZER; DIRKS, 1987). Quando isso ocorre, o sinal captado pode sofrer influência da reflectância do fundo e ter suas magnitudes aumentadas no NIR.

Entretanto, a elevada turbidez de ambas as lagunas sugere que o efeito dos sedimentos do fundo sejam desprezíveis na reflectância espectral porque a AOD é menor do que a profundidade das águas do CELMM (LINS *et al.*, 2017, 2018) exceto em regiões do Complexo que secam (ilhas). Com isso, sugere-se que a influência de pixel de vegetação adjacentes (ou efeito de adjacência) é mais provável causadora dessa variação de reflectância no NIR do que o fundo. O problema da influência da reflexão da luz por pixels adjacentes já foi observado diversas vezes

em satélites de média e alta resolução, como MODIS ou MERIS, e já se esperava que o MSI fosse afetado por esse efeito por ser um sensor de alta resolução (STERCKX, S. *et al.*, 2015).

O SIMEC, mecanismo de correção de efeito de adjacência do iCOR, considera como verdadeira a hipótese de que o chamado *NIR similarity spectrum* (ou espectro de similaridade do infravermelho) é válido. O *NIR similarity spectrum* teve sua validade testada somente para corpos d'água com concentrações de SST dentro do intervalo de reflectâncias de 10^{-4} a 10^{-1} (RUDDICK *et al.*, 2006), isto é, para concentrações de SST entre 0,3 mg/L e 200 mg/L. Medições de SST feitas no CELMM em 2013, 2015 e 2017 mostraram concentrações de SST variando de 9 mg/L a 61 mg/L (LINS *et al.*, 2018), o que mostra que tanto a laguna Mundaú quanto a Manguaba se enquadram na faixa de validade do SIMEC. Apesar da maior concentração medida na Mundaú (variando de 15,2 – 61 mg/L), esta laguna ainda se situa dentro da faixa mencionada. O *NIR similarity spectrum* não é válido para águas onde ocorre crescimento de macrófitas ou floração de algas, além de águas opticamente rasas onde exista significativa reflexão do fundo no NIR (STERCKX, SINDY; KNAEPS; RUDDICK, 2011). Esta última condição não se aplica ao CELMM, onde não há transparência suficiente para aparecimento do fundo na imagem, devido à própria turbidez; contudo, a floração de algas é um evento frequente na Manguaba e na Mundaú (MELO-MAGALHÃES, 2005), inclusive identificável pelas imagens capturadas, e deve ser considerado pois certamente interferiu no desempenho do SIMEC.

Por inspeção visual, podemos observar que há grande cobertura de nuvens em quatro dos seis produtos do MSI (ver APÊNDICE E) – correspondentes às seguintes datas de sensoriamento: 19/03/2018, 11/08/2018, 27/02/2019 e 24/03/2019. Em três desses, houve falha na estimativa de AOT por pelo menos um algoritmo de CA: nos dias 24/03/2019 e 27/02/2019, tanto o iCOR quanto o Sen2Cor foram processados com o valor padrão de AOT; no dia 19/03/2018, o Sen2Cor utilizou o valor padrão. Convém lembrar que a estimativa de AOT se baseia na presença de pixels de vegetação densa e de solo, e a não identificação de uma quantidade/variabilidade suficiente desses pixels prejudica a aquisição de AOT. As nuvens cobriram parte da formação vegetal que margeia o CELMM. Essas falhas provavelmente conduziram aos erros verificados nas reflectâncias para iCOR e Sen2Cor. Com essa nebulosidade, também não descartamos a hipótese de que as próprias nuvens, que são de maiores reflectâncias, tenham contaminado os pixels adjacentes e atingido o CELMM, que é o objeto de estudo. Se o próprio mecanismo de estimativa de AOT demonstrou dificuldades para encontrar vegetação densa, então o efeito de adjacência de nuvens certamente foi significativo. Ainda que em intensidades diferentes, ambas as lagunas sofreram de efeitos adjacentes.

Apesar de o Sen2Cor contemplar correção de efeitos adjacentes (que é feita por padrão num raio de 1 km), segundo Martins *et al.* (2017) a correção de efeitos adjacentes efetuada pelo Sen2Cor sobre superfícies de baixas reflectâncias é limitada, sendo necessário o desenvolvimento de mais métodos focados em superfícies aquáticas, tendo em vista que o Sen2Cor foi originalmente desenvolvido para aplicações sobre o solo (MAIN-KNORN, 2017).

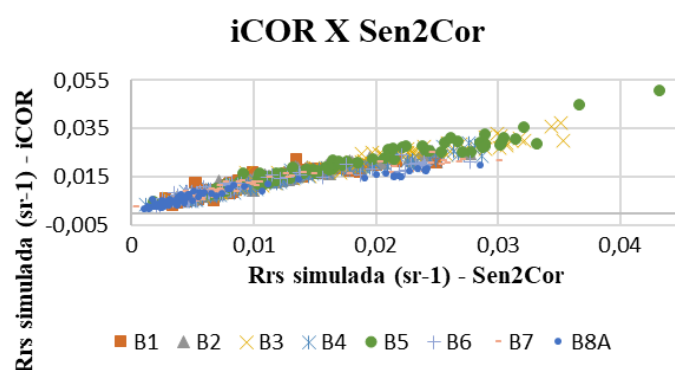
O vento exerce importante efeito nas variações de nível na laguna Manguaba devido ao fato de esta ser alongada, proporcionando, assim, maior pista de vento (*fetch*) (LINS; FRAGOSO JR.; CIRILO, 2013). Quanto às condições meteorológicas locais, as velocidades do vento medidas pela estação automática mais próxima (Maceió- A303, na Universidade Federal de Alagoas) foram inferiores a 5 m/s tanto nos dias de campanhas *in situ* quanto nos dias de sensoriamento pelos satélites Sentinel-2, de acordo com dados do INMET (2019). Partindo desse dado, é razoável inferir que o vento não tenha causado ondas num nível que causasse reflexão especular na direção do MSI. Há chances de ter havido turbulência na água causada por barcos ou outros veículos sobre a água, porém assume-se que não cause agitações de grande magnitude na água, então não consideramos esse efeito no momento de passagem do satélite. Ainda, as imagens de saída, das quais foram extraídas as reflectâncias processadas, são de resolução espacial de 60 m – inferior à de entrada (10 m), e isso negligencia detalhes pontuais.

A reflexão especular também pode ser gerada por determinada angulação dos satélites em relação ao sol (HARMEL *et al.*, 2018; HARMEL; CHAMI, 2013). A própria geometria de visada dos satélites Sentinel-2 torna-os vulneráveis ao efeito do *sun glint* (HARMEL *et al.*, 2018), pois os ângulos de visada são próximos ao nadir e o horário de passagem do Sentinel-2 acarreta maiores ângulos de elevação solar, aumentando a probabilidade de ocorrer *glint*. Neste caso, seria o mais provável fator de reflexão especular dentre as possibilidades (i.e. devido ao ângulo zenital solar ou devido ao *wind stress*). Para verificar essa hipótese, foram conferidas as imagens 1C para observar se em algum momento a água apresentava aspecto prateado e isso não foi encontrado nas imagens com menos nuvens sobre a água 23/05/2018 e 20/10/2018. As nuvens prejudicavam a avaliação visual das demais imagens quanto à presença ou não de *glint*. Ao que tudo indica, trechos mais claros nas lagunas eram provocados pelo próprio espalhamento dos COAs nelas presentes. Com isso, está praticamente descartado o efeito do *glint* neste estudo em específico. Em estudos posteriores empregando imagens da missão Sentinel-2, no entanto, é importante atentar para essa questão da geometria de visada.

Como Mundaú e Manguaba não são tão próximas à linha de costa, foi descartado o efeito adjacente por areia, que é de alta reflectância. Entretanto, para a Mundaú, não foi descartado o efeito adjacente devido à mancha urbana situada a leste. Isso pode ter desfavorecido qualquer processamento na Mundaú, onde vemos reflectâncias muito mais dispersas (ver boxplot - **Figura 26a e b**) do que com o processamento na Manguaba (ver boxplot - **Figura 20a e b**), o que caracteriza grandes incertezas. Na Manguaba a ausência de uma mancha urbanizada às suas margens provavelmente foi vantajosa. Essa laguna está circundada por vegetação escura e densa ao longo de toda a sua extensão (ao contrário da Mundaú), e DDV é o aspecto mais desejável na metodologia de aquisição de AOT empregada por iCOR e Sen2Cor.

É provável que o efeito mais significativo seja das nuvens devido à sua alta cobertura. Inclusive, elas cobriram parte da formação vegetal que margeia o CELMM, além de ter sido constatada falha no mecanismo de extração (e consequente remoção) de AOT para iCOR e Sen2Cor. Assim, para esses dois métodos de CA, as causas maiores de erros podem ter sido o conjunto: falha na extração de AOT + efeito de adjacência. Essa constatação é alimentada pelo fato de o iCOR já contemplar mecanismo de correção de efeito adjacente e ainda assim ter tido erros similares, inclusive, aos do Sen2Cor, que possui um mecanismo distinto (e menos robusto) para tal. Analisamos melhor a existência de similaridades entre iCOR e Sen2Cor por meio de uma correlação entre ambos (com todas as bandas numa única série) e isso resultou em forte correlação linear, visualmente identificável (**Figura 27**).

