



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21d/2024/08.29.23.47-TDI

**AVALIAÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS  
PLANETSCOPE SUPERDOVE EM SISTEMAS  
AQUÁTICOS CONTINENTAIS E COSTEIROS  
BRASILEIROS**

Rafael Grinberg Chasles

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Sensoriamento Remoto, orientada  
pelos Drs. Cláudio Clemente Faria  
Barbosa, e Daniel Andrade Maciel,  
aprovada em 05 de julho de 2024.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/4BTS2K5>>

INPE  
São José dos Campos  
2024

**PUBLICADO POR:**

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

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

**Presidente:**

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

**Membros:**

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

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

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

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

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

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

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



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21d/2024/08.29.23.47-TDI

**AVALIAÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS  
PLANETSCOPE SUPERDOVE EM SISTEMAS  
AQUÁTICOS CONTINENTAIS E COSTEIROS  
BRASILEIROS**

Rafael Grinberg Chasles

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Sensoriamento Remoto, orientada  
pelos Drs. Cláudio Clemente Faria  
Barbosa, e Daniel Andrade Maciel,  
aprovada em 05 de julho de 2024.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/4BTS2K5>>

INPE  
São José dos Campos  
2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Chasles, Rafael Grinberg.

C386a Avaliação radiométrica de imagens planetscope superdove em sistemas aquáticos continentais e costeiros brasileiros / Rafael Grinberg Chasles. – São José dos Campos : INPE, 2024.  
xxvi + 72 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2024/08.29.23.47-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2024.

Orientadores : Drs. Cláudio Clemente Faria Barbosa, e Daniel Andrade Maciel.

1. Qualidade de água. 2. Sensoriamento remoto. 3. Superdove.  
4. Qualidade radiométrica. I.Título.

CDU 528.8:556

---



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

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



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÃO



**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**  
Secretaria de Pós-Graduação - SEPGR

**DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE RAFAEL GRINBERG CHASLES**  
**REG. 728852/2022, BANCA Nº 148/2024**

No dia 05 de julho de 2024, em formato remoto, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Sensoriamento Remoto, com a exigência de que o trabalho final a ser publicado deverá incorporar as correções sugeridas pela Banca Examinadora, com revisão pelo orientador Dr. Cláudio Clemente Faria Barbosa.

**Novo Título:** AVALIAÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS PLANETSCOPE SUPERDOVE EM SISTEMAS AQUÁTICOS CONTINENTAIS E COSTEIROS BRASILEIROS

**Membros da banca:**

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

Dr. Cláudio Clemente Faria Barbosa – Orientador – INPE

Dr. Daniel Andrade Maciel – Orientador – INPE

Dra. Andrea de Lima Oliveira – Membro Interno – INPE

Dr. Fábio Marcelo Breunig – Membro Externo – UFPR

Dr. Vitor Souza Martins – Membro Externo – MSU



Documento assinado eletronicamente por **Andréa de Lima Oliveira (E), Usuário Externo**, em 17/07/2024, às 09:33 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vitor Souza martins (E), Usuário Externo**, em 17/07/2024, às 09:44 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **DANIEL ANDRADE MACIEL (E), Usuário Externo**, em 17/07/2024, às 10:14 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cláudio Clemente Faria Barbosa, Tecnologista**, em 17/07/2024, às 10:26 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Evlyn Marcia Leão de Moraes Novo, Pesquisador**, em 17/07/2024, às 10:41 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Fabio Marcelo Breunig (E), Usuário Externo**, em 17/07/2024, às 13:28 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.mcti.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **12066189** e o código CRC **864EBB4C**.

---

*“Aproxime-se da luz que emana de todas as coisas, permita que a Natureza  
seja sua professora”.*

*William Wordsworth*





À Catarina, Laura e Raja.



## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão ao meu orientador, Dr. Claudio Barbosa, pela inestimável oportunidade de realizar este mestrado e por seu contínuo apoio e orientação ao longo desta jornada. Ao meu coorientador, Dr. Daniel Maciel, agradeço por sua ajuda imprescindível nesta caminhada.

Também quero agradecer ao Dr. Vitor Martins, por me abrir as portas desta instituição e possibilitar que eu fizesse parte da comunidade do INPE. À Dra. Evlyn Novo, minha sincera gratidão por sua generosidade e pelo vasto conhecimento compartilhado comigo.

Estendo meus agradecimentos ao Labisa, aos professores e a toda a comunidade do INPE, cujas contribuições foram fundamentais para minha formação e crescimento acadêmico.

Agradeço especialmente à Dra. Aurea Ciotti, Dra. Rafaela Zem, Dr. Matheus Tavares, MSc. Thainara Lima, MSc. Felipe Nincão, Dr. Rogério Flores, MSc. Rejane Paulino, Júlio Santos e Pedro Bacellar pela disposição em fornecer dados essenciais para a realização desta pesquisa.



## RESUMO

A água é um recurso essencial para manutenção do ciclo biogeoquímico e para a vida. O monitoramento contínuo e preciso de sua qualidade é essencial, e o uso do Sensoriamento Remoto pode ser uma alternativa viável e econômica em comparação aos demais métodos. A avaliação da qualidade radiométrica de um sensor é o primeiro passo para a estimativa de concentrações de constituintes aquáticos e da sua qualidade. No entanto, os sensores utilizados em programas de monitoramento apresentam, em alguns casos, limitações de qualidade espacial, radiométrica, espectral e temporal. Esta pesquisa avalia a qualidade radiométrica absoluta do sensor SuperDove em ambientes aquáticos brasileiros, comparando diferentes métodos de correção atmosférica (ACOLITE DSF e 6SV), e avalia a qualidade radiométrica relativa ao comparar produtos em topo da atmosfera deste sensor com o Sentinel-2 MSI em águas brasileiras (represa Billings e Promissão, canal de São Sebastião, lago de Mangueira, Lago Grande do Curuai e Rio Tapajós e Laguna de Paranaguá). Os resultados indicam que a qualidade radiométrica do SuperDove é satisfatória com a aplicação de ambos os métodos de correção atmosférica. Para as bandas do visível, o método ACOLITE DSF apresentou erros de 22,65% na banda Verde II e 26,12% na banda Verde I. O método 6SV da Planet resultou em erros de 23,41% e 25,72% nestas mesmas bandas. As bandas Azul Costeiro e NIR apresentaram os maiores erros em ambos os métodos. A avaliação por campanhas de campo revelou que os melhores resultados foram obtidos em Lago Grande do Curuai, em setembro de 2021 com o método ACOLITE DSF e em São Sebastião, em novembro de 2023, utilizando o método 6SV, com erros em torno de 13% com todas as bandas. A avaliação radiométrica relativa demonstrou uma forte correlação entre os sensores PS.SD e MSI, com baixos erros e vieses para as bandas Azul, Verde, Vermelho e Vermelho Limítrofe. RBR2 apresentou o menor erro e viés quando avaliadas as razões de banda. Conclui-se que os sensores da Planet evoluíram significativamente no SuperDove, oferecendo maior disponibilidade de resolução espectral e radiométrica. Os resultados desta pesquisa confirmam que o uso deste sensor para o monitoramento da qualidade da água é promissor. Novas pesquisas são necessárias para atenuação de glint e efeitos de adjacências, assim como a aplicação e validação de algoritmos para estimativa de chl-a, TSS, c-ficocianina e outros constituintes.

Palavras-chave: Qualidade de água, Sensoriamento Remoto, SuperDove, Qualidade radiométrica.



# **RADIOMETRIC EVALUATION OF PLANETSCOPE SUPERDOVE IMAGES OF BRAZILIAN CONTINENTAL AND COASTAL AQUATIC SYSTEMS**

## **ABSTRACT**

Water is a vital resource for life and biogeochemical cycle. Continuous and accurate monitoring of its quality is essential, and the use of Remote Sensing can be a viable and cost-effective alternative compared to other methods. Assessing the radiometric quality of a sensor is the first step towards estimating concentrations of aquatic constituents and their quality. However, the sensors used in monitoring programs sometimes exhibit limitations in spatial, radiometric, spectral, and temporal quality. This research evaluates the absolute radiometric quality of the SuperDove sensor in Brazilian aquatic environments, comparing different atmospheric correction methods (ACOLITE DSF and 6SV), and assesses the relative radiometric quality by comparing top-of-atmosphere products from this sensor with the Sentinel-2 MSI. The results indicate that the radiometric quality of the SuperDove is satisfactory with the application of both atmospheric correction methods. For the visible bands, the ACOLITE DSF method presented errors of 22.65% in the Green II band and 26.12% in the Green I band. The 6SV method by Planet resulted in errors of 23.41% and 25.72% in those same bands. The Coastal Blue and NIR bands exhibited the highest errors in both methods. Field campaign evaluations revealed that the best results were obtained in Lago Grande do Curuai in September 2021 with the ACOLITE DSF method and in São Sebastião in November 2023 using the 6SV method, with errors around 13% across all bands. The relative radiometric evaluation demonstrated a strong correlation between the PS.SD and MSI sensors, with low errors and biases for the Blue, Green, Red, and Red Edge bands. RBR2 showed the lowest error and bias when evaluating band ratios. It is concluded that Planet sensors have significantly evolved in the SuperDove, offering greater availability of spectral and radiometric resolution. The results of this research confirm that the use of this sensor for water quality monitoring is promising. Further research is needed to mitigate glint and adjacency effects, as well as to apply and validate algorithms for estimating chl-a, TSS, c-phyococyanin, and other constituents.

Keywords: Water quality, Remote Sensing, SuperDove, Radiometric quality.





## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Função de Resposta Espectral <i>Planet's SuperDove</i> .....	7
Figura 2.2 - Comparação <i>PlanetScope SuperDove</i> e Sentinel 2 MSI. ....	8
Figura 3.1 – Fluxograma metodologia.....	15
Figura 3.2 - Área de Estudo. ....	17
Figura 3.3 – Espectros de campo simulados.....	22
Figura 4.1 – Rrs Reservatório Billings. ....	31
Figura 4.2 – Rrs Reservatório Promissão. ....	32
Figura 4.3 – Rrs São Sebastião. ....	33
Figura 4.4 – Rrs Grades Lagos do Curuai.....	34
Figura 4.5 – Rrs Rio Tapajós.....	35
Figura 4.6 – Rrs Rio Arapiuns. ....	36
Figura 4.7 – Rrs Baía de Paranaguá.....	37
Figura 4.8 – Rrs Lagoa de Mangueira.....	38
Figura 4.9 <i>Scatter plots matchups</i> entre <i>SuperDove ACOLITE</i> e dados <i>insitu por banda</i> . ....	39
Figura 4.10 - <i>Scatter plots</i> para os <i>matchups</i> entre <i>SuperDove ACOLITE DSF</i> e dados <i>insitu por campanha</i> . ....	41
Figura 4.11 - <i>Scatter plots</i> para os <i>matchups</i> entre <i>SuperDove PSR</i> e dados <i>insitu</i> . ....	43
Figura 4.12 - <i>Scatter plots</i> para os <i>matchups</i> entre <i>SuperDove Planet SR</i> e dados <i>insitu por campanha</i> . ....	45
Figura 4.13 - Erros espectrais para DSF (azul) e PSR (laranja).....	47
Figura 4.14 – Erros de ângulo de visada da razão entre estimado e medido. .	49
Figura 4.15 – Erros de ângulo azimutal da razão entre estimado e medido. ...	50
Figura 4.16 – Erros de ângulo de elevação da iluminação da razão entre estimado e medido. ....	51
Figura 4.17 – Imagens RGB Sentinel 2 MSI e Planet Superdove. ....	53
Figura 4.18 – <i>Scatter Plots</i> entre <i>SuperDove</i> e MSI para TOA. ....	55

Figura 4.19 – Gráfico das estatísticas de erro e viés sensores MSI vs. SuperDove em TOA..... 56