Figura 27- Correlação entre Rrs de satélite: com Sen2Cor *versus* iCOR



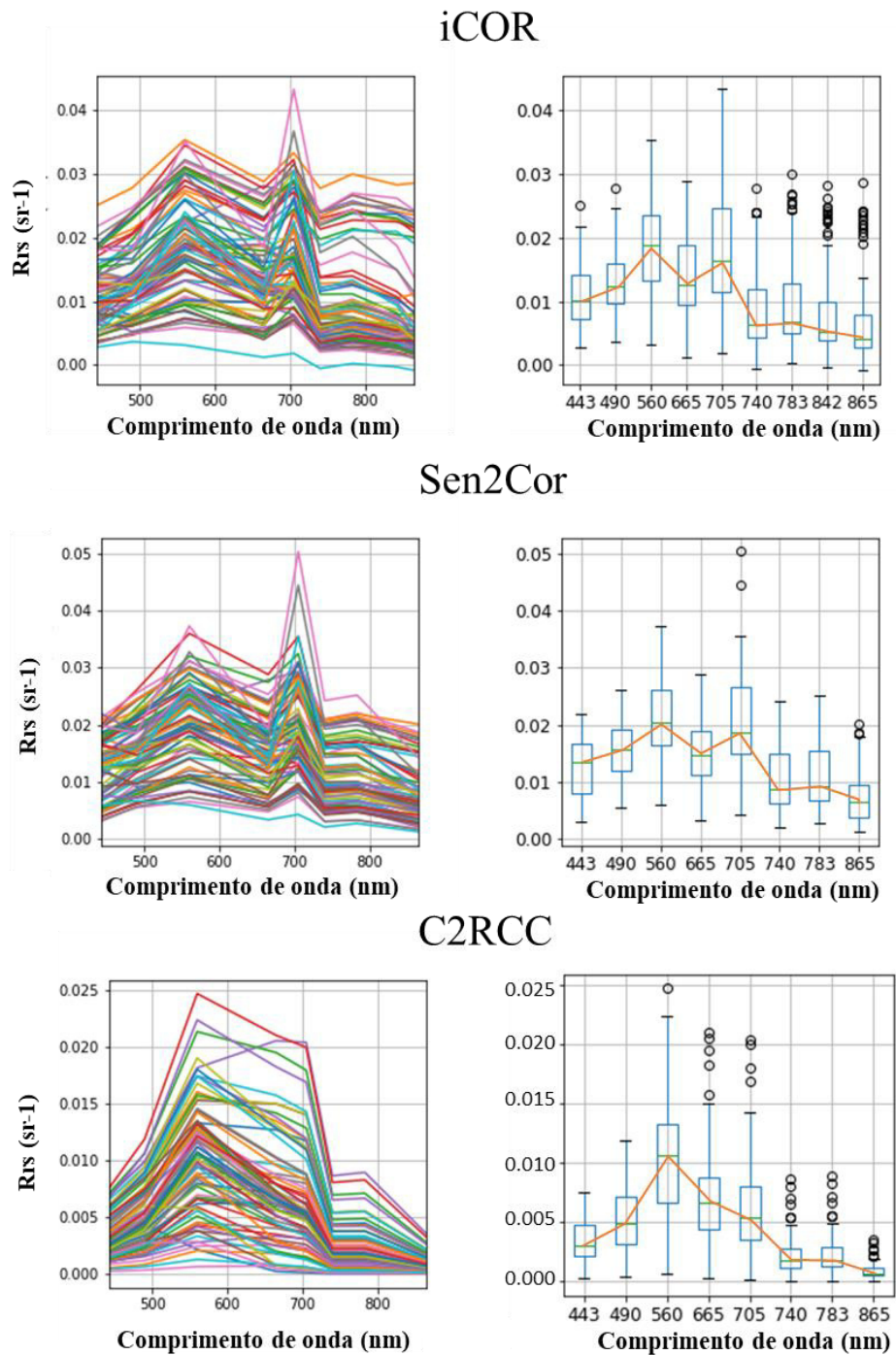
Fonte: Autora, 2020

A vegetação nativa existente em torno do CELMM é uma vantagem para a estimativa da Carga Óptica do Aerossol, pois, para essa finalidade, o iCOR e o Sen2Cor se utilizam de áreas de comportamento espectral conhecido, preferencialmente pixels de vegetação densa (DDV) (MULLER-WILM *et al.*, 2013). Como a maior parte dos produtos 1C usados aqui tinha incidência de nuvens, o Sen2Cor e o iCOR encontraram dificuldades para encontrar esses pixels requeridos

e, assim, estimar AOT. Isso sugere que a validação de algoritmos usando imagens com menor incidência de nuvens sobre a cena do CELMM exerça efeito positivo no mecanismo de minimização de efeito dos aerossóis. Como já foi citado, o desafio é conciliar a realização de campanhas num dia de céu limpo com o dia de passagem do satélite, principalmente num estuário tropical, onde nuvens são frequentes na maior parte do ano. Logo, sugere-se que futuras validações de métodos de CA sejam feitas usando maior quantidade de campanhas para que a quantidade de pontos descartados (devido a nuvens, sombras de nuvens ou outros pontos inválidos para análise) não afete a representatividade dos que restaram.

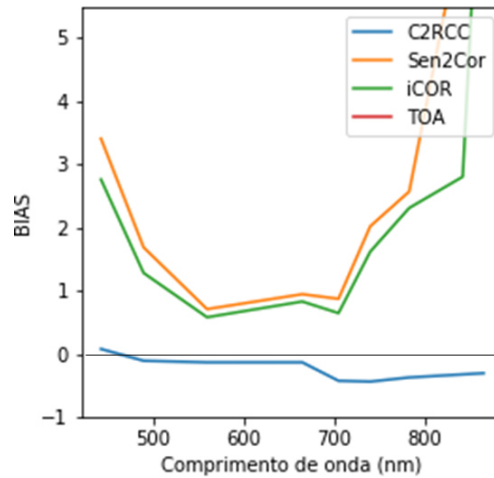
No CELMM (Manguaba+Mundaú), o C2RCC resultou num pico de reflectância aos 560 nm (**Figura 28**), de acordo com as medições realizadas *in situ*. Contudo, sobrecorrigiu (subestimou) a resposta espectral ao longo de todo o visível e NIR, acarretando valores negativos de *Bias* nessa região (**Figura 29**). A hipótese é de que o algoritmo detectou a alta reflectância das nuvens e eliminou sua contribuição ao longo dessas bandas mesmo para os pixels de águas sem nuvens. Ele não possui um mecanismo de correção de efeito de adjacência, tornando-o mais vulnerável à mancha urbana no caso da Mundaú (além das próprias nuvens). Se tiver ocorrido espalhamento por essas adjacências de reflectância maior, houve mais um motivo para o C2RCC efetuar sobrecorreção.

Figura 28- Curvas espectrais de reflectância de satélite para cada um dos algoritmos testados: (a) iCOR, (b) Sen2Cor e (c) C2RCC. Os gráficos são do tipo Reflectância de sensoriamento remoto *versus* comprimento de onda



Fonte: Autora, 2020

Figura 29- Gráfico de *bias* para cada um dos algoritmos aplicados nos pontos do CELMM. O *bias* indica se o método aplicado subestimou ou superestimou a reflectância da água.



Fonte: Autora, 2020

Ansper e Alikas (2019) estudaram a aplicabilidade do sensor S2 MSI ao monitoramento de lagos pequenos com alta variabilidade de COAs e concluíram que o processador C2RCC não é capaz de fornecer resultados acurados em lagos pequenos e estreitos, pois, em seu estudo, os efeitos de adjacência afetaram os pixels próximos à linha de costa. Assim, julgaram necessário o desenvolvimento de métodos de correção de efeitos de adjacência, que podem ajudar a evitar pixels inválidos em meio aos dados de análise (ANSPER e ALIKAS, 2019).

Deve-se atentar quanto às incertezas presentes no sensoriamento via satélite. Podemos citar, dentre as fontes de incertezas existentes, as diferenças entre horário de medições e passagem do satélite, acarretando diferenças na resposta espectral da água, e baixa relação Sinal-Ruído (SNR) do MSI. Um baixo SNR em determinado comprimento de onda pode levar a maiores incertezas na obtenção de sinal nessa banda comparado a um alto SNR (WARREN *et al.*, 2019). Um exemplo de alto SNR ocorre na banda B1. Na região do NIR, onde observamos os maiores erros para o iCOR e Sen2Cor em todo o CELMM, altas incertezas podem ocorrer devido ao baixo SNR do MSI nesses comprimentos de onda. Os valores estimados de SNR para o MSI constam na Tabela 6.