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1- Razão sinal-ruído do <i>SuperDove</i> . .....	9
Tabela 3.1 Métricas estatísticas dos metadados PSD. ....	24
Tabela 4.1 - Avaliação estatística da acurácia ACOLITE DSF por banda.....	40
Tabela 4.2 - Avaliação estatística da acurácia PSR por banda.....	44



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

6SV	Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum
ACOLITE	Atmospheric Correction for OLI Lite
AMZ	Amazônia
AOD	Aerosol Optical Depth
AOP	Apparent Optical Properties
AOT	Aerosol Optical Thickness
ARAP	Rio Arapiuns
BILL	Reservatório Billings
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
CDOM	Colored Dissolved Organic Matter
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH <sub>4</sub>	Metano
CHL-A	Clorofila-a
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
DEM	Digital Elevation Model
DFS	Dark Spectrum Fitting
EDAP	Earthnet Data Assessment Project
ESA	European Space Agency
GLC	Lago Grande do Curuai
GPR	Ground Sample Distance
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IOP	Inherent Optical Properties
LabISA	Laboratório de Instrumentação para Sistemas Aquáticos
LUT	Look-up-Table
MAE	Mean Absolute Error
MANG	Lagoa de Mangueira
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
mNDWI	Modified Normalized Difference Water Index
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSI	Multispectral Instrument
N	Número de amostras
N <sub>2</sub>	Nitrogênio

NAP	Non Algal Particles
NDCFI	Norway's International Climate and Forests Initiative Satellite Data Program
NDCI	Normalized Difference Chlorophyll Index
NIR	Near Infrared
NO2	Óxido Nitroso
O2	Oxigênio
O3	Ozônio
OD	Oxigênio Dissolvido
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OLI	Operational Land Imager
OWT	Optical Water Types
PAR	Baía de Paranaguá
PC	C-Ficocianina
PIC	Pseudo Invariant Calibration
POA	Propriedade Óptica Aparente
POI	Propriedade Óptica Inerente
PROM	Reservatório de Promissão
PS	PlanetScope
PS.SD	PlanetScope SuperDove
PSD	Planet SuperDove
QA	Qualidade da água
R	Red
R <sup>2</sup>	Coeficiente de determinação
RBD	Red Band Difference
RBI	Red Band Index
RBINS	Royal Belgian Institute of Natural Sciences
RBR	Red Band Ratio
RE	Red-Edge
REM	Radiação Eletromagnética
RGB	Red Green Blue
RMSD	Root Mean Squared Difference
RMSE	Root Mean Squared Error
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo

RTM	Radiative Transfer Model
RTPJ	Rio Tapajós
S	Slope
SBAF	Spectral Band Adjustment Factor
SD	SuperDove
SEB	Canal de São Sebastião
SNR	Signal to Noise Ratio
SP	Estado de São Paulo
SR	Surface Reflectance
SRF	Spectral Response Function
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWIR	Shortwave Infrared
TM	Thematic Mapper
TOA	Top-of-Atmosphere
TSS	Total Suspended Solids
VIS	Visible Regions
VNIR	Visible and Near-Infrared Regions





## LISTA DE SÍMBOLOS

$R_{rs,est}$	Reflectância em sensoriamento remoto estimado
$R_{rs,med}$	Reflectância em sensoriamento remoto medido em campo
$R_{rs}$	Reflectância de Sensoriamento Remoto
$a_{CDOM}(\lambda)$	Coefficiente de absorção do CDOM
$a_{NAP}(\lambda)$	Coefficiente de absorção de partículas não-algais
$a_{phy}(\lambda)$	Coefficiente de absorção do fitoplâncton
$a_w(\lambda)$	Coefficiente de absorção da água
$b_{NAP}(\lambda)$	Coefficiente de espalhamento de partículas não-algais
$b_w(\lambda)$	Coefficiente de espalhamento da água
[chl-a]	Concentração de clorofila-a ( $\mu g/L$ )
[PC]	Concentração de ficocianina ( $\mu g/L$ )
Est	Valor estimado
Med.	Valor medido em campo
sr <sup>-1</sup>	Esferorradiano
$\beta(\psi,\lambda)$	Função de espalhamento volumétrico ( $m^{-1}sr^{-1}$ )
$\psi$	Ângulo de espalhamento
$Es(\lambda)$	Irradiância incidente ( $w/m^2$ )
$Eu(\lambda)$	Irradiância ascendente ( $w/m^2$ )
$Kd(z,\lambda)$	Coefficiente de atenuação difuso ( $m^{-1}$ )
$Lsky(\lambda)$	Radiância do céu ( $W.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$ )
$Lt(\lambda)$	Radiância emergente da água acima da superfície ( $W.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$ )
$Lw(\theta,\phi,\lambda)$	Radiância emergente da coluna d'água ( $W.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$ )
$R(z,\lambda)$	Reflectância de irradiância espectral
$SRF(\lambda)$	Função de resposta espectral em um comprimento de onda específico
$a(\lambda)$	Coefficiente de absorção
$a_{CDOM}(\lambda)$	Coefficiente de absorção pelo CDOM ( $m^{-1}$ )
$a_{NAIP}(\lambda)$	Coefficiente de absorção por partículas não-algais inorgânicas ( $m^{-1}$ )
$a_{NAOP}(\lambda)$	Coefficiente de absorção por partículas não-algais orgânicas ( $m^{-1}$ )

$b(\lambda)$	Coefficiente de espalhamento
$\beta$	Viés
$\varepsilon$	Acurácia Simétrica Mediana
$\theta$	Ângulo zenital
$\lambda$	Comprimento de onda (nm)
$\mu$	Sinal mediano
$\rho$	Reflectância
$\sigma$	Desvio Padrão
$\phi$	Ângulo azimutal

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Hipótese.....	4
1.2 Objetivo geral.....	4
1.3 Objetivos específicos .....	5
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	6
2.1 <i>PlanetScope SuperDove</i> (PS.SD) .....	6
2.2 Propriedades Ópticas Inerentes (POI).....	11
2.3 Propriedades Ópticas Aparentes (POA) .....	12
2.4 Constituintes Ópticamente Ativos (COA).....	12
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	14
3.1 Áreas de estudo.....	16
3.1.1 Reservatório Billings (BILL).....	17
3.1.2 Reservatório Promissão (PROM).....	18
3.1.3 Canal de São Sebastião (SEB).....	18
3.1.4 Lago Grande do Curuai (GLC).....	18
3.1.5 Rio Tapajós (RTPJ).....	19
3.1.6 Rio Arapiuns (ARAP) .....	19
3.1.7 Baía de Paranaguá (PAR) .....	19
3.1.8 Lagoa de Mangueira (MANG) .....	19
3.2 Dados <i>insitu</i> .....	20
3.3 Dados satelitais .....	23
3.4 Correção atmosférica.....	24
3.4.1 ACOLITE DSF .....	25
3.4.2 Planet SR - 6SV .....	26
3.5 Avaliação radiométrica relativa TOA vs. TOA.....	27
3.6 Validações .....	29
4 RESULTADOS .....	30
4.1 Análise dos espectros de reflectância.....	30
4.2 Avaliação da acurácia radiométrica absoluta.....	38

4.2.1	Avaliação do Método ACOLITE DSF (por banda e por campanha) ...	38
4.2.2	Avaliação do Método PSR 6SV (por banda e por campanha) .....	42
4.2.3	Comparação entre os métodos ACOLITE DSF e PSR 6SV .....	46
4.2.4	Avaliação da geometria de iluminação na acurácia radiométrica .....	47
4.3	Avaliação da acurácia radiométrica relativa.....	52
5	DISCUSÃO .....	57
6	CONCLUSÃO .....	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	65



## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso vital para a existência de vida no Planeta, desempenhando um papel fundamental em todas as atividades humanas e ecossistêmicas (WESTALL; BRACK, 2018). A qualidade da água é amplamente definida como as características biológicas, químicas e físicas que devem ser mantidas para atender às necessidades de múltiplos usos, incluindo consumo humano, irrigação e recreação e manutenção dos serviços ecossistêmicos (IOCCG, 2018). A qualidade da água é medida por meio de uma série de parâmetros, tais como turbidez, concentrações de clorofila-a (Chl-a), sedimentos em suspensão (TSS), oxigênio dissolvido (OD), nutrientes, Matéria Orgânica Dissolvida Colorida (CDOM), floração de algas nocivas como cianobactérias, caracterizadas pelo aumento do pigmento ficocianina (PC), entre outros (SAGAN et al., 2020).

As Nações Unidas reconhecem a importância da água por meio dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), particularmente no ODS 6, que visa assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos, e no ODS 14, que busca conservar e utilizar de forma sustentável os oceanos, mares e recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável. A poluição da água e sua escassez são problemas fundamentais que o poder público, as instituições e a sociedade civil precisam enfrentar e isto só é possível com monitoramento abrangente, preciso e contínuo (DUDGEON et al., 2006; SAGAN et al., 2020a).

Existem, fundamentalmente, três formas de monitoramento da qualidade da água. As medições *in situ*, tradicionalmente, obtêm parâmetros precisos de qualidade da água em pontos específicos, porém este processo é demorado, com custos elevados e com limites para o monitoramento em grande escala (BRIVIO; GIARDINO; ZILIOLI, 2001; SCHAEFFER et al., 2013). A instalação de estações de monitoramento contínuas, como boias ou sensores em plataformas são alternativas viáveis, porém com abrangência pontual limitado espacialmente. Devido às vantagens de cobertura espacial e temporal, o Sensoriamento Remoto tem sido utilizado para registrar a distribuição espacial e as mudanças nos

componentes de sua qualidade (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019; YANG et al., 2022). Esta abordagem é descrita pelas interações entre a radiação eletromagnética e a coluna d'água, que dão origem a teoria de transferência radiativa (KIRK, 2010).

Avanços significativos têm sido alcançados no uso de tecnologia de satélite de alta qualidade para o monitoramento da qualidade da água em ecossistemas de água doce. Satélites com alta qualidade radiométrica e resolução espacial entre 10 e 30 metros, como o Landsat-8-9/OLI e o Sentinel-2/MSI, têm sido empregados para esse propósito (SAGAN et al., 2020). No entanto, a resolução temporal desses sensores (por exemplo, tão baixa quanto 3 dias em uma constelação virtual) (CLAVERIE et al., 2018) representa um desafio para a detecção de processos altamente dinâmicos, como eventos de floração de algas, além de dificultar o monitoramento contínuo em sistemas aquáticos com alta cobertura de nuvens (Martins et al., 2018). Além disso, a resolução espacial desses sensores torna difícil a detecção de processos em pequena escala (por exemplo, mapeamento de florações algais pequenas e dinâmicas em lagos de pequena dimensão) e tende a favorecer efeitos como a mistura espectral, o que pode comprometer a confiabilidade das assinaturas espectrais obtidas por esses sensores (SHIMABUKURO et al., 2019). Pequenos lagos são conhecidos por sua grande contribuição para o ciclo biogeoquímico, bem como para a produtividade primária e o ciclo de carbono (WOOLWAY et al., 2020). Ademais, o mapeamento de lagos com área inferior a 1 km<sup>2</sup> (por exemplo, um pixel do Landsat possui 900 m<sup>2</sup>) é necessário, visto que eles correspondem a mais de 15% da área global de lagos (PI et al., 2022).

Os CubeSats de Observação da Terra são, em geral, satélites comerciais equipados com sensores multiespectrais capazes de fornecer alta resolução espacial e revisitas frequentes (HOUBORG et al., 2018; NAGEL et al., 2020). Os aspectos inovadores desses satélites incluem uma arquitetura compacta, carga útil flexível, ciclo de construção e lançamento reduzido, além de custos inferiores aos da produção de satélites tradicionais (ASLAN et al., 2017; MACIEL et al., 2020; VANHELLEMONT, 2019). O uso de CubeSats tornou-se comum em diversos estudos, incluindo agricultura, preservação florestal, uso do solo,

cobertura do solo, defesa e estudos de infraestrutura (FRAZIER; HEMINGWAY, 2021; HUANG e ROY, 2021). Tanto em sistemas continentais quanto costeiros, os CubeSats têm sido empregados para mapear parâmetros de qualidade da água (VANHELLEMONT, 2013, 2019; MACIEL et al., 2020), habitats bentônicos (WICAKSONO; LAZUARDI, 2018), batimetria (NIROUMAND-JADIDI et al., 2022), e conectividade hidrológica em áreas de planície aluvial (Paulino et al., 2023). A alta resolução espacial e temporal desses sensores os torna adequados para a cobertura de pequenos sistemas aquáticos, além de maximizar as observações em regiões com alta frequência de cobertura de nuvens, como a Amazônia brasileira (MARTINS et al., 2018). Entretanto, a precisão radiométrica (ou seja, a menor Relação Sinal-Ruído - SNR) desses sensores desempenha um papel crucial no monitoramento preciso da qualidade da água por meio de dados de sensoriamento remoto, uma vez que o sinal proveniente da água tende a ser pequeno, principalmente em ecossistemas de água doce com baixa quantidade de sedimentos em suspensão (MACIEL et al., 2020). Esse aspecto tem sido objeto de estudo por diversas empresas e agências espaciais ao redor do mundo, que buscam melhorar a SNR, alinhada a uma alta resolução espaço-temporal.

Uma das constelações de CubeSats mais amplamente utilizadas é a constelação comercial lançada pela Planet (PLANET LABS, Inc., San Francisco, CA, EUA). Desde 2013, a Planet Labs implantou com sucesso mais de 140 satélites PlanetScope, conhecidos como Doves, e essa constelação adquiriu dados multiespectrais globais diários com resolução espacial de 3 metros em uma órbita heliossíncrona. A combinação de resolução espacial (3 m) e temporal (diária) oferece suporte ao mapeamento de florações algais pequenas e fragmentadas, mas a informação espectral limitada e a precisão radiométrica das versões padrão Dove e Dove-R não eram inicialmente adequadas para aplicações aquáticas, especialmente em águas claras com baixa SNR (MACIEL et al., 2020). Por outro lado, a mais recente constelação de CubeSats da Planet, SuperDove (PSD), lançada em 2019, está equipada com oito bandas espectrais com resolução espacial de 3 metros e qualidade radiométrica aprimorada em comparação com constelações anteriores. A constelação PSD compreende mais



de 200 satélites que operam em conjunto para coletar informações diariamente. A resolução espectral aprimorada, com bandas centradas nos comprimentos de onda de 620 nm, 660 nm e 705 nm, a torna uma candidata para a detecção de florações algais (Begliomini et al., 2023), incluindo florações algais nocivas (Mishra et al., 2014). Um estudo recente de Vanhellemont (2023) avaliou a precisão do PSD nas águas costeiras da Zona Costeira Belga (Mar do Norte). Eles utilizaram dados de um radiômetro hiperespectral autônomo pan-and-tilt (PANTHYR) e os autores observaram que, para 35 comparações, as diferenças foram pequenas para as primeiras sete bandas (443-707) (diferença média absoluta relativa de 15%-20%). Embora este estudo local tenha sido importante para uma avaliação inicial e fornecimento de dados, há uma carência de exercícios de validação abrangentes que utilizem diferentes tipos óticos de água e condições ambientais.

Neste estudo, pela primeira vez, uma validação detalhada de imagens corrigidas atmosféricamente do PlanetScope PSD sobre ecossistemas aquáticos brasileiros, tanto de água doce quanto costeiros é fornecida. O conjunto de dados radiométricos inclui comparações concomitantes (com diferença de até  $\pm 3$  horas) entre medições in situ e as recuperações de Rrs pelo PSD. Um total de ~500 comparações foi utilizado para avaliar a precisão das recuperações de Rrs, utilizando dois diferentes métodos de correção atmosférica: o método baseado em imagens ACOLITE e o algoritmo baseado em 6SV, implementado nos produtos oficiais da Planet. Todos os resultados foram organizados por Tipos Óticos de Água (OWTs).

## **1.1 Hipótese**

*PlanetScope SuperDove* possuem qualidade radiométrica suficiente para estimativas e parâmetros de qualidade de água no Brasil.

## **1.2 Objetivo geral**

Avaliar a qualidade radiométrica do *PlanetScope Superdove* em ambientes aquáticos brasileiros.

### **1.3 Objetivos específicos**

- Aplicar diferentes métodos de correção atmosférica e avaliar a acurácia radiométrica absoluta do *PlanetScope Superdove*, a partir de dados insitu;
- Avaliar acurácia radiométrica relativa do *PlanetScope Superdove* TOA com o sensor MSI Sentinel-2.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 *PlanetScope SuperDove (PS.SD)*

Os satélites *PlanetScope* (PS) da Planet (Planet Labs, Inc., San Francisco, CA, USA) estão emergindo como um recurso fundamental para o imageamento da Terra (FRAZIER; HEMINGWAY, 2021). Esta empresa produz satélites miniaturas, chamados *cubesats* ou *smallsats*, que podem ser produzidos e lançados com muito mais rapidez que satélites convencionais. *Planet's SuperDoves* (PS.SD) são a terceira geração dos sensores *PlanetScope*. Possuem dimensões de 10cmx10cmx30cm categorizado como um *cubesat* 3U com disponibilidade desde 2018. Sua constelação possui, atualmente, aproximadamente, 200 satélites em órbita lançados em *flocks* (rebanhos) de dezenas de satélites independentes. A empresa Planet pretende lançar mais destes sensores ao longo do tempo (PLANET'S LABS., 2022).

A expectativa de vida útil destes sensores é de 3 a 6 anos, muito mais curta comparada à dos sensores de média resolução espacial. Como sua órbita é mais baixa (aproximadamente 475km de altitude), comparado à dos satélites de média e baixa resolução espacial, a força gravitacional da Terra exerce grande atração, alterando sua órbita e altitude mudem. Estes satélites não possuem dispositivos para correção de órbita no espaço (PLANET'S LABS., 2022). Estes satélites possuem uma órbita operando em sincronia com o Sol (órbita heliosíncrona) e os ângulos dos sensores possuem aproximadamente 98° de inclinação. Seu período orbital é de 94,8 minutos, aproximadamente, e sua passagem pelo Equador é entre as 09:30am e 11:30am UTC. (PLANET'S LABS., 2022)

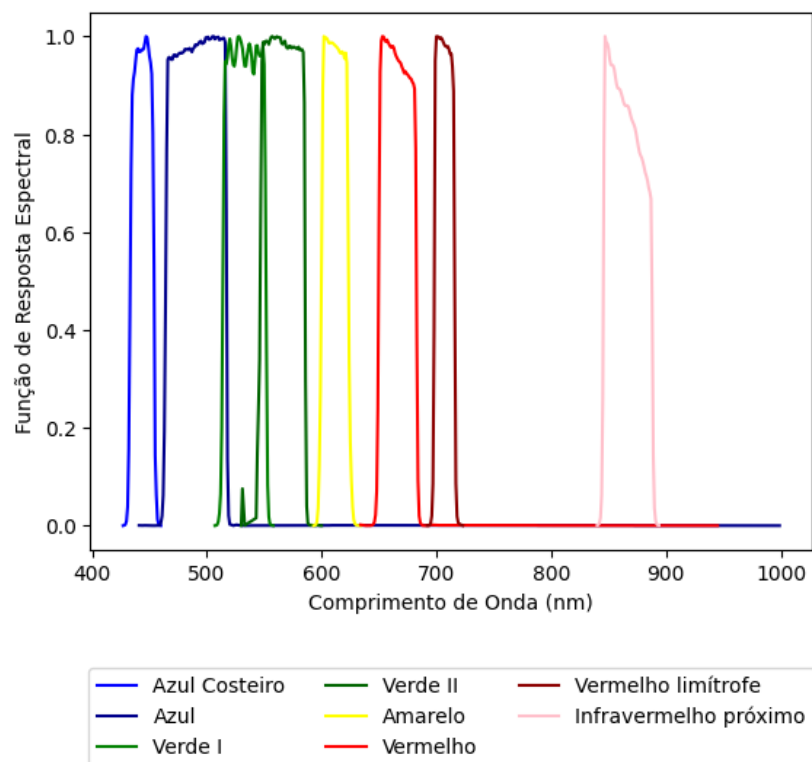
Sua cobertura geográfica abrange as latitudes de 81,5° norte ao sul, com o horário de imageamento variando nos diferentes pontos da Terra. Sua resolução temporal é quase diária (1 dia de revisita) considerando todos os satélites da constelação. Este sensor foi projetado para ter uma angulação de, no máximo, +25°. Sua resolução espacial é de 3 metros e seu *Ground Sample Distance* (GSD) é de 3,7m a nadir, reamostrados para 3 metros. O tamanho da cena imageada é de 32.5 km x 19.6 km, aproximadamente. Por ser um satélite

comercial suas imagens são pagas com licenciamento e distribuição restrita (PLANET'S LABS., 2022)

O sensor multiespectral presente nessa plataforma possui oito bandas espectrais (Figura 2.1). Comparado com seus antecessores *PlanetScope Dove-r* e *PlanetScope Classic*, que possuem apenas três ou quatro bandas espectrais.

A Figura 2.1 representa Função de Resposta Espectral Relativa das bandas espectrais do *Planet's SuperDove*.

Figura 2.1 - Função de Resposta Espectral *Planet's SuperDove*.

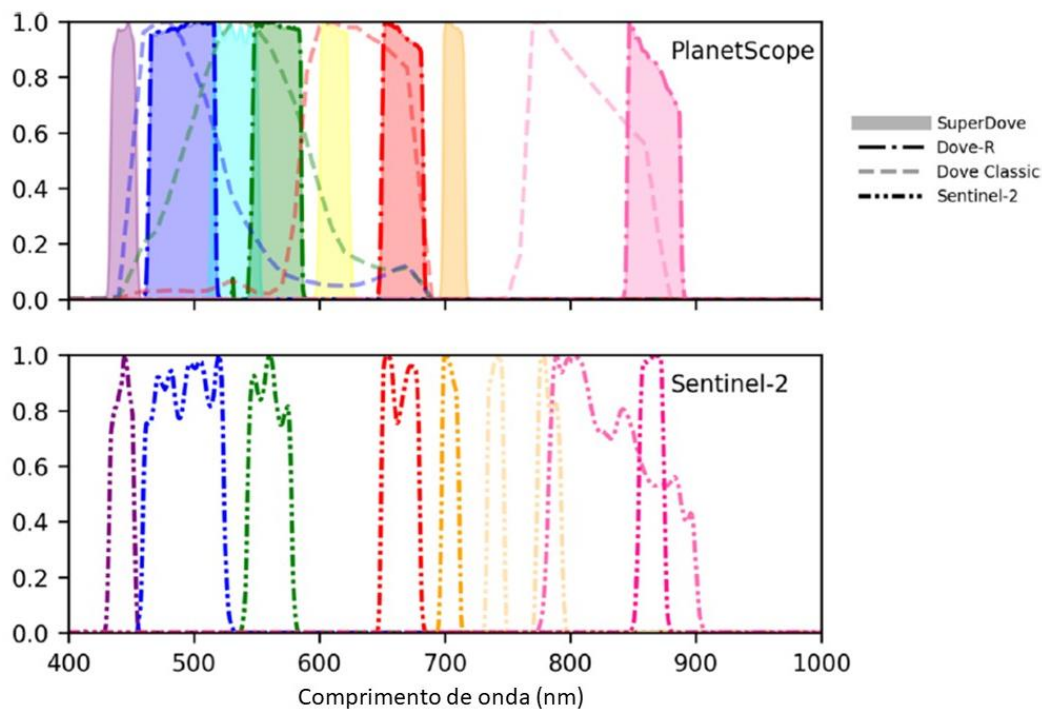


Fonte: Produção do autor.