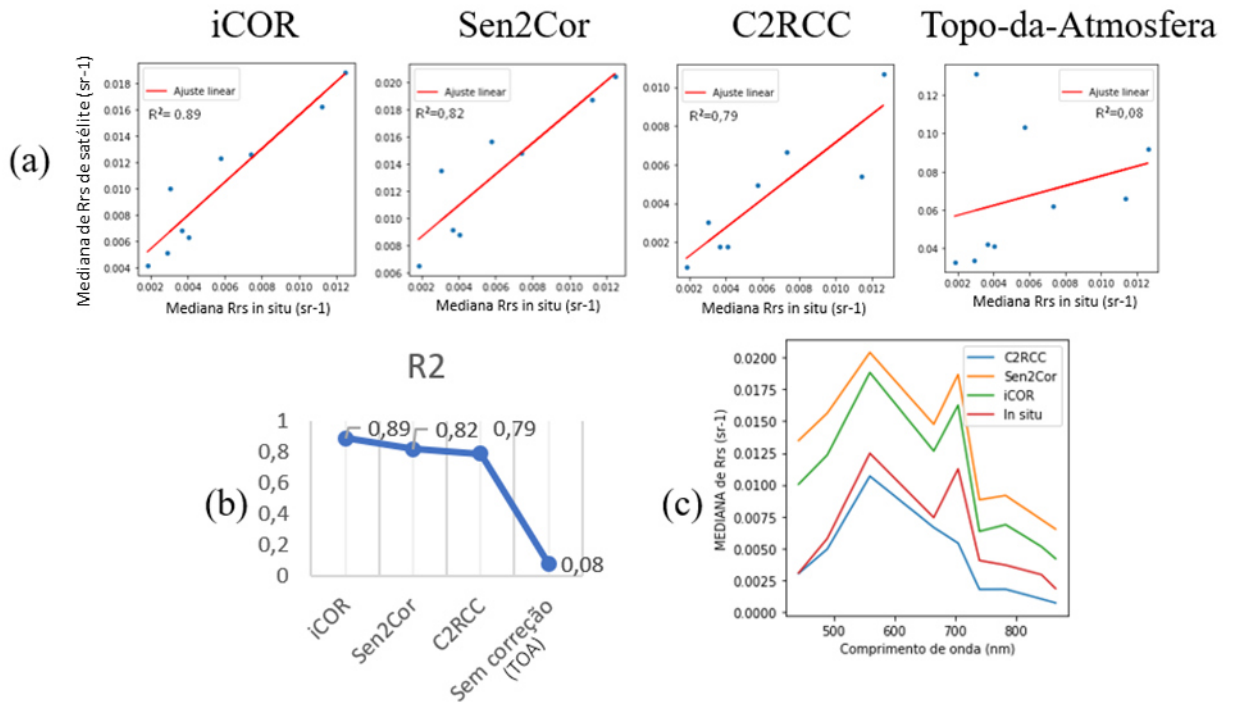
Tabela 6- Performance estimada da razão sinal-ruído (SNR) para Sentinel-2A e 2B na radiância de referência

Banda espectral	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8A	B9	B10	B11	B12
Radiância de referência [W/m ² /sr/μm]	129	128	128	108	75	68	67	103	52.5	9	6	4	2
S2A	1347	211	239	222	246	215	224	216	157	222	391	159	167
S2B	1371	213	242	230	248	223	232	230	169	239	396	166	172
Requerido	129	154	168	142	117	89	105	174	72	114	50	100	100

Fonte: ESA, 2019. Valores de SNR retirados do *L1C Data Quality Report* (06/01/2020 - <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/document-library>)

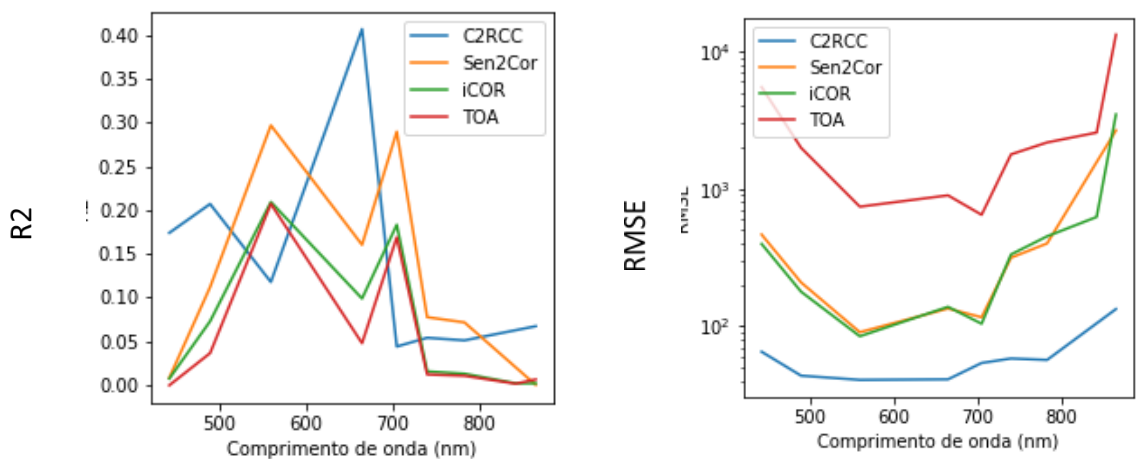
Para uma avaliação geral do CELMM, tomou-se as medianas de cada banda espectral e foi feita uma correlação entre duas séries de medianas : de satélite × simuladas (*in situ*) (**Figura 30**). Nessa avaliação, os resultados do iCOR se sobressaíram ($R^2=0,89$), seguidos do Sen2Cor ($R^2=0,82$) e C2RCC ($R^2=0,79$). A interpretação para isso é que, apesar de Sen2Cor ter tido maior desempenho nas bandas associadas à Chl-a, (ver os picos da linha de cor laranja na **Figura 31**), o iCOR apresentou similaridade mais distribuída entre as bandas (em **Figura 30c**). Ficou evidente que os dados da imagem sem correção atmosférica (TOA) passaram por melhorias após processamento de todos os algoritmos. A sobrecorreção efetuada pelo C2RCC sobre o NIR e o vermelho é também observada para as primeiras bandas do visível, porém em menor intensidade, onde a mediana de Rrs de satélite (corrigida) se equipara à Rrs medida (linhas azul e vermelha).

Figura 30-Em (a), correlações entre as séries de medianas de cada uma das bandas do MSI; em (b), uma comparação entre os coeficientes de determinação resultantes; em (c), gráfico da mediana de cada banda de satélite (reflectância processada) .



Fonte: Autora, 2020

Figura 31- Métricas usadas na avaliação do desempenho dos algoritmos de CA para o CELMM



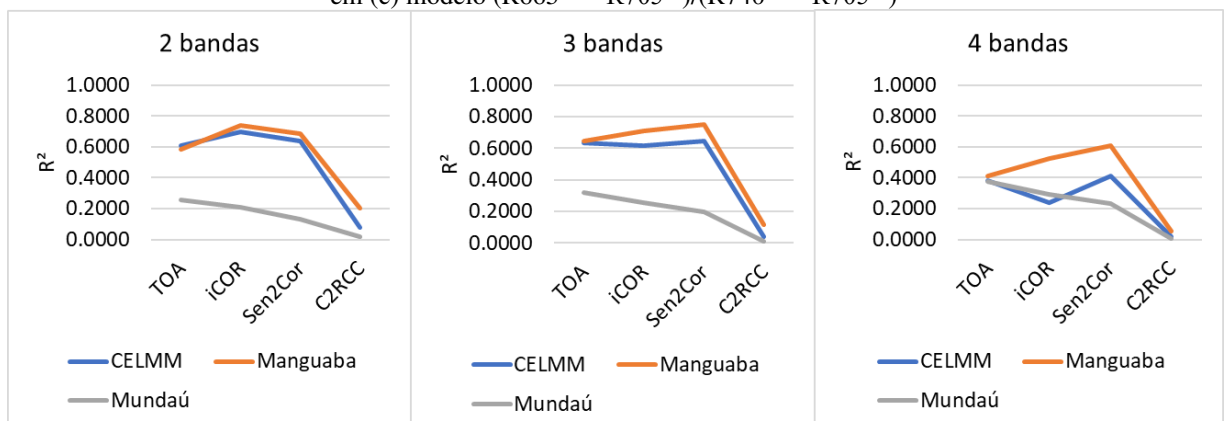
Fonte: Autora, 2020

5.2 Aplicação de modelos de razão de bandas adaptados ao MSI

Na , fixando um modelo de razão de bandas, são exibidos os coeficientes de determinação (R^2) oriundos da correlação entre Razão NIR-Red de satélite \times Razão NIR-Red simulada (*in situ*). Da **Figura 33** até a **Figura 35**, mostramos os mesmos valores de R^2 , mas fixando um corpo d'água: Mundaú, Manguaba ou o conjunto. Todos os gráficos de correlação gerados podem ser consultados no APÊNDICE D.

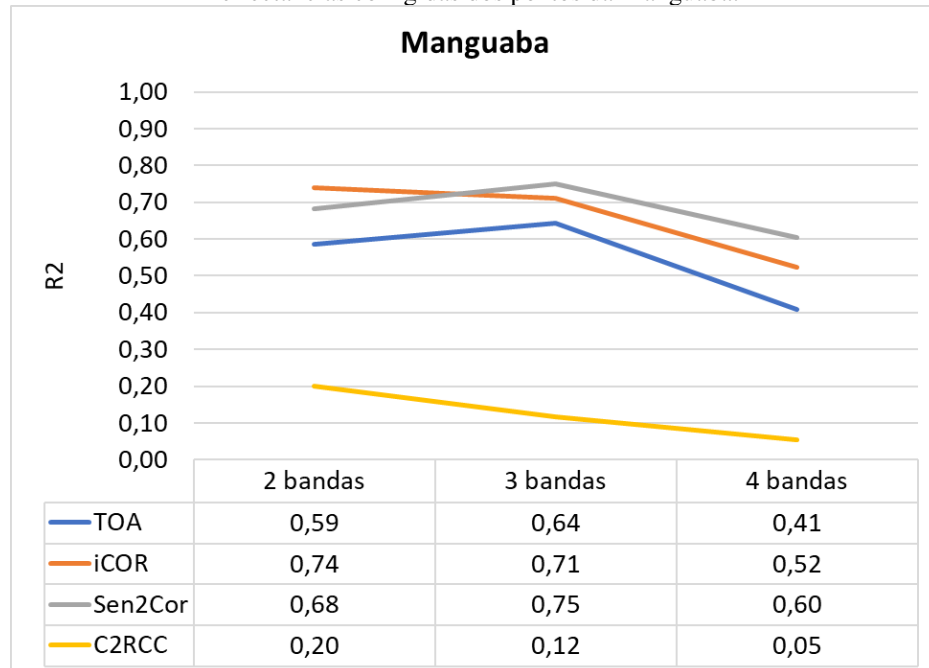
Podemos ver (**Figura 32**) que, de uma maneira geral, a Manguaba (linha de cor laranja) se saiu melhor em todas as abordagens com modelos bio-ópticos NIR-Red, seja usando o modelo de dois, três ou quatro bandas. Isso sugere que na Manguaba tenha havido uma maior similaridade na resposta espectral especificamente no vermelho e no NIR, melhor representando o caráter eutrófico da Manguaba. Sen2Cor e iCOR se saíram melhor no modelo de duas bandas (**Figura 33**), onde o R^2 foi de 0,68 e 0,74 respectivamente. A partir do modelo de 2 bandas, o iCOR já não teve o mesmo desempenho de antes, e isso pode estar atribuído à má correção do efeito de aerossóis manifestada no NIR, pois o modelo de duas bandas não usa a banda do NIR que foi afetada por esse efeito (rever **Figura 20**). Os modelos de três e quatro bandas usam a banda centrada em 740 nm, então esse efeito interferiu na interação entre as bandas de absorção de Chl-a e a consequência foi redução do R^2 para o iCOR. O Sen2Cor aparentemente sofreu menor influência no NIR por efeitos externos, e isso refletiu positivamente nos modelos de três e quatro bandas, onde R^2 foi maior do que para o iCOR.

Figura 32-Coeficientes de determinação (R^2) oriundos da correlação entre Razão NIR-red de satélite \times Razão NIR-Red simulada (*in situ*). As linhas de cores distintas representam o corpo d'água em questão. Em (a) modelo R_{rs704}/R_{rs665} ; em (b) modelo $(R_{665}^{-1} - R_{705}^{-1}) \times R_{740}$; em (c) modelo $(R_{665}^{-1} - R_{705}^{-1})/(R_{740}^{-1} - R_{705}^{-1})$



Fonte: Autora, 2020

Figura 33- Coeficientes de determinação (R^2) oriundos da correlação entre Razão NIR-Red de satélite \times Razão NIR-Red simulada (*in situ*). As linhas de cores distintas representam os métodos de CA que renderam as reflectâncias corrigidas dos pontos da Manguaba.



Fonte: Autora, 2020

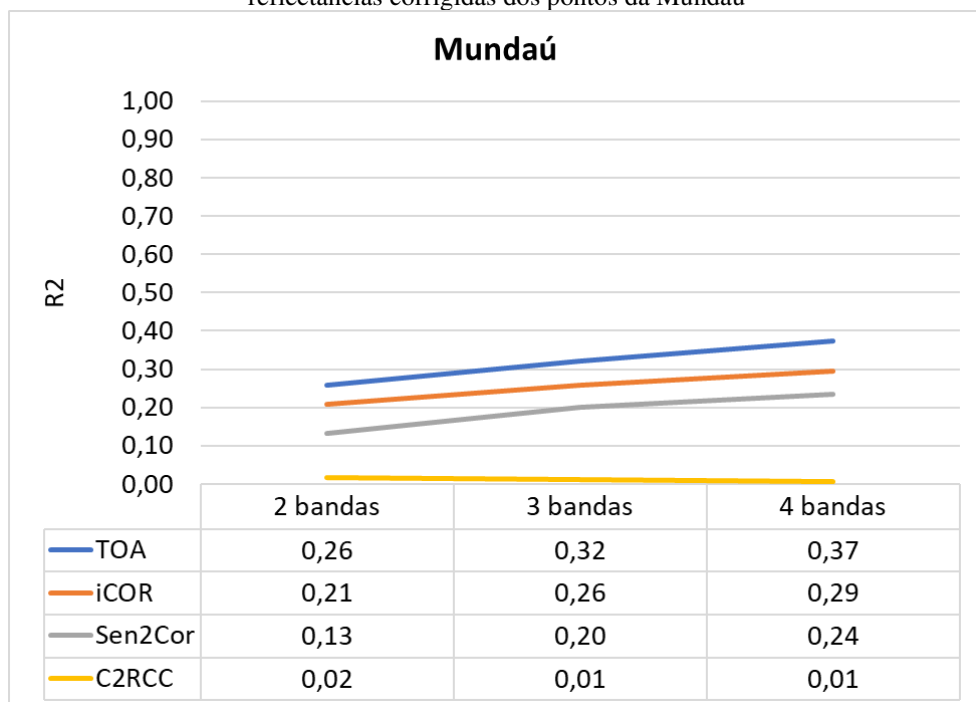
No modelo de três bandas, Sen2Cor teve maior R^2 , que foi de 0,75, enquanto para o iCOR foi de 0,71. Para o modelo de quatro bandas o Sen2Cor se manteve em destaque, com $R^2= 0,60$ enquanto para o iCOR, $R^2=0,52$. Sen2Cor e iCOR mostraram melhor desempenho na aplicação dos três modelos de bandas sobre a Manguaba, superando o produto de nível 1C (TOA) neste caso. Assim, esses algoritmos demonstraram potencial de aplicação sobre a Manguaba e, assim, sobre corpos d'água com forma espectral similar.

Os resultados das razões de bandas com C2RCC não foram satisfatórios. Ao que tudo indica, o fator principal foi falha no próprio algoritmo, pelos motivos já abordados, pois não respondeu ao comportamento espectral de um corpo d'água que já é conhecido por ser eutrófico (Manguaba). Como abordado no item 5.1 do trabalho, o C2RCC ignorou a absorção devida à Chl-a aos 665 nm, que é justamente o comprimento de onda usado nos três modelos bio-ópticos, e foi isso um dos fatores a causar baixas correlações não apenas na Manguaba — onde o produto de TOA superou o produto com C2RCC — mas em todos os gráficos que se seguem.

Em geral, os menores valores de R^2 ocorreram para a Mundaú (**Figura 34**), e isso interfere na avaliação para o CELMM. Para o produto de TOA, $R^2=0,26$ no modelo de duas bandas, e seguiu crescendo até $R^2= 0,37$ no modelo de 4 bandas. Para essa laguna, vemos que a abordagem

sem um método de CA (i.e. TOA) rendeu maiores valores de R^2 e há duas possíveis interpretações para isso: (1) o método de CA não é bem aplicado para águas mais turbidas e menos produtivas ou (2) o método de CA melhor representou as características da Mundaú (menos produtiva) e, por isso, rendeu menores relações entre o vermelho e o NIR, devido a uma menor manifestação da Chl-a no espectro (por estar em menores concentrações) em relação aos outros COAs. Consideramos mais provável a 2ª hipótese, uma vez que as condições atmosféricas sobre a Mundaú e a Manguaba são praticamente as mesmas (i.e. podemos considerar que os níveis de AOT e gases são homogêneos na atmosfera sobre a cena registrada) e porque visivelmente os algoritmos agiram bem sobre a Manguaba, que está dentro do escopo para o qual foram idealizados os modelos NIR-Red — sugerindo que ao menos iCOR e Sen2Cor efetuaram a correção atmosférica proposta.

Figura 34- Coeficientes de determinação (R^2) oriundos da correlação entre Razão NIR-Red de satélite × Razão NIR-Red simulada (*in situ*). As linhas de cores distintas representam os métodos de CA que renderam as reflectâncias corrigidas dos pontos da Mundaú



Fonte: Autora, 2020

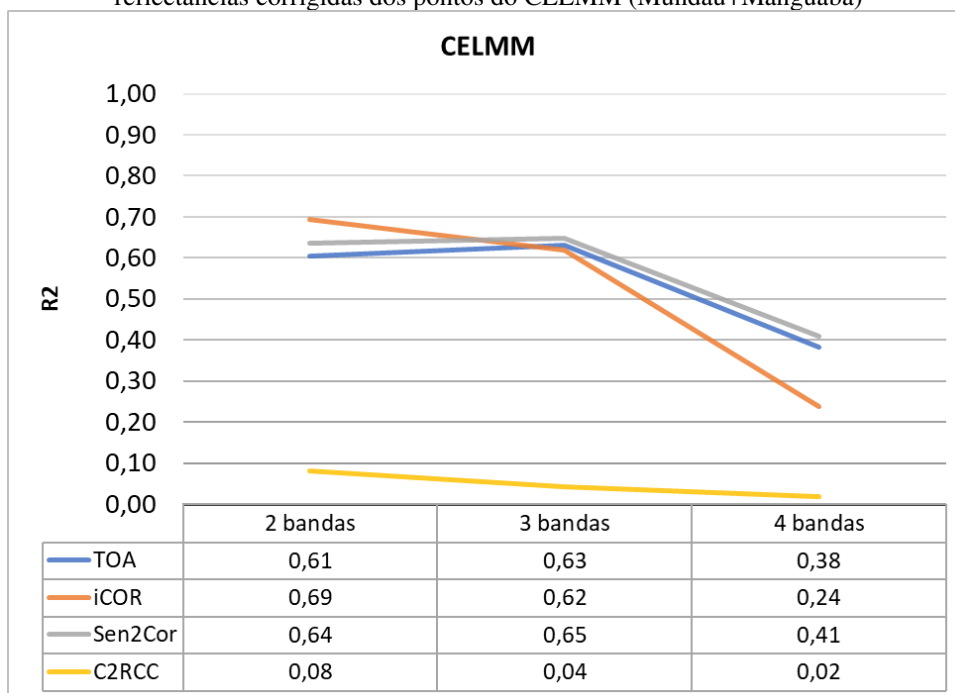
Então, a resposta espectral da água da laguna Mundaú promove um baixo desempenho dos modelos NIR-Red nesse local. Apesar de vermos um menor desempenho para essa laguna de uma maneira geral, ainda foi possível interpretar que o modelo de quatro bandas na Mundaú foi o que rendeu maiores valores de R^2 comparado com os modelos de duas e três bandas (ver **Figura 34**):

em todas as razões derivadas do MSI exceto C2RCC, R^2 aumentava conforme o número de bandas empregado aumentava, tendo o maior desempenho o modelo de quatro bandas.