Com o objetivo de evoluir os sensores *Doves* a *Planet* se inspirou na resposta espectral relativa do sensor *Multispectral Instrument* (MSI) do satélite *Sentinel-2* para a construção do sensor *SuperDove*. Das suas oito bandas 6 delas são exatamente coincidentes com a resposta espectral relativa do MSI. As bandas amarela e verde II podem ser avaliadas nesta comparação com a média das

bandas anterior e posterior. Pode-se perceber grande similaridade entre o *SuperDove* e *MSI*, além da SRF do *Dove-r* e *Dove-Classic*. (Planet's Labs., 2022)

Figura 2.2 - Comparação *PlanetScope SuperDove* e Sentinel 2 MSI.



Fonte: Adaptado de Planet (2021).

Este sensor possui resolução radiométrica de 12 bits reescalados para 16 bits. Todas as imagens do *PlanetScope* são coletadas e armazenadas com 12 bits. Na fase de processamento em solo, são aplicadas correções radiométricas e todas as imagens são reescaladas para um intervalo dinâmico de 16 bits (PLANET'S LABS., 2022). A SNR (Razão Sinal-Ruído) é um importante indicador da qualidade radiométrica de um sensor, principalmente para análises de qualidade de água, em que o sinal que emerge da coluna d'água é muito baixo. Nestes casos, é necessário um alto valor de SNR.

A formulação básica do SNR é:

$$SNR = \mu/\sigma \quad (2.1)$$

Onde,  $\mu$  é o sinal mediano e  $\sigma$  é o desvio padrão do sinal.

Algumas premissas são assumidas neste cálculo de SNR, como: O sinal médio é definido como a média espacial de um grupo de pixels homogêneos observados em uma cena variando espacialmente e o ruído é definido como o desvio padrão deste sinal para o mesmo grupo de pixels (demonstrado na Equação 2.1).

Tabela 2.1- Razão sinal-ruído do *SuperDove*.

Bandas	Imagem 1		Imagem 2		L <sub>ref</sub> (W m <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> )- Planet	SNR L <sub>ref</sub> (W m <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> ) - Planet
	Radiância média (W m <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> )	SNR	Radiância média (W m <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> )	SNR		
Azul	130	196	130	201	130	170
Verde	168	198	166	206	130	150
Vermelho	200	183	200	163	130	138
Vermelho limite	159	208	188	251	70	57
Infravermelho próximo	159	210	153	198	130	137

Fonte: Adaptado de EDAP (2021).

Percebe-se que os valores SNR (Tabela 2.2) estão acima do esperado pela Planet (SRN L<sub>ref</sub>) na fase de comissionamento.

A semelhança das bandas espectrais entre o *SuperDove* e *Sentinel-2* foi uma escolha de design calculada para permitir que o *Sentinel-2* seja utilizado como referência para calibração em órbita, utilizando cruzamentos simultâneos e sobrepostos. Como as respostas espectrais relativas (RSRs) entre *Sentinel-2* e *SuperDove* são muito similares, pode-se obter cenas de cruzamento de qualquer

lugar do mundo para realizar a calibração em órbita, e não limitado a apenas a locais de calibração bem caracterizados e determinado um fator de ajuste de banda espectral (SBAF) (PLANET LABS., 2022).

Todas as calibrações dos satélites da Planet são baseadas na coleta de um conjunto de dados de cruzamentos quase simultâneos com o Sentinel-2 como satélite de referência, com uma precisão radiométrica superior a 95% (PLANET LABS., 2022).

A calibração radiométrica absoluta do Sentinel é realizada todos os meses usando um difusor instalado no mecanismo de calibração e obturador. O Sentinel 2 utiliza vários métodos para validar a calibração radiométrica, incluindo medições em locais de Calibração Pseudo-Invariantes (PIC) (ESA, 2023). Devido a esta grande similaridade nas respostas espectrais relativas entre estes sensores não há necessidade de ajustes (PLANET LABS., 2022). Isso permite a coleta de cruzamentos simultâneos suficientes para permitir uma calibração rápida em órbita para a comissionamento após o lançamento.

Segundo o documento “ON-ORBIT RADIOMETRIC CALIBRATION OF THE PLANET SATELLITE FLEET: DOVES AND SKYSATS”, a calibração radiométrica do SuperDove é realizado da seguinte forma:

1. É realizada uma busca global por cruzamentos entre coletas do PS.SD e Sentinel-2 dentro de uma janela de 2 horas.
2. A superfície da Terra é dividida em uma grade regular para garantir diversidade de condições de solo e reflectância.
3. São selecionadas semanas aleatoriamente para evitar viés temporal.
4. Cenas com mais de 10% de nuvens são excluídas.
5. São coletados até 20.000 cruzamentos do Sentinel por satélite, divididos em dois grupos para atualização e validação da calibração.
6. A calibração é validada com dados do RadCalNet e comparada a dados de verdade terrestre.

7. Os produtos TOA são gerados com uma GSD de 20 metros, e os pixels correspondentes das imagens são analisados e comparados entre as duas imagens.

8. Estatísticas resumidas (média, mediana, moda etc.) são calculadas e registradas.

9. É realizado um ajuste linear ao gráfico de dispersão das modas de todos os pares de cruzamento (SuperDove vs. Sentinel-2) para cada satélite PS.SD.

## 2.2 Propriedades Ópticas Inerentes (POI)

As propriedades ópticas inerentes ao meio aquático são definidas em termos do coeficiente de absorção e do coeficiente de espalhamento, respectivamente  $a(\lambda)$  e  $b(\lambda)$  (GEGE, 2017). Essas propriedades são denominadas de Propriedades Ópticas Inerentes (IOPs - *Inherent Optical Properties*) porque suas magnitudes dependem somente da composição e da concentração das substâncias particuladas e dissolvidas presentes na água, além da própria água (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019). O coeficiente de absorção de uma amostra de água é definido por meio das equações abaixo (STRAMSKI et al., 2004):

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{CDOM}(\lambda) + a_{phy}(\lambda) + a_{NAP}(\lambda) \quad (2.2)$$

O coeficiente de espalhamento de uma amostra de água é definido por meio da equação abaixo (STRAMSKI et al., 2004):

$$b(\lambda) = b_w(\lambda) + b_{NAP}(\lambda) \quad (2.3)$$

Onde,  $a(\lambda)$  e  $b(\lambda)$  são, respectivamente os coeficientes de absorção e espalhamento da água;  $a_{CDOM}(\lambda)$  é o coeficiente de absorção pelo CDOM;  $a_{phy}(\lambda)$  o coeficiente de absorção por partículas fitoplanctonica;  $a_{NAP}(\lambda)$  o coeficiente de absorção não-algais.



### 2.3 Propriedades Ópticas Aparentes (POA)

As propriedades ópticas aparentes são combinações de grandezas radiométrica utilizadas como indicadores da cor e da transparência da água. Conceitualmente, pode-se dizer que as AOPs (*Apparent Optical Properties*, em inglês) quantificam e descrevem as mudanças às quais um corpo d'água submete o campo de luz incidente (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019).

As AOPs são definidas sob condições de iluminação natural em campo, onde o fluxo de luz solar incide segundo uma estrutura geométrica, direcional e espectral instantânea qualquer. As AOPs dependem tanto da composição do corpo d'água (das IOPs) quanto das condições ambientais (forma da superfície da água, vento, mudança na intensidade luminosa devido à mudança de elevação solar e à passagem de nuvens, estação do ano etc.) (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019).

Dentre as POAs de interesse destaca-se: reflectância espectral de sensoriamento remoto ( $R_{rs}(\theta, \phi, \lambda)$ ,  $sr^{-1}$ ), definida pela razão da radiância emergente da coluna d'água ( $L_w(\theta, \phi, \lambda)$ ) pela irradiância incidente ( $E_s(\lambda)$ ) (Equação 2.4) (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019). Onde  $\theta$  é o ângulo zenital,  $\phi$  o ângulo azimutal e  $\lambda$  o comprimento de onda específico.

$$R_{rs}(\theta, \phi, \lambda) = \frac{L_w(\theta, \phi, \lambda)}{E_s} \quad (2.4)$$

### 2.4 Constituintes Ópticamente Ativos (COA)

Os Constituintes Ópticamente Ativos (COAs) são partículas ou moléculas na coluna d'água que interagem com a radiação eletromagnética (KIRK, 2010). Os COAs foram categorizados com base em semelhanças no comportamento espectral: água pura, Matéria Orgânica Dissolvida Colorida (CDOM), tripton e fitoplâncton. Cada classe de COA possui seus valores específicos de IOPs (Propriedades Ópticas Inerentes). Portanto, somar contribuições parciais de COAs resulta nos coeficientes de IOPs totais, uma vez que esta é uma

característica conservativa. Água pura refere-se às propriedades espectrais da água molecular. Ela tem importância mínima para ecossistemas de água doce, uma vez que a forma espectral da região visível é predominantemente dominada por outros COAs (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019). O CDOM é composto por compostos orgânicos dissolvidos na água que têm origem em processos alóctones (por exemplo, decomposição de plantas) ou autóctones (por exemplo, decomposição de matéria orgânica excretada por algas) (KIRK, 2010). O tripton ou Partículas Não Algas (NAP) são sólidos suspensos inanimados que não são fotossinteticamente ativos, incluindo compostos suspensos inorgânicos e orgânicos (KIRK, 2010). O fitoplâncton possui estruturas fotossintéticas e outros compostos opticamente ativos (BIDIGARE et al., 1990). Existem diferentes táxons de fitoplâncton, com vários pigmentos fotossintéticos e de proteção absorvendo fótons seletivamente (KIRK, 2011).

Diversos estudos têm categorizado corpos d'água com base em suas propriedades ópticas para facilitar a modelagem bio-óptica. Morel e Prieur (1977) foram os primeiros a separar os corpos d'água em águas Caso 1 e Caso 2. As águas do Caso 1 foram definidas como corpos d'água cujo comportamento espectral era determinado pela concentração de clorofila-a, com os outros COAs que covariam com o fitoplâncton. Nas águas do Caso 2, a suposição da dominância espectral da clorofila-a é violada, e as propriedades ópticas dependem de todos os COAs. Esta classificação foi importante para o desenvolvimento de modelagem de IOPs, uma vez que os algoritmos bio-ópticos foram criados com base nas suposições feitas para cada classe (MOBLEY et al., 2004). No entanto, Mobley et al. (2004) sugeriram que a água deve ser vista como um conjunto misto de partículas dissolvidas e suspensas influenciadas por outros fatores ambientais e devem ser analisadas individualmente. Recentemente, alguns esforços foram feitos para categorizar os ecossistemas de água doce em Tipos Ópticos de Água (OWTs) para facilitar as avaliações de sensoriamento remoto (SPYRAKOS et al., 2018; DA SILVA et al., 2021a).

### 3 MATERIAL E MÉTODO

A Figura 3.1 apresenta os passos metodológicos realizados nesta pesquisa. Os dados de campo foram organizados, pré-processados e simulados para as bandas do sensor. Foram espacializados todos os pontos das coletas insitu para criação de buffer de 10 metros de raio para extração do valor de mediana dos pixels das imagens. Para as imagens SuperDove foi realizado o download para os mesmos dias em que foram obtidas as medidas de Rrs in situ, em dois níveis de processamento (Top-of-Atmosphere e Surface Reflectance) e selecionadas as imagens com a menor cobertura de nuvens ou sombra possível. Com os dados TOA foram realizadas correções atmosféricas para todas as imagens, em todas as bandas, por meio do método ACOLITE DSF que foram em seguida dividido por  $\pi$  para obtenção de imagens de reflectância de sensoriamento remoto. Com as imagens Surface Reflectance foram realizados os reescalamentos das imagens (as imagens são armazenadas com valores de pixels em números inteiros para economia de espaço e assim evitar erros de quantização) e divididas por  $\pi$  para obtenção de imagens de reflectância de sensoriamento remoto.