No caso da Mundaú, para todos os modelos de bandas aplicados, a razão de bandas sem correção atmosférica se destacou dentre as bandas corrigidas, mostrando que as falhas na correção atmosférica atingiram as bandas usadas na literatura para estimativa de Chl-a.

Por conta dessa maior incidência de falhas na Mundaú do que na Manguaba, o CELMM de uma maneira geral (**Figura 35**) assumiu um comportamento intermediário no que se refere à performance dos modelos NIR-Red. O maior coeficiente de determinação foi alcançado com o iCOR na aplicação do modelo de duas bandas ($R^2= 0,69$). O C2RCC permaneceu com as correlações mais baixas para todos os modelos de razão de bandas, sendo praticamente nulas. Na aplicação do modelo de duas bandas, iCOR, Sen2Cor e TOA tiveram desempenho bastante similar, mas no modelo de quatro bandas apenas Sen2Cor ($R^2=0,41$) teve desempenho maior do que a razão de bandas sem correção ($R^2=0,38$), ainda assim bastante próximas, e iCOR teve seu desempenho reduzido significativamente ($R^2= 0,69$ no modelo de duas bandas contra $R^2=0,24$ no modelo de quatro bandas).

Figura 35- Coeficientes de determinação (R^2) oriundos da correlação entre Razão NIR-Red de satélite × Razão NIR-Red simulada (*in situ*). As linhas de cores distintas representam os métodos de CA que renderam as reflectâncias corrigidas dos pontos do CELMM (Mundaú+Manguaba)



Fonte: Autora, 2020

6 CONCLUSÕES

Ainda que a cena capturada pelo MSI tenha apresentado um índice de nebulosidade significativo, foi possível tirar conclusões sobre os mecanismos internos do iCOR, Sen2Cor e C2RCC. Semelhanças entre a correção atmosférica do iCOR e Sen2Cor fizeram com que o comportamento espectral dos dois fosse comum em diversos momentos.

Sen2Cor e iCOR utilizam abordagens parecidas para aquisição de AOT, e esse foi provavelmente o fator de similaridade. A presença de pixels de vegetação ao redor de toda a extensão da Manguaba constitui vegetação densa (DDV) necessária para o mecanismo de AOT, e essa condição fez esta laguna superar a Mundaú no aspecto da correção do efeito de aerossóis. A Mundaú possui uma grande mancha urbana de alta reflectância na margem leste, favorecendo efeito de adjacência ao longo do visível e NIR. Tal efeito não foi satisfatoriamente corrigido pelo C2RCC —que não é contemplado com artifícios para correção de efeito adjacente. As nuvens foram fonte de altas reflectâncias a ponto de provocarem espalhamento em pixels vizinhos, provocando um efeito adjacente próprio e interferindo na aquisição de AOT de Sen2Cor e iCOR pois essas nuvens cobriam pixels de referência para a correção de AOT.

Em resumo, iCOR e Sen2Cor sofreram os efeitos de pixels de alta reflectância adjacentes, seja pela alta cobertura de nuvens ou pelo próprio solo adjacente às águas, e como consequência disso, ainda tiveram falhas para remoção de aerossóis. C2RCC estima AOT de modo distinto, então não foram identificadas falhas nisso mas sim na ausência de uma ferramenta de mesma função que o SIMEC do iCOR, questão já abordada por Ansper e Alikas (2019).

Para o CELMM em geral, o algoritmo de correção atmosférica que obteve maiores correlações foi o iCOR ($R^2=0,89$ para uma avaliação feita entre medianas), seguido do Sen2Cor ($R=0,82$) e C2RCC ($R^2=0,79$). Todos os resultados obtidos tiveram grandes incertezas, e citamos como possíveis fontes o SNR, as diferenças entre passagem do satélite e sensoriamento por radiômetros, ou até as próprias medições de campo.

No intuito de verificar o potencial de uso da missão Sentinel-2 para a estimativa de COAs sobre um sistema estuarino lagunar tropical, foram usados modelos de razão de bandas que estão presentes na literatura, mas de maneira aplicada às bandas específicas do MSI, o que constitui o diferencial deste trabalho.

A aplicação de modelos de razão de bandas NIR-Red sobre a Mundaú não obteve resultados satisfatórios, e isso foi associado aos efeitos atmosféricos sobre as curvas espectrais

oriundas do MSI bem como às falhas na correção atmosférica e supressão de efeito adjacente sobre os pixels dessa laguna. Os melhores métodos de CA agem uniformemente sobre a atmosfera do CELMM e dão a entender que o produto do MSI sem qualquer correção superestimou a real relação existente na Mundaú entre o vermelho e o NIR. Sobre a Manguaba, iCOR e Sen2Cor melhor responderam às medições *in situ* como mostrado anteriormente, chegando a $R^2=0,75$ alcançado pelo Sen2Cor com o modelo de três bandas. Olhando para o Complexo, a razão Rrs704/Rrs665 pelo iCOR foi a que mais se aproximou da razão *in situ*, seguida do Sen2Cor e pelo produto sem correção atmosférica.

Quando da aplicação destes algoritmos em futuros trabalhos, convém testar no iCOR o modo de detecção de vapor d'água a partir da própria imagem, ao invés de deixar o valor fixo que é usado por padrão. Após esse processamento, pode ser feita uma comparação entre a abordagem com e sem estimativa de vapor d'água. Analogamente, a comparação pode ser feita para um produto do Sen2Cor com a correção de nuvens cirros e sem essa correção.

Com essas observações, percebemos que o uso de modelos NIR-Red é útil para a própria avaliação da performance de modelos de CA. Um conhecimento prévio do nível trófico do corpo d'água estudado é necessário, e a medição de concentrações de COAs fornece os subsídios necessários para uma análise crítica do desempenho dos métodos de CA que vão além do uso de métricas. Para a nossa área de estudo, que é o CELMM de um modo geral, foi possível contar com a caracterização feita por Lins *et al.* (2017), que foi recente.

Concluiu-se que há potencial em utilizar a missão Sentinel-2 de uma maneira geral, após processamento de devidas correções atmosféricas – como produto deste trabalho, recomenda-se o uso do Sen2Cor e do iCOR, especialmente sobre áreas livres de nuvens. A realização de mais campanhas é necessária para minimizar o número de pontos descartados no controle de qualidade.

Vale lembrar que, neste trabalho, todas as reflectâncias foram processadas para uma resolução espacial de saída de 60 m. É aconselhável que estudos posteriores processem produtos para uma resolução espacial de 10 m, que é um dos destaques da missão Sentinel-2, apesar de costumeiramente o tempo de processamento ser maior. Num outro momento, convém também investigar o potencial de reamostragens (e.g. para 60m) para diminuir o efeito do ruído do sensor, assunto abordado por Jorge *et al.* (2017).

REFERÊNCIAS

- ANSPER, A.; ALIKAS, K. Retrieval of chlorophyll a from Sentinel-2 MSI data for the European Union water framework directive reporting purposes. *Remote Sensing*, v. 11, n. 1, 2019.
- BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MARTINS, V. S. *Introdução ao Sensoriamento Remoto de sistemas aquáticos: Princípios e aplicações*. 1. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. Disponível em: <www.inpe.br>. Acesso em: 10 jan. 2020.
- BREZONIK, P.; MENKEN, K. D.; BAUER, M. Landsat-based remote sensing of lake water quality characteristics, including chlorophyll and colored dissolved organic matter (CDOM). *Lake and Reservoir Management*, v. 21, n. 4, p. 373–382, 2005. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=ulrm20>>. Acesso em: 5 jan. 2020.
- BROCKMANN, C. *et al.* Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters. ESA Special Publication, 2016, [S.l: s.n.], 2016.
- CEOS. *The CEOS Database: MISSIONS, INSTRUMENTS, MEASUREMENTS and DATASETS*. Disponível em: <<http://database.eohandbook.com/>>. Acesso em: 22 jan. 2020.
- D'ODORICO, P. *et al.* Experimental evaluation of sentinel-2 spectral response functions for NDVI time-series continuity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 51, n. 3, p. 1336–1348, 2013.
- DAGG, M. *et al.* Transformation of dissolved and particulate materials on continental shelves influenced by large rivers: plume processes. *Continental Shelf Research*, v. 24, n. 7, p. 833–858, 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434304000329>>.
- DALL'OLMO, G.; GITELSON, A. A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: Experimental results. *Applied Optics*, v. 44, n. 3, p. 412–422, 20 jan. 2005.
- DE KEUKELAERE, L. *et al.* Atmospheric correction of Landsat-8/OLI and Sentinel-2/MSI

data using iCOR algorithm: validation for coastal and inland waters. *European Journal of Remote Sensing*, v. 51, n. 1, p. 525–542, 1 jan. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1457937>>. Acesso em: 28 dez. 2019.

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

DOXANI, G. *et al.* Atmospheric Correction Inter-Comparison Exercise. *Remote Sensing*, v. 10, 2018.

EUROPEAN SPACE AGENCY - ESA. *Copernicus Open Access Hub*. Disponível em: <<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>>. Acesso em: 3 jul. 2019a.

EUROPEAN SPACE AGENCY - ESA. *Sentinel Online – User Guides: Sentinel-2 MSI*. Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>>. Acesso em: 3 jul. 2019b.

FOUGNIE, B. *et al.* Reduction of skylight reflection effects in the above-water measurement of diffuse marine reflectance. *Applied Optics*, v. 38, n. 18, p. 3844, 20 jun. 1999. Disponível em: <<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ao-38-18-3844>>. Acesso em: 10 jan. 2020.

GITELSON, A. A. *et al.* A bio-optical algorithm for the remote estimation of the chlorophyll-a concentration in case 2 waters. *Environmental Research Letters*, v. 4, n. 4, 2009.

GITELSON, A. A. The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: Relationships of its magnitude and position with chlorophyll. *International Journal of Remote Sensing*, v. 13, n. 17, p. 3367–3373, 1992.

GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N.; LICHTENTHALER, H. K. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. *Journal of Plant Physiology*, v. 148, n. 3–4, p. 501–508, 1996. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161796802859>>. Acesso em: 3 jan. 2020.

GITELSON, A. A.; SCHALLES, J. F.; HLADIK, C. M. Remote chlorophyll-a retrieval in turbid, productive estuaries: Chesapeake Bay case study. *Remote Sensing of Environment*, v. 109, n. 4, p. 464–472, 30 ago. 2007.

GORDON, H. R.; MOREL, A. Y. *Remote assessment of ocean color for interpretation of*

satellite visible imagery: a review. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1983. v. 4.

HARMEL, T. *et al.* Sunlint correction of the Multi-Spectral Instrument (MSI)-SENTINEL-2 imagery over inland and sea waters from SWIR bands. *Remote Sensing of Environment*, v. 204, n. March, p. 308–321, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.022>>.

HARMEL, T.; CHAMI, M. Estimation of the sunlint radiance field from optical satellite imagery over open ocean: Multidirectional approach and polarization aspects. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 118, n. 1, p. 76–90, 2013.

HOGUE, F. E.; WRIGHT, C. W.; SWIFT, R. N. Radiance-ratio algorithm wavelengths for remote oceanic chlorophyll determination. *Appl. Opt.*, v. 26, n. 11, p. 2082–2094, jun. 1987. Disponível em: <<http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-26-11-2082>>.

ILORI, C.; PAHLEVAN, N.; KNUDBY, A. Analyzing Performances of Different Atmospheric Correction Techniques for Landsat 8: Application for Coastal Remote Sensing. *Remote Sensing*, v. 11, p. 469, 2019.

INMET. *Rede de Estações - Dados em gráficos: Estações Automáticas*. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf>. Acesso em: 18 dez. 2019.

JORGE, D. S. F. *et al.* SNR (Signal-To-Noise Ratio) Impact on Water Constituent Retrieval from Simulated Images of Optically Complex Amazon Lakes. *Remote Sensing*, v. 9, n. 7, p. 644, 22 jun. 2017. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/9/7/644>>. Acesso em: 13 jan. 2020.

KAUFMAN, Y. J.; SENDRA, C. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-ir satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, aerossóismodo de estimar nuvens - estimativa, v. 9, n. 8, p. 1357–1381, 1988.

KUHN, C. *et al.* Performance of Landsat-8 and Sentinel-2 surface reflectance products for river remote sensing retrievals of chlorophyll-a and turbidity. *Remote Sensing of Environment*, v. 224, n. January, p. 104–118, 2019.

KUTSER, T. *et al.* Remote Sensing of Black Lakes and Using 810 nm Reflectance Peak for Retrieving Water Quality Parameters of Optically Complex Waters. *Remote Sensing*, v. 8, n. 6, p. 497, 14 jun. 2016. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/8/6/497>>. Acesso em: 27 jan. 2020.

LARSSON, L.; NILSSON, S. *Hydrodynamic Modeling of the Mundaú-Manguaba Estuarine-Lagoon System, Brazil*. 2014. H2 - Master's Degree (Two Years), Lund University, 2014. Disponível em: <<http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/4585064>>.

LE, C. *et al.* A four-band semi-analytical model for estimating chlorophyll a in highly turbid lakes: The case of Taihu Lake, China. *Remote Sensing of Environment*, v. 113, n. 6, p. 1175–1182, 15 jun. 2009.

LEE, Z. *et al.* Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2 Deriving bottom depths and water properties by optimization. *Applied Optics*, 1999.

LENOBLE, J. *et al.* A successive order of scattering code for solving the vector equation of transfer in the earth's atmosphere with aerosols. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, v. 107, n. 3, p. 479–507, 1 out. 2007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022407307001306>>. Acesso em: 19 jan. 2020.

LILLESAND, T.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. *Remote sensing and image interpretation*. 7th Editio ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015.

LINS, R. C. *et al.* A multivariate analysis framework to detect key environmental factors affecting spatiotemporal variability of chlorophyll-a in a tropical productive estuarine-lagoon system. *Remote Sensing*, v. 10, n. 6, 1 jun. 2018.

LINS, R. C. *et al.* Assessment of chlorophyll-a remote sensing algorithms in a productive tropical estuarine-lagoon system. *Remote Sensing*, v. 9, n. 6, p. 1–19, 2017.

LINS, R. C.; FRAGOSO JR., C. R.; CIRILO, J. A. Simulações da hidrodinâmica no Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM/AL). 2013, [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–8.

LIU, H. *et al.* Application of Sentinel 2 MSI Images to Retrieve Suspended Particulate Matter Concentrations in Poyang Lake. *Remote Sensing*, v. 9, n. 7, p. 761, 23 jul. 2017.

MA, W. *et al.* Using three-band model to retrieve chlorophyll-a of Yantai coastal waters. 8 nov. 2014, [S.l.]: SPIE, 8 nov. 2014. p. 926102.

MACIEL, D. A. *Quantificação remota da concentração de sólidos totais e inorgânicos em suspensão em lagos da planície de inundação do Baixo Amazonas - uma abordagem multi-sensor*. 2019. 164 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de

- Pesquisas Espaciais. Orientadores: Drs. Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo, e Lino Augusto Sander de Carvalho, 2019. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3SLFNB5>>.
- MAIN-KNORN, M. *et al.* Sen2Cor for Sentinel-2. v. 1042704, n. October 2017, p. 3, 2017.
- MARTINS, V. S. *et al.* Assessment of atmospheric correction methods for sentinel-2 MSI images applied to Amazon floodplain lakes. *Remote Sensing*, v. 9, n. 4, p. 23, 1 abr. 2017.
- MATTHEWS, M. W. A current review of empirical procedures of remote sensing in Inland and near-coastal transitional waters. *International Journal of Remote Sensing*, v. 32, n. 21, p. 6855–6899, 2011.
- MAYER, B.; KYLLING, A. Technical Note: The libRadtran Software Package for Radiative Transfer Calculations - Description and Examples of Use. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 5, p. 1855–1877, 2005.
- MELO-MAGALHÃES, E. M. DE. *Influência da eutrofização do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú/Manguaba, Alagoas-Brasil sobre a comunidade fitoplanctônica*. 2005. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Oceanografia Biológica, 2005.
- MITTENZWEY, K. -H *et al.* Determination of chlorophyll a of inland waters on the basis of spectral reflectance. *Limnology and Oceanography*, v. 37, n. 1, p. 147–149, jan. 1992. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.4319/lo.1992.37.1.0147>>. Acesso em: 3 jan. 2020.
- MOBLEY, C D; SUNDMAN, L. K. Rrs(B8). *Sequoia Scientific Inc., US*, 2008.
- MOBLEY, CURTIS D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. *Applied Optics*, v. 38, n. 36, p. 7442, 20 dez. 1999. Disponível em: <<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ao-38-36-7442>>. Acesso em: 10 jan. 2020.
- MOREL, A.; PRIEUR, L. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and oceanography*, v. 22, n. 4, p. 709–722, 1977.
- MOSES, W. J. *et al.* Estimation of chlorophyll-a-concentration in case II waters using MODIS and MERIS data- successes and challenges. *Environmental Research Letters*, v. 4, n. 4, p. 45005, out. 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088%2F1748-9326%2F4%2F4%2F045005>>. Acesso em: 19 jan. 2020.
- MUELLER, J. L. *et al.* Above-water radiance and remote sensing reflectance measurement and analysis protocols. *NASA Technical Memorandum*, v. III, p. 1–78, 2000.

MULLER-WILM, U. *et al.* Sentinel-2 level 2A prototype processor: Architecture, algorithms and first results. 2013, [S.l: s.n.], 2013. p. 9–13.

O'REILLY, J. E. *et al.* Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 103, n. C11, p. 24937–24953, 15 out. 1998.

OGASHAWARA, I.; MISHRA, D.; GITELSON, A. Remote Sensing of Inland Waters: Background and Current State-of-the-Art Non-invasive monitoring of microalgal culture condition View project Smart Community Centric Urban Heat Monitoring Framework View project. *Bio-optical Modeling and Remote Sensing of Inland Waters*, p. 1–24, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-804644-9.00001-X>>. Acesso em: 27 jan. 2020.

OLIVEIRA, A. M.; KJERFVE, B. *Environmental Responses of a Tropical Coastal Lagoon System to Hydrological Variability: Mundaú-Manguaba, Brazil. Estuarine, Coastal and Shelf Science.* [S.l: s.n.], 1993

OLMANSON, L.; BREZONIK, P.; BAUER, M. Remote Sensing for Regional Lake Water Quality Assessment: Capabilities and Limitations of Current and Upcoming Satellite Systems. *Handbook of Environmental Chemistry.* [S.l: s.n.], 2015. p. 111–140.

PAHLEVAN, N. *et al.* Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI) data processing for aquatic science applications: Demonstrations and validations. *Remote Sensing of Environment*, v. 201, p. 47–56, 1 nov. 2017.

PEDDLE, D. *et al.* Reflectance processing of remote sensing spectroradiometer data. *Computers & Geosciences*, v. 27, p. 203–213, 2001.