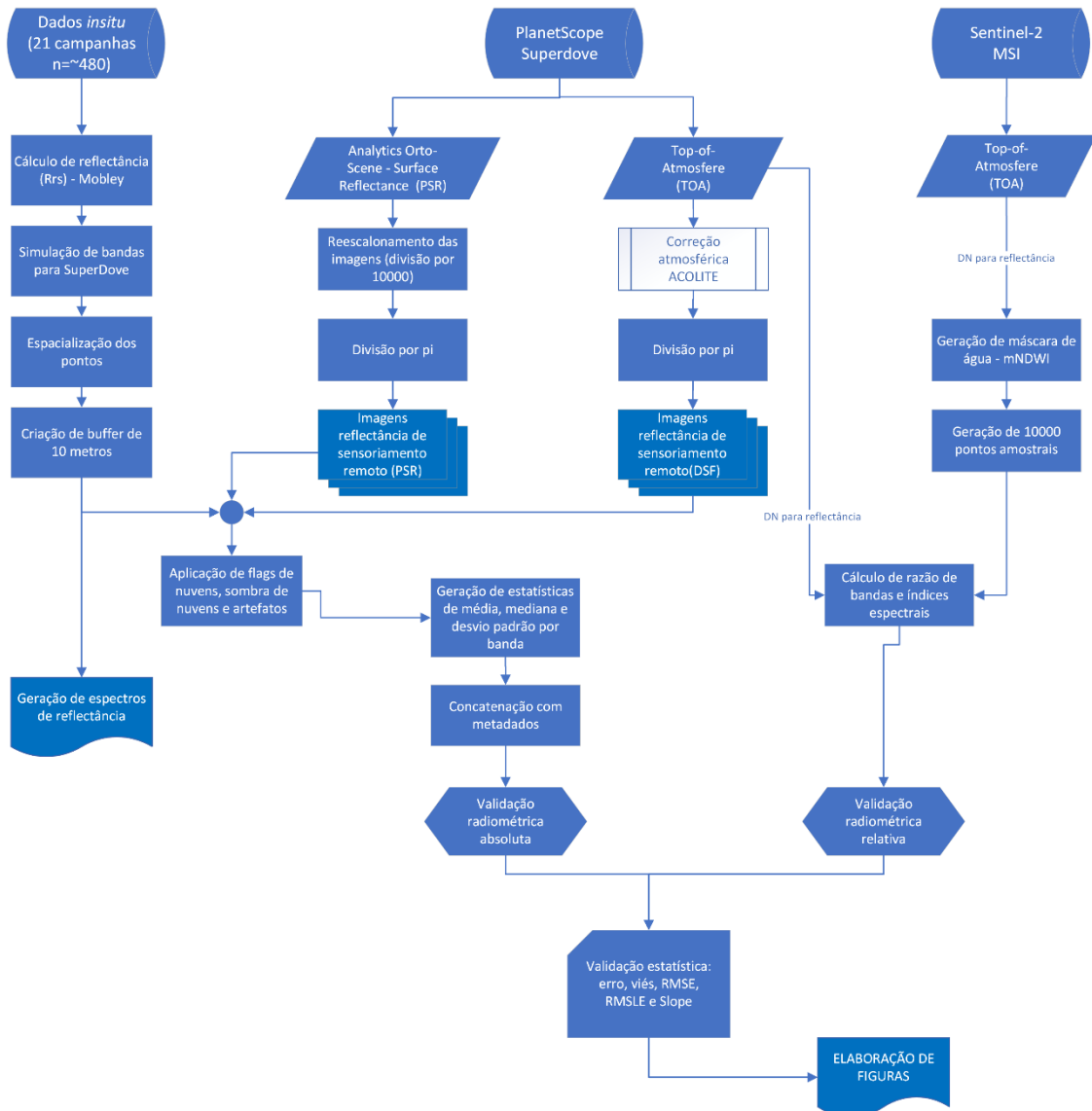
Após estes processamentos, com as imagens de reflectância de sensoriamento remoto e os pontos – buffers - espacializados, foram aplicadas *flags* nas áreas dos levantamentos, naquelas onde havia intersecção com artefatos, nuvem ou sombra de nuvem, *haze* ou eram próximas à margem dos corpos de água, para evitar grande efeito de adjacência.

Na sequência todas as bandas das imagens foram mescladas e criado arquivo único para a extração das estatísticas das imagens (mediana, média e desvio padrão). Após este processamento foram concatenadas à análise os metadados contidos nos arquivos (ex.: ângulo azimutal, ângulo do sensor, zênite, data e hora do registro etc.). Com estes dados consolidados foram validadas com as métricas estatísticas descritas na Seção 3.6 e produzidos os gráficos destas estatísticas para entendimento da acurácia radiométrica do sensor em questão. Em relação a utilização dos dados TOA do MSI, foi realizada máscara de água com o índice mNDWI e criado 10000 pontos amostrais distribuídas

aleatoriamente na imagem. Depois disso, foram comparadas todas as bandas, índices espectrais e razões de banda com os dados TOA do SuperDove.

Abaixo fluxograma (Figura 3.1) contendo os passos metodológicos desta pesquisa.

Figura 3.1 – Fluxograma metodologia.



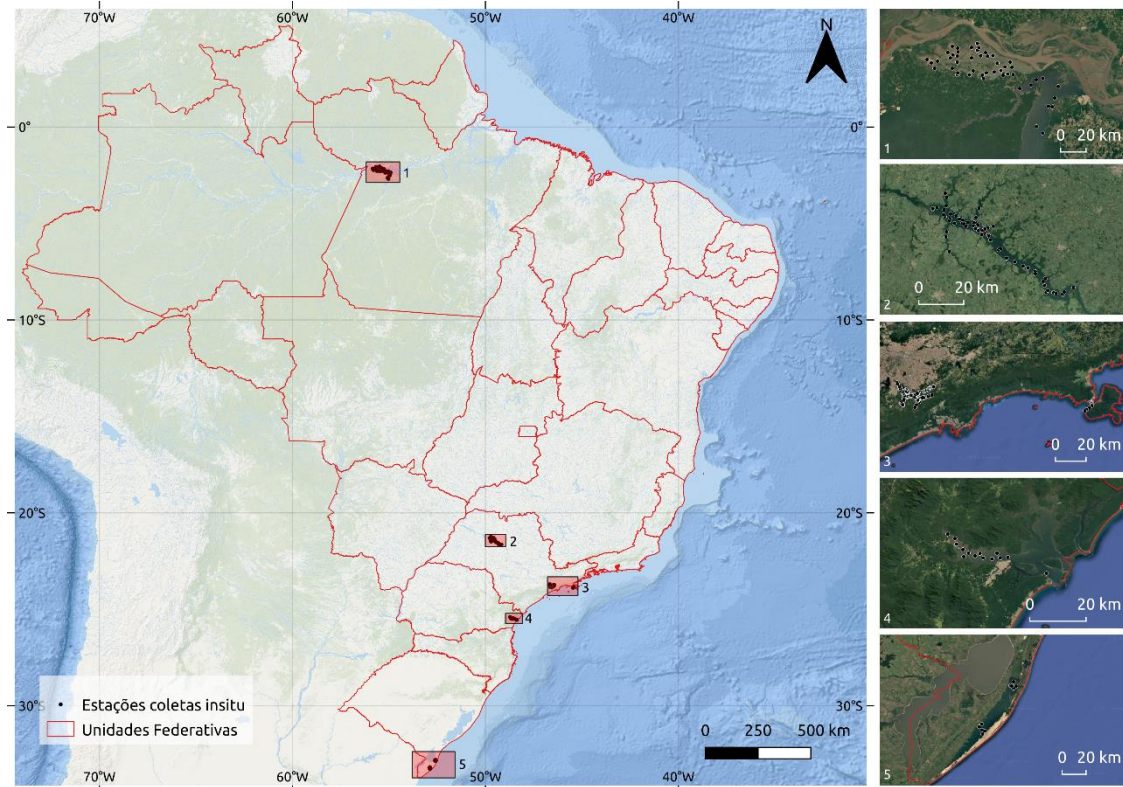
Fonte: Produção do autor.

### **3.1 Áreas de estudo**

Para validar a acurácia radiométrica do sensor SuperDove, dados in situ foram utilizados para análise de correspondência em várias áreas do Brasil (Figura 3.2): Lago Grande do Curuai e Rio Tapajós - Estado do Pará, Reservatórios Billings, Promissão e Canal de São Sebastião - Estado de São Paulo, Baía de Paranaguá - Estado do Paraná e Lagoa da Mangueira - Estado do Rio Grande do Sul.

Estes locais (Figura 3.2) representam uma ampla diversidade de Tipos Ópticos de Água (OWTs) em águas brasileiras, com representação de reservatórios eutrofizado (Billings e Promissão), ambientes costeiros (Canal de São Sebastião e Paranaguá), águas turvas/escuras (planície de inundação da Amazônia), águas claras (Rio Tapajós) e um ambiente de lagoa com alta turbidez (Mangueira).

Figura 3.2 - Área de Estudo.



Os rótulos em cada figura representam cada localização: **1.** AMZ - Lago Grande do Curuai (GLC) e Rio Tapajós (RTPJ); **2.** PROM - Reservatório de Promissão; **3.** BILL - Reservatório Billings (à esquerda) e SEB - São Sebastião (à direita); **4.** PAR - Baía de Paranaguá; e **5.** MANG - Lagoa da Mangueira.

Fonte: Produção do autor.

### 3.1.1 Reservatório Billings (BILL)

O reservatório Billings (BILL) - ou Represa Billings é uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica Alto Tietê, localiza-se no sudeste da Região metropolitana de São Paulo (RMSP), entre os municípios de Santo André, São Bernardo do Campo, Diadema, Ribeirão Pires e São Paulo. Possui um espelho d'água de 127 milhões de m<sup>2</sup> e uma profundidade média de 10 metros (com máxima de 19 metros), dividida em oito unidades – ou braços. São estes: Rio Grande, Rio Pequeno, Capivari, Pedra Branca, Taquacetuba, Bororé, Cocaia e Alvarenga. Está localizado a 746,5 m de altitude e inserida na Bacia Hidrográfica do Tietê.

Atualmente, na Represa Billings há dois importantes mananciais que abastecem a RMSP, o Reservatório Rio Grande (localizado no braço Rio Grande, isolado do restante da represa) e o braço Taquacetuba. O primeiro reservatório abastece 1,2 milhões de pessoas na região do Grande ABC Paulista (SP), enquanto o segundo braço reverte água para a Represa Guarapiranga, segunda maior represa de abastecimento público da RMSP, que atende a 3,8 milhões de pessoas. (CARDOSO-SILVA et al., 2014). Este reservatório vem sofrendo um processo de eutrofização e contaminação da água há quase um século (CÔRTEZ et al., 2015).

### **3.1.2 Reservatório Promissão (PROM)**

Reservatório de Promissão (Figura 3.2), é o quarto maior reservatório na Reservatório do Sistema de Cascata do Tietê. Cobre um total de 22 municípios e apresenta uma área inundada de 560 km<sup>2</sup> com 57.610 km<sup>2</sup> de drenagem e um tempo médio de residência de 134,1 dias. Entre suas características hidrológicas, o reservatório acumula um volume útil de 2.128 km<sup>3</sup> e opera com níveis mínimos e máximos de água de 379,7 e 384 metros. É um reservatório eutrofizado, com grande influência de contaminação da agricultura e das águas drenadas pela bacia do Rio Tietê a montante. (CESP, 1989).

### **3.1.3 Canal de São Sebastião (SEB)**

O canal de São Sebastião está localizado no estado de São Paulo, próximas aos municípios de São Sebastião e Ilhabela (Figura 3.2). A produção de clorofila-a nesta região está associada à atividade turística da estação úmida (verão) na região e às intensas chuvas (MARANDOLA et al., 2013). Por outro lado, na estação seca, a produção primária da água aumenta devido ao aumento da transparência da água (BOUILLON et al., 2009). A concentração de clorofila-a varia de 0,45 a 3 mgL<sup>-1</sup> (BETTENCOURT et al., 2019).

### **3.1.4 Lago Grande do Curuai (GLC)**

O Lago Grande do Curuai (Figura 3.2) está localizado na Planície de Inundação do Baixo Rio Amazonas. Essa região é caracterizada por lagos rasos e extensos, cujas profundidades variam ao longo do ano hidrológico do Rio Amazonas e podem alcançar uma alta concentração de sedimentos suspensos na estação

seca (até 1000 mgL<sup>-1</sup>) (BARBOSA et al., 2010). Na bacia amazônica, os rios e lagos de planície de inundação apresentam águas escuras ricas em carbono orgânico dissolvido, águas brancas com alta concentração de material em suspensão total (TSS), e águas claras com baixas concentrações de TSS, clorofila-a (Chl-a) e material orgânico dissolvido em água (CDOM) (SIOLI, 1968).

### **3.1.5 Rio Tapajós (RTPJ)**

O Rio Tapajós (Figura 3.2) é representado por um ambiente de águas claras, com baixa concentração de sedimentos suspensos e matéria orgânica (valores de concentração de sedimentos suspensos de até 5 mgL<sup>-1</sup>) (LOBO et al., 2015).

### **3.1.6 Rio Arapiuns (ARAP)**

Rio Arapiuns é classificado como de águas claras e transparentes, ácidas e pouco mineralizadas. (PASCOALOTO et al., 2014), apesar da coloração aparentemente escura ao se olhar o corpo d'água. Este rio possui baixa concentração de CDOM (CUNHA et al., 2011).

### **3.1.7 Baía de Paranaguá (PAR)**

O Complexo Estuarino de Paranaguá (Figura 3.2), ou Baía de Paranaguá, é um estuário de planície costeira localizado na costa média do Estado do Paraná. Possui dois eixos principais chamados de baía de Laranjeiras (norte-sul) e baía de Paranaguá (leste-oeste) (LAMOUR et al., 2009). O sistema Antonina-Paranaguá se estende por cerca de 50 km, e a circulação da água é governada por correntes de maré, com influência sazonal do fluxo dos rios. A turbidez atinge até 10 NTU próximo aos bancos de areia do delta, diminuindo para leste e sul e aumentando novamente próximo à cidade de Paranaguá. Além disso, a cidade de Paranaguá possui o principal porto de grãos do Brasil; a maior turbidez nesta área sugere que o porto de Paranaguá é o motivo desta turbidez (SILVA et al., 2019).

### **3.1.8 Lagoa de Mangueira (MANG)**

A Lagoa Mangueira (Figura 3.2) é uma grande lagoa subtropical rasa localizada na costa do estado do Rio Grande do Sul, próxima à fronteira entre Brasil e Uruguai. Possui um estado trófico variando de oligotrófico a mesotrófico. As



condições mesotróficas ocorrem na primavera e no verão, quando sofre uma notável retirada de água para a irrigação de lavouras de arroz e um alto aporte de nutrientes de sua bacia hidrográfica (FRAGOSO et al., 2019).

### 3.2 Dados *insitu*

Os dados das campanhas *insitu* abrangem o período de 3 anos, de novembro de 2020 a novembro de 2023.

Para coleta dos dados radiométricos foram utilizados três espectralradiômetros RAMSES-TriOS, posicionados na parte superior do barco, sendo dois radiômetros de radiância e um de irradiância. Os três instrumentos são responsáveis por medir: a irradiância incidente na superfície ( $E_s(\lambda)$ ), a radiância emergente da água acima da superfície ( $L_t(\lambda)$ ) ( $\theta=45^\circ$ ,  $\phi=135^\circ$ ), e a radiância do céu ( $L_{sky}(\lambda)$ ) ( $\theta=45^\circ$ ,  $\phi=135^\circ$ ).

As medidas coletadas pelos TriOS são processadas seguindo o protocolo descrito em Cairo (2015). Após o pré-processamento, os dados são utilizados para o cálculo da reflectância de sensoriamento ( $R_{rs}(\lambda)$ ,  $sr-1$ ), por meio da seguinte equação (MOBLEY, 1999):

$$R_{rs}(\theta, \Phi, \lambda) = \frac{L_w}{E_s} = \frac{L_t(\theta, \Phi, \lambda)}{E_s(\lambda)} - \frac{\rho(\theta, \Phi) \cdot L_{sky}(\theta', \Phi, \lambda)}{E_s(\lambda)} \quad (3.1)$$

Onde,  $L_t$ ,  $L_{sky}$  e  $E_s$  são medidos pelos espectralradiômetros; e os valores de  $\rho(\theta, \phi)$  serão obtidos a partir de Mobley (2015) utilizando dados do ângulo zenital solar, geometria de visada e velocidade do vento, que é medida com um anemômetro concomitante com as medições do TriOS.

Com o intuito de reduzir os efeitos de variação de coberturas de nuvens e de iluminação (resultando na intensidade e na qualidade da radiância medida), para cada ponto amostral, aproximadamente 150 espectros são medidos, e após a remoção de outliers, o espectro representativo de cada ponto amostral é escolhido com base no menor valor do somatório da diferença entre a mediana

de todos os espectros medidos e cada um dos espectros após a remoção dos outliers (MACIEL, 2019).

$$Diff_{Rrs(i)} = \sum_{\lambda=400}^{900} |R_{rs}(i, \lambda) - R_{rs(\text{mediana})}(\lambda)| \quad (3.2)$$

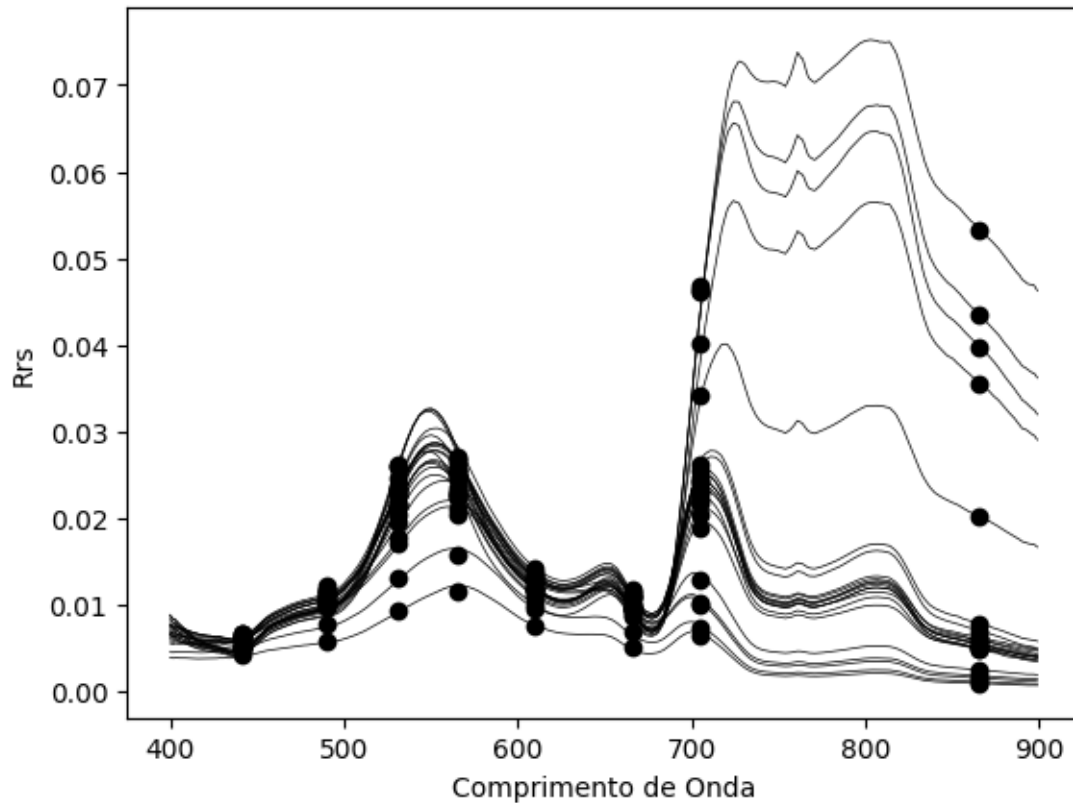
Sendo,  $Diff_{Rrs(i)}$  a diferença entre a mediana  $R_{rs(\text{mediana})}(\lambda)$  e o valor de  $Rrs$  em cada comprimento de onda para a medida  $i$ . Após o processamento dos dados radiométricos *insitu*, os valores de  $Rrs$  escolhidos para cada amostra foram interpolados para 1nm e usados para simular a  $Rrs$  nas bandas espectrais do sensor SuperDove com base na sua função de resposta espectral, aplicando a seguinte equação (PELLOQUIN; NIEKE, 2012; WATANABE et al., 2018):

$$R_{rs\ sim}(B_i) = \frac{\int_{\lambda_n}^{\lambda_m} SRF(\lambda) \cdot R_{rs\ m}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_n}^{\lambda_m} SRF(\lambda) d\lambda} \quad (3.3)$$

Onde,  $R_{rs\ sim}(B_i)$  é a  $Rrs$  simulada para a  $i$ -ésima faixa espectral do sensor SuperDove;  $SRF(\lambda)$  é a função de resposta espectral do sensor em um comprimento de onda específico; e  $R_{rs\ m}(\lambda)$  é a  $Rrs$  medida em campo para o intervalo  $[n, m]$  que compõe a faixa espectral do sensor.

A seguir (Figura 3.3) um exemplo de espectros de campo simulados para as bandas do sensor SuperDove.

Figura 3.3 – Espectros de campo simulados.



As circunferências representam os dados simulados para o SuperDove e as linhas os dados de campo medidos *insitu* com processamento descrito acima.

Fonte: Produção do autor.

Após convolução para os dados *insitu* simulados, foram realizados alguns processamentos com critérios descritos em (PAHLEVAN et al., 2021). Imagens de alta e altíssima resolução espacial possuem fenômeno conhecido como *salt and pepper* (VANHELLEMONT, 2019; MACIEL et al., 2020), por isso, foi produzido um buffer com raio de 10 metros e calculado o valor da mediana dos pixels para supressão de ruídos e homogeneização de maior variabilidade na resposta espectral. A seguir, foram aplicadas *flags* nos dados de campo para aqueles pontos que possuíam nuvens, sombra de nuvens, *haze*, artefatos, *glint* e localizados muito próximos a margem por possuírem grande efeito de adjacência. Este processamento foi realizado de forma visual para todas as coletas de campo e estes pontos foram excluídos das análises. Adicionalmente,

as amostras com  $\rho_s < 0$  nas bandas do visível e infravermelho próximo foram removidas.

### 3.3 Dados de satélite

Os dados satelitais da Planet foram obtidos a partir de convênio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) com o *Norway's International Climate and Forests Initiative Satellite Data Program* (NICFI) (exceto dados de MANG), por meio do qual os usuários de países signatários podem utilizar imagens Planet para pesquisa e desenvolvimento com objetivo de preservação das florestas tropicais no mundo. Este programa tem como objetivo “ajudar a reduzir e reverter a perda das florestas tropicais, combater as mudanças climáticas, conservar a biodiversidade e facilitar o desenvolvimento sustentável.” (PLANET LAB., 2023)

Os dados de satélite de PSD foram baixados em dois níveis de processamento: TOA e SR (*Level 3B*) com limiar máximo de cobertura de nuvem de 40%, por Região de Interesse (ROI). A análise de sobreposição de nuvens e sombra de nuvens está descrita em dados *insitu* (Seção 3.2).

A seguir Tabela 3.1 com métricas a respeito do ângulo de incidência, ângulo de iluminação azimutal e visada do sensor das imagens obtidas para este trabalho. Vale ressaltar que o ângulo de visada do sensor, nesta pesquisa, não ultrapassa 5,2 °.