PEREIRA-SANDOVAL, M. *et al.* Evaluation of atmospheric correction algorithms over spanish inland waters for sentinel-2 multi spectral imagery data. *Remote Sensing*, v. 11, n. 12, p. 1–23, 2019.

RICHTER, R. *et al.* Sentinel-2 MSI – Level 2A Products Algorithm Theoretical Basis Document. *European Space Agency,(Special Publication) ESA SP*, n. 2, p. 1–87, 2012.

RICHTER, RUDOLF. Correction of satellite imagery over mountainous terrain. *Applied Optics*, v. 37, n. 18, p. 4004–4015, 1998.

RUDDICK, K. G. *et al.* Seaborne measurements of near infrared water-leaving reflectance: The similarity spectrum for turbid waters. *Limnology and Oceanography*, v. 51, n. 2, p. 1167–1179,

2006.

SANTOS, L. DA S. *et al.* AVALIAÇÃO DE MODELOS SEMI-EMPÍRICOS PARA ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A BASEADO EM BANDAS SIMULADAS DE SATÉLITES EM UM SISTEMA ESTUARINO LAGUNAR. 2019, Campinas: GALOÁ, 2019. Disponível em: <<https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/avaliacao-de-modelos-semi-empiricos-para-estimativa-da-concentracao-de-clorofila-a-baseado-em-bandas-simuladas-de-sateli>>.

SPITZER, D.; DIRKS, R. W. Bottom influence on the reflectance of the sea. *International Journal of Remote Sensing*, v. 8, n. 3, p. 279–290, 1987.

STERCKX, S. *et al.* SIMilarity Environment Correction (SIMEC) applied to MERIS data over inland and coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, v. 157, p. 96–110, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.06.017>>.

STERCKX, SINDY; KNAEPS, E.; RUDDICK, K. Detection and correction of adjacency effects in hyperspectral airborne data of coastal and inland waters: The use of the near infrared similarity spectrum. *International Journal of Remote Sensing*, v. 32, n. 21, p. 6479–6505, 2011.

TOMING, K. *et al.* First experiences in mapping lakewater quality parameters with sentinel-2 MSI imagery. *Remote Sensing*, v. 8, n. 8, p. 14, 5 ago. 2016. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/8/8/640>>. Acesso em: 19 dez. 2019.

TYLER, A. N. *et al.* Developments in Earth observation for the assessment and monitoring of inland, transitional, coastal and shelf-sea waters. *Science of The Total Environment*, v. 572, p. 1307–1321, 1 dez. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716300201?via%3Dihub>>. Acesso em: 16 jan. 2020.

VITO REMOTE SENSING UNIT. *iCOR Landsat-8 and Sentinel-2 plugin for SNAP toolbox: Software User Manual*. Disponível em: <https://blog.vito.be/remotesensing/icor_available>. Acesso em: 16 ago. 2019.

WANG, M. Atmospheric Correction for Remotely-Sensed Ocean-Colour Products. *Reports and Monographs of the International Ocean-Colour Coordinating Group (IOCCG)*. [S.l: s.n.], 2010. v. 10. p. 1–78.

WANG, M. Atmospheric correction of Ocean Color RS observations. *Proceedings of the*

IOCCG Summer Lecture Series, Villefranche-sur-Mer, France, p. 1–58, 2014.

WARREN, M. A. *et al.* Assessment of atmospheric correction algorithms for the Sentinel-2A MultiSpectral Imager over coastal and inland waters. *Remote Sensing of Environment*, v. 225, p. 267–289, 1 maio 2019.

APÊNDICE A

Arquivo de configuração do Sen2Cor utilizado no software SNAP/ESA

```
<parameters>
  <postExecuteTemplate>Sen2Cor-post-
template.vm</postExecuteTemplate>
  <resolution>60</resolution>
  <crOnly>>false</crOnly>
  <gip28L2A>Sen2Cor-gipp28-template.xsl</gip28L2A>
  <nbThreads>1</nbThreads>
  <medianFilter>0</medianFilter>
  <aerosol>AUTO</aerosol>
  <midLat>SUMMER</midLat>
  <ozone>h - 331</ozone>
  <wvCorrection>1</wvCorrection>
  <visUpdateMode>1</visUpdateMode>
  <wvWatermask>1</wvWatermask>
  <cirrusCorrection>TRUE</cirrusCorrection>
  <DEMTerrainCorrection>FALSE</DEMTerrainCorrection>
  <brdfCorrection>0</brdfCorrection>
  <brdfLower>0.22</brdfLower>
  <visibility>23.0</visibility>
  <altitude>0.1</altitude>
  <wvThresCirrus>0.25</wvThresCirrus>
  <compressionLevel>0</compressionLevel>
  <demDirectory>NONE</demDirectory>
  <demReference>http://data_public:GDdci@data.cgiar-
csi.org/srtm/tiles/GeoTIFF/</demReference>
  <adjacencyRange>1.0</adjacencyRange>
  <smoothWVMap>100.0</smoothWVMap>
  <generateDEMoutput>FALSE</generateDEMoutput>
  <generateTCIoutput>TRUE</generateTCIoutput>
  <generateDDVoutput>FALSE</generateDDVoutput>
  <Downsample_20_to_60>TRUE</Downsample_20_to_60>
</parameters>
```

APÊNDICE B

Arquivo de configuração do iCOR utilizado no software SNAP/ESA

```
<parameters>
  <keep_intermediate>false</keep_intermediate>
  <waterband>B08</waterband>
  <watermask>0.05</watermask>
  <cloudaveragethreshold>0.19</cloudaveragethreshold>
  <cloudlowbandid>B01</cloudlowbandid>
  <cloudlowthreshold>0.25</cloudlowthreshold>
  <cloudmaskoption>true</cloudmaskoption>
  <cloudmaskcirrusthreshold>0.01</cloudmaskcirrusthreshold>
  <aotoption>true</aotoption>
  <aotoverride>0.1</aotoverride>
  <wvoption>false</wvoption>
  <watervaporoverride>2.0</watervaporoverride>
  <simecoption>true</simecoption>
  <adjwindow>1</adjwindow>
</parameters>
```

APÊNDICE C

Arquivo de configuração do C2RCC utilizado no software SNAP/ESA

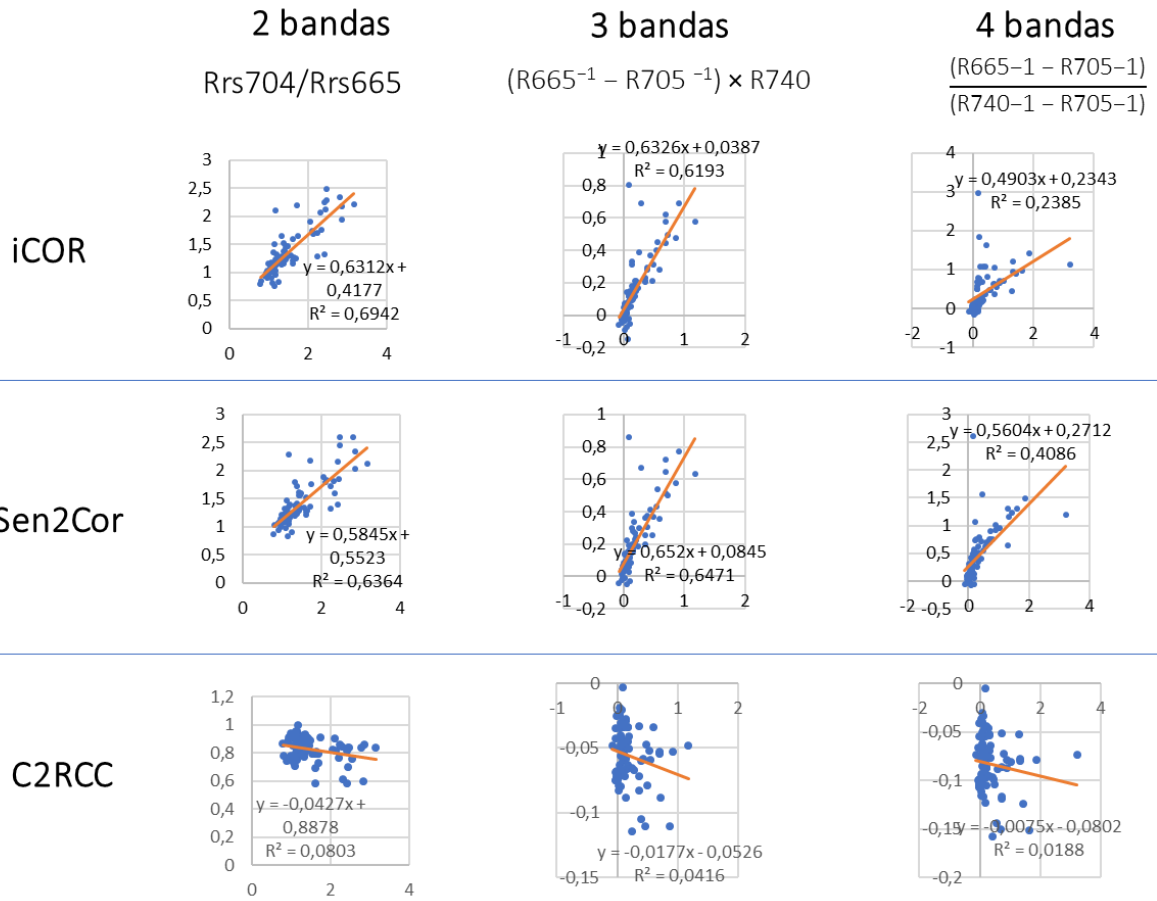
```
<parameters>
  <validPixelExpression>B8 > 0 && B8 <
0.1</validPixelExpression>
  <salinity>15.0</salinity>
  <temperature>25.0</temperature>
  <ozone>330.0</ozone>
  <press>1000.0</press>
  <elevation>0.0</elevation>
  <TSMfakBpart>1.72</TSMfakBpart>
  <TSMfakBwit>3.1</TSMfakBwit>
  <CHLexp>1.04</CHLexp>
  <CHLfak>21.0</CHLfak>
  <thresholdRtosaOOS>0.05</thresholdRtosaOOS>
  <thresholdAcReflecOos>0.1</thresholdAcReflecOos>
  <thresholdCloudTDown865>0.955</thresholdCloudTDown865>
  <netSet>C2RCC-Nets</netSet>
  <outputAsRrs>>true</outputAsRrs>

<deriveRwFromPathAndTransmittance>>false</deriveRwFromPathAndTransmit
tance>
  <outputRtoa>>true</outputRtoa>
  <outputRtosaGc>>false</outputRtosaGc>
  <outputRtosaGcAann>>false</outputRtosaGcAann>
  <outputRpath>>false</outputRpath>
  <outputTdown>>false</outputTdown>
  <outputTup>>false</outputTup>
  <outputAcReflectance>>true</outputAcReflectance>
  <outputRhown>>true</outputRhown>
  <outputOos>>false</outputOos>
  <outputKd>>true</outputKd>
  <outputUncertainties>>true</outputUncertainties>
</parameters>
```