Tabela 3.1 Métricas estatísticas dos metadados PSD.

	Ângulo de incidência	Ângulo de iluminação azimutal	Ângulo de iluminação de elevação	Ângulo azimutal	Ângulo de visada do sensor
<b>Mínimo</b>	0.06	35.25	30.31	7.48	0.04
<b>Máximo</b>	5.60	97.92	68.35	11.81	5.17
<b>Média</b>	2.78	63.02	45.16	11.09	2.55

Fonte: Produção do autor.

Na avaliação da acurácia relativa, foram utilizadas as imagens datadas de 08 de julho de 2023, capturadas pelos sensores MSI e PSD. O sensor PSD específico é identificado pelo código 2481 (20230708\_134810\_00\_2481), com aquisição registrada em 2023-07-08T13:48:10.006936Z. O ângulo de visão do sensor é de 0.6°, com um ângulo azimutal de 282.2° e um ângulo azimutal de iluminação de 47.9° e sua elevação solar, no momento da captura, de 52.1°.

Em relação ao sensor MSI do Sentinel-2A, a imagem foi capturada quase simultaneamente à do PSD (em 08 de julho de 2023 às 14:07:11.024Z) e processada no nível de processamento Level-1C (S2MSI1C) durante órbita descendente.

### 3.4 Correção atmosférica

Segundo Martins et al. (2018) o processo de correção atmosférica é um pré-requisito para que se possa utilizar as propriedades espectrais das massas de água sem o efeito atmosférico em análises quantitativas. A quantização dos aerossóis, vapor de água, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), nitrogênio (N<sub>2</sub>), oxigênio (O<sub>2</sub>), ozônio (O<sub>3</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nítrico (NO<sub>2</sub>), tem um comportamento de absorver ou espalhar diferentemente em faixas do comprimento de onda, sendo que os processos de absorção reduzem a transmitância atmosférica em diversas bandas do espectro eletromagnético, assim, o espalhamento

atmosférico possui o efeito aditivo no sinal medido pelo sensor (MARTINS et al., 2018)

### 3.4.1 ACOLITE DSF

*Atmospheric Correction for OLI Lite* (ACOLITE DSF) é um método de correção atmosférica desenvolvido para recuperação de informações radiométricas de ambientes aquáticos (VANHELLEMONT; RUDDICK, 2018) em escala métrica e submétrica (RBINS, 2020) para diferentes sensores. Foi desenvolvido por Vanhellemont pelo *Royal Belgian Institute of Natural Sciences* (RBINS), na forma *open-source* e adaptado para ambiente de programação Python. Este método é mais adequado para o processamento de águas turbidas e pequenos corpos d'água interiores, mas pode ser usado com razoável sucesso em águas mais claras e em ambientes terrestres (RBINS, 2020). Para este trabalho foi utilizada a versão 20220222.

O método utilizado pelo ACOLITE para obtenção do aerossol é conhecido como *Dark Spectrum Fitting* (DSF). Este método seleciona a melhor combinação de bandas e modelo de aerossol para obter os parâmetros necessários para a correção atmosférica. Esta abordagem, descrita por Vanhellemont (2019), consiste na construção de um espectro escuro ( $P_{\text{dark}}$ ) a partir do objeto com a mais baixa reflectância no Topo da Atmosfera (TOA) observada em cada banda. Também é calculado um espectro da reflectância da trajetória atmosférica ( $P_{\text{path}}$ ) para uma visualização de cena específica de sol e visada de geometria, bem como os modelos de aerossol *Continental* e *Marítimo* e a espessura óptica do aerossol a 550nm. Depois é calculada a Raiz da Diferença Média Quadrática (RMSD) entre  $P_{\text{dark}}$  e  $P_{\text{path}}$  para cada par de bandas contendo a banda ajustada. A combinação do modelo de aerossol e banda com a mais baixa RMSD é selecionada como o melhor ajuste para a correção da atmosfera. Outros parâmetros necessários para a correção atmosférica são extraídos pelo método *Look-up-Table* (LUT) implementado no método de correção atmosférica de modelo de transferência radiativa (RTM) *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum* (6SV) (KOTCHENOVA et al., 2006; VERMOTE et al., 2006).

### 3.4.2 Planet SR - 6SV

Os dados de *Surface Reflectance* da Planet utilizam o 6SV (VERMOTE et al., 1997) que é um Modelo de Transferência Radiativa (RTM) que se consolidou como um dos RTMs padrão usados para pesquisa de sensoriamento remoto e a criação de produtos operacionais e tem sido empregado com sucesso para diferentes sensores para aplicações em águas interiores (MARTINS et al., 2017; MACIEL et al., 2019; KRAVITZ et al., 2020).

O 6S simula a transferência radiativa atmosférica de partículas polarizadas e não polarizadas de radiação visível e infravermelha sob diferentes condições atmosféricas. Os parâmetros incluem as condições atmosféricas, altitude do sensor e alvo, comprimento de onda e refletância do solo. Este modo de correção atmosférica permite o cálculo de uma refletância de solo, dado valor no sensor de radiância ou refletância e define um conjunto de parâmetros e condições atmosféricas (VERMOTE et al., 1997).

As saídas principais de simulação são reflectância no sensor e radiância, divididos em seus componentes, bem como, uma série de outros parâmetros atmosféricos calculados, como transmitância de CO, ângulo de espalhamento, transmitância, reflectância atmosférica intrínseca, dispersão de Rayleigh, transmissão de CH<sub>4</sub>, profundidade óptica, albedo esférico, reflectância, entre outros (VERMOTE et al., 1997).

Este método utiliza dados do sensor MODIS/Terra *Aerosol Optical Thickness Daily L3 Global 0.05Deg CMA* (MOD09CMA, MOD09CMG e MOD08-D3) de vapor d'água, ozônio e aerossóis a partir de geração LUT.

Entretanto, este método possui algumas limitações. Em alguns casos não há dados MODIS sobrepostos a uma cena do Planet. Nesses casos, o Aerosol Optical Depth (AOD) é definido para um valor de 0,226 que corresponde a uma visibilidade de "céu claro" de 23 km de visibilidade, o aot\_quality é definido como o valor MODIS "sem dados" de 127, e aot\_status é definido como 'Dados ausentes - usando AOT padrão'. Se não há sobreposição de dados de vapor de água ou ozônio, a correção vai para um modelo 6S interno predefinido. Os efeitos de neblina e nuvens cirrus finos não são corrigidos e o tipo de aerossol é limitado

a um único modelo global. Luz difusa e efeitos de adjacência não são corrigidos (VERMOTE et al., 1997).

É importante salientar que PSR assume pressão atmosférica normal, enquanto ACOLITE DSF leva em conta variações de pressão, utilizando dados de elevação do Modelo Digital de Elevação (DEM) fornecido pela Missão de Topografia Radar do Ônibus Espacial (SRTM). Para alvos em uma elevação significativamente diferente do nível do mar, os produtos PSR atuais não são suficientes, e a pressão atmosférica variável precisa ser levada em conta na correção atmosférica. (VANHELLEMONT, 2023).

### **3.5 Avaliação radiométrica relativa TOA vs. TOA**

Uma das avaliações de acurácia radiométrica relativa comumente aplicadas para o monitoramento da superfície da Terra foi realizada em relação às bandas com sobreposição espectral do Sentinel-2. (TU et al., 2022).

Os satélites Sentinel-2A/B foram lançados respectivamente nas datas de junho de 2015 e março de 2017, pela *Copernicus* que compõe a observação da terra do Programa Espacial da União Europeia (ESA). Possui órbita heliossíncrona polar, em conjunto possuem uma resolução temporal de aproximadamente 5 dias. Seu sensor óptico MSI de imageamento *pushbroom*, possui a resolução espectral de 13 bandas. Sua resolução espacial varia de 10 metros (VIS e NIR) e 20m (RE e SWIR) e 60m (Banda 1, 9 e 10) e sua resolução radiométrica é de 12 bits (ESA, 2021a).

Foram selecionadas as bandas coincidentes do MSI, sendo estas: azul, verde, vermelho, vermelho limítrofe e infravermelho próximo (MSI – 490, 560, 665 e 865nm; PSD – 490, 565, 666, 7 05 e 865nm, respectivamente). A banda azul costeira foi excluída da análise, apesar de serem coincidentes, pois a resolução espacial do MSI (60m) é muito degradada em relação ao PS.SD.

Foi criado uma máscara de água a partir dos dados do Sentinel-2 MSI com o *Modified Normalized Difference Water Index* (mNDWI) (Equação 3.4), largamente utilizado para identificação de corpos d'água em imagens de satélite.



Para a criação deste índice foram reamostrados os valores dos pixels da banda SWIR de 60m para 10m para serem coincidente com a banda do verde. Foi estabelecido um limiar com valores positivos para água.

Para mitigação do efeito de adjacência foi criado um buffer reverso de 40m para afastamento das margens dos corpos d'água e produzidos 10.000 pontos amostrais para *matchups*. A resolução espacial dos dados de PS.SD foi reamostrada para 10m a partir da média para coincidência com a resolução espacial do MSI. O efeito de pequenos desalinhamentos posicionais entre os limites dos pixels foi considerado negligenciável.

$$mNDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{SWIR}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR}} \quad (3.4)$$

Embora as respostas espectrais dos dois sensores sejam ligeiramente diferentes, essa diferença foi amenizada com a criação de diferentes razões de bandas (todas com todas) e índice espectral *Normalized Difference Chlorophyll Index* (NDCI) (Equação 3.5) (MISHRA; MISHRA, 2012).

$$NDCI = \frac{\rho_{RE} - \rho_{RED}}{\rho_{RE} + \rho_{RED}} \quad (3.5)$$

Para além do NDCI, foram utilizadas *Red Band Index* (RBI) (Equação 3.6) (HENDERIKX FREITAS; DIERSSEN, 2019), sendo estes *Red Band Ratio* (RBR) 2 e 3 (Equação 3.7 e 3.8) (WANG; SHI, 2005; GITELSON et al., 2008).

$$RBD = RE - R \quad (3.6)$$

$$RBR2 = R^{-1} \cdot RE \quad (3.7)$$

$$RBR3 = (R^{-1} - RE^{-1}) \quad (3.8)$$

A busca pelas imagens na região foi realizada com o objetivo de encontrar a menor cobertura de nuvens possível, com atmosfera “limpa” e ausência de *haze* e *glint*.