APÊNDICE D

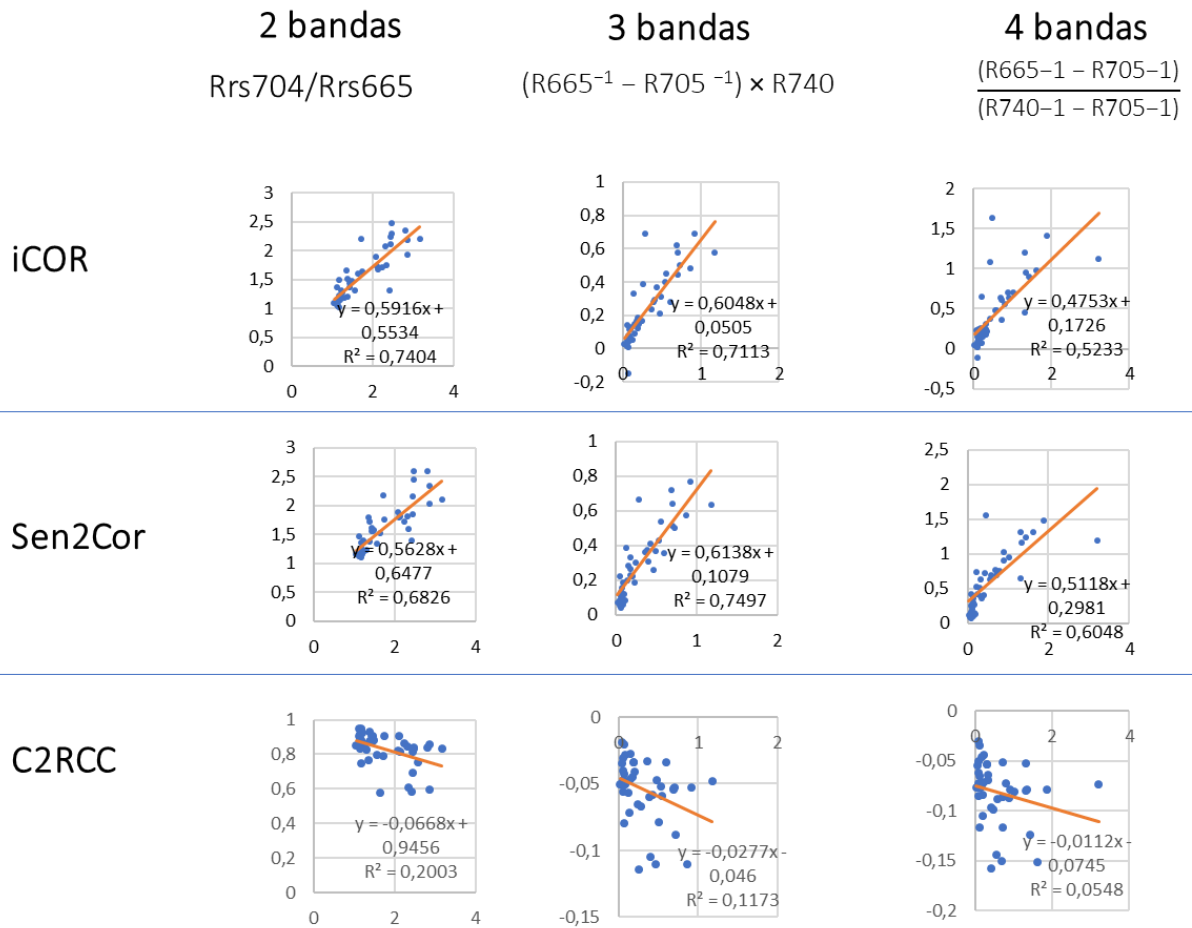
Gráficos de correlação entre as razões de bandas: *in situ* simuladas versus corrigidas (CELMM)

CELMM



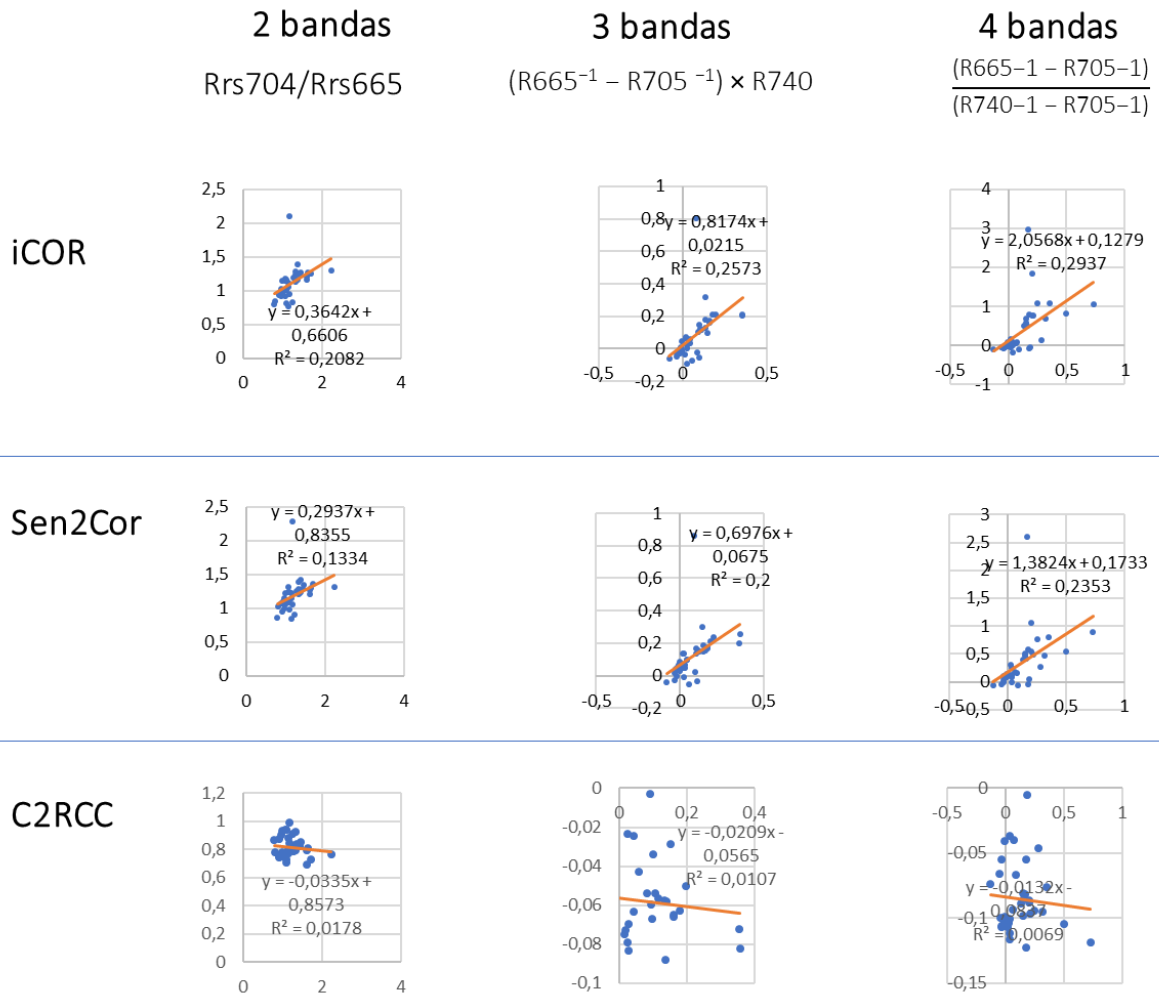
**Gráficos de correlação entre as razões de bandas: *in situ* simuladas versus corrigidas
(MANGUABA)**

MANGUABA



Gráficos de correlação entre as razões de bandas: *in situ* simuladas versus corrigidas
(MUNDAÚ)

MUNDAÚ



APÊNDICE E

Produtos 1C obtidos pelo portal *Copernicus Open Access Hub/ESA* em RGB

Cena 24LZQ

Data de passagem: 11/08/2018 .

Horário local: 12h43min09s



Data de passagem: 19/03/2018

Horário local: 12h43min11s



Data de passagem: 20/10/2018

Horário local: 12h43min19s



Data de passagem: 24/03/2019

Horário local: 12h43min01s



Data de passagem: 23/05/2018

Horário local: 12h43min09s



Data de passagem: 27/02/2019

Horário local: 12h43min19s