### 3.6 Validações

Os modelos de correção atmosférica foram avaliados de duas maneiras: uma abordagem qualitativa comparando as medições de *Rrs* realizadas *insitu* (adaptadas para as bandas SuperDove) com os valores de *Rrs* de superfície obtidos por satélite; e uma abordagem quantitativa utilizando as seguintes métricas: Acurácia Simétrica Mediana ( $\varepsilon$ ), o viés (*Bias* -  $\beta$ ), o erro quadrático médio (RMSE), o Erro Percentual Médio Absoluto (MAPE) e Erro Médio Quadrático da Raiz do Logaritmo (RMSLE).  $\varepsilon$ ,  $\beta$  e RMSLE foram calculados em escala logarítmica, pois foi demonstrado que são menos sensíveis a valores extremos (*outliers*), são centradas em zero e de fácil interpretação. As duas principais métricas são Acurácia Simétrica Mediana ( $\varepsilon$ ) e o viés (*Bias* -  $\beta$ ) (PAHLEVAN et al., 2021). RMSE, RMSLE, MAPE e *Slope* (S) foram calculadas para comparação com estudos prévios, disponíveis na literatura.

$$\varepsilon = 100 * (10^y - 1), \text{ onde } Y = \text{Mediana} \left| \frac{est_i}{med_i} \right| \quad (3.9)$$

$$\beta = 100 * (10^{|z|}), \text{ onde } Z = \text{Mediana} \left( \frac{est_i}{med_i} \right) \quad 3.10$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad 3.11$$

$$MAPE = 100 * \sum_{i=1}^n \frac{|est_i|}{med_i} \quad 3.12$$

$$RMSLE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((est_i + 1) - (med_i + 1))^2} \quad 3.13$$

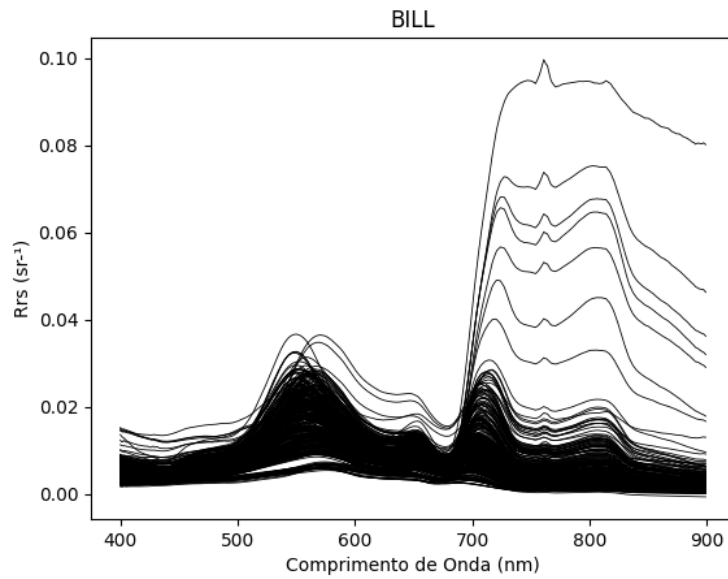
Onde, Est = estimado pelo sensor, med = medido em campo.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Análise dos espectros de reflectância

Observando os espectros de reflectância nas Figuras 4.1 a 4.8 é possível notar grande variabilidade de tipos ópticos nas águas brasileiras estudadas nesta pesquisa. O reservatório Billings, localizado próximo à região metropolitana de São Paulo, possui as curvas com maiores respostas espectrais, com valores chegando próximos de  $0,1sr^{-1}$ . A Figura 4.1 ilustra resposta espectral altas nos levantamentos de campo, principalmente na região próxima a 550nm (verde), com valores que variam de 0,03 a  $0,02sr^{-1}$ , onde ocorre um pico com deslocamento em direção a 600nm. É possível observar absorção no azul e em aproximadamente 665nm, indicando presença de clorofila-a. Os valores de Rrs em 430nm e 675nm são reduzidos pelos picos de absorção da clorofila-a (MOREL e BRICAUD 1981). Ainda é possível observar a presença desse pigmento no vale bem pronunciado em 680nm. Billings possui grande reflectância próximo a 710nm, 760nm e 810nm, indicando presença de fitoplâncton com *blooms* algais flutuantes, formadora de película biológica (MATTHEWS, 2017). É possível inferir que parte das estações de campo possuem presença de clorofila-a observando grande absorção em torno de 440nm. As curvas com menor reflectância demonstram grande absorção da água, com menor presença de COAs. É possível observar absorção em 615nm, característico do pigmento c-ficocianina presentes nas cianobactérias e em 675nm característico de clorofila-a (VANHELLEMONT, 2023).

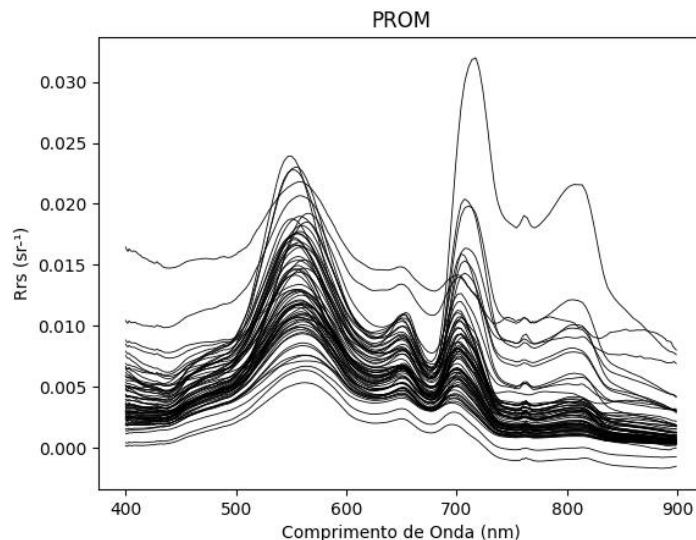
Figura 4.1 – Rrs Reservatório Billings.



Fonte: Produção do autor.

Os espectros de refletância das coletas *insitu* de Promissão (Figura 4.2) possuem algumas similaridades com o reservatório Billings no que diz respeito a presença de fitoplâncton e florações algais. A Figura 4.2 mostra uma sequência de picos de reflectância em 550nm, com valores de 0,020 a 0,005 $sr^{-1}$  e 650nm com valores de 0,015 a 0,005 $sr^{-1}$ . Outro pico bastante pronunciado está localizado em 700nm com valores de 0,003 a 0,03 $sr^{-1}$  e outro com curva bem delimitada com baixa amplitude em 780nm. Seus vales são em torno de 615nm e outro, mais pronunciado, em torno de 680nm, características estas de PC e Chl-a, respectivamente. É possível inferir que este reservatório é bastante eutrofizado, assim como o reservatório Billings. É possível observar uma forte absorção em torno de 480nm com valores quase nulos a 0,005 $sr^{-1}$  que indica, possivelmente, absorção de betacarotenos. Sua curva possui características de ambiente dominado por fitoplâncton.

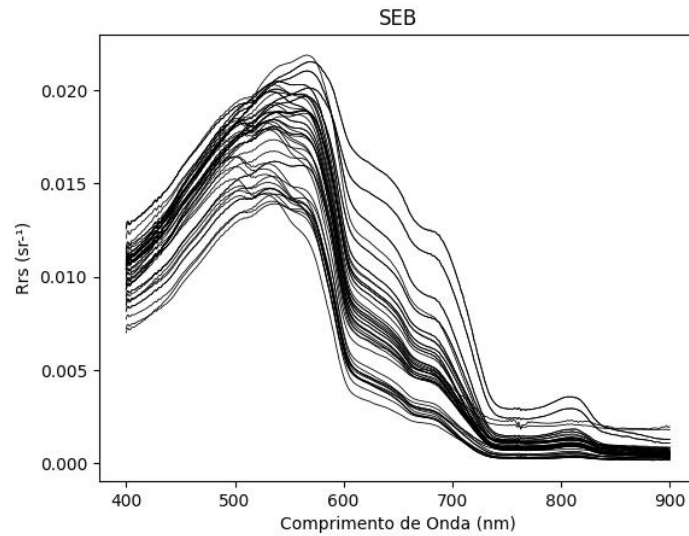
Figura 4.2 – Rrs Reservatório Promissão.



Fonte: Produção do autor.

Canal de São Sebastião (Figura 4.3), diferentemente de Billings e Promissão apresenta maior resposta de 400nm a 550nm indicando uma água mais clara e tendências na cor azul-esverdeada. No geral, seus valores não ultrapassam mais que  $0,02sr^{-1}$ . Seu pico em 550nm com valor de  $0,020sr^{-1}$  possui deslocamento para 500nm, na medida que o valor da resposta espectral diminui, indicando presença de chl-a. É possível notar um vale próximo a 675nm com deslocamento a 650nm na medida que o valor de Rrs diminui e pequeno pico em 800nm, demonstra que existe a presença de fitoplâncton. Diferentemente de Billings e Promissão, este é um ambiente costeiro e sua concentração de chl-a é consideravelmente menor.

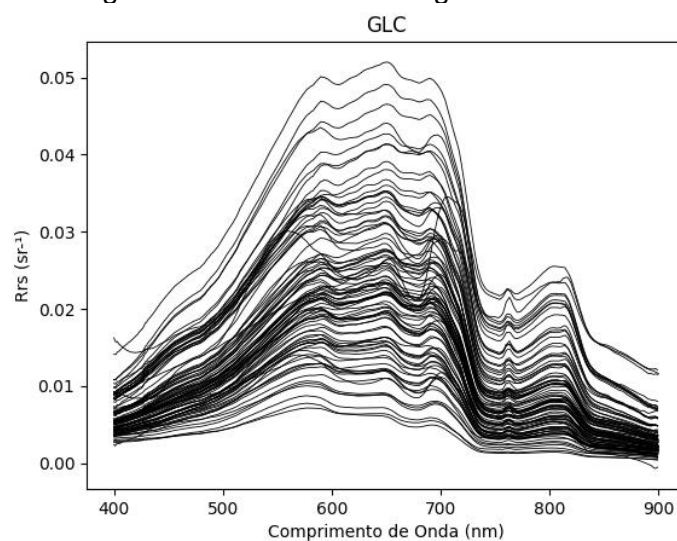
Figura 4.3 – Rrs São Sebastião.



Fonte: Produção do autor.

Os espectros de reflectância de Curuai (Figura 4.4) possuem alta reflectância de 550nm a 700nm, variando de  $0,005sr^{-1}$  a  $0,05$  com características de particulados em suspensão, fazendo com que a água com maior turbidez apresente coloração laranja-avermelhada. A alta absorção de clorofila-a pode ser identificada com o vale em 675nm que fica mais acentuada na medida que a resposta espectral diminui sua intensidade, seus valores variam de  $0,01$  a  $0,04sr^{-1}$ . Assim como Billings e Promissão, é possível observar pequeno pico de reflectância em 750nm seguido de outro pico mais espaçado em 800nm. Os sedimentos em suspensão total (TSS) derivados de algas e partículas não algais intensificam o retro espalhamento (SUN et al. 2010) e, conseqüentemente, a intensidade de Rrs em todo o espectro de 400 a 750nm. Esta forma espectral caracteriza águas com alta turbidez (WANG et al., 2019).

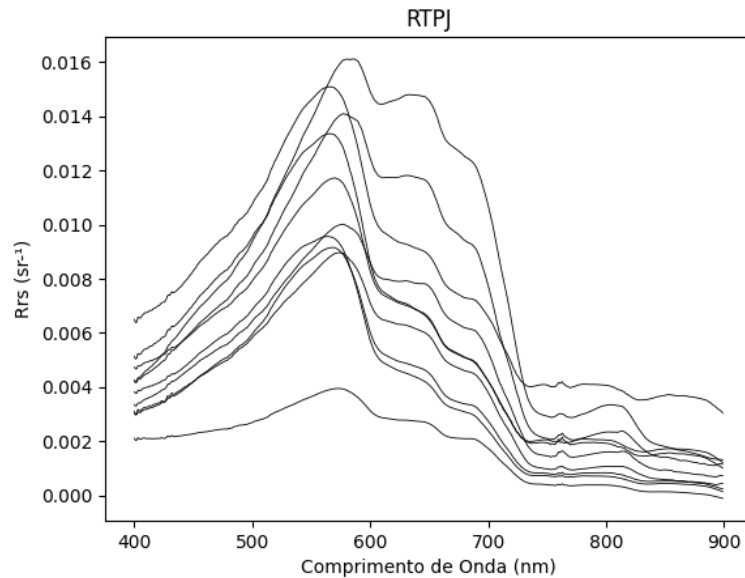
Figura 4.4 – Rrs Grades Lagos do Curuai.



Fonte: Produção do autor.

Os espectros de reflectância do Rio Tapajós (Figura 4.5) indicam águas mais claras com maior reflectância no azul e com valores máximos que não ultrapassam  $0,016sr^{-1}$ . Possui pico em 575nm, seguida de queda próxima a 600nm e grande absorção próximo a 700nm, indicando absorção da água pura. Assim como espectros anteriores é possível observar pequeno pico, com baixa amplitude em 770nm devido a presença de Chl-a. De todos os ambientes analisado, o Rio Tapajós, possivelmente, é o ambiente com menor concentração de COAs.

Figura 4.5 – Rrs Rio Tapajós.

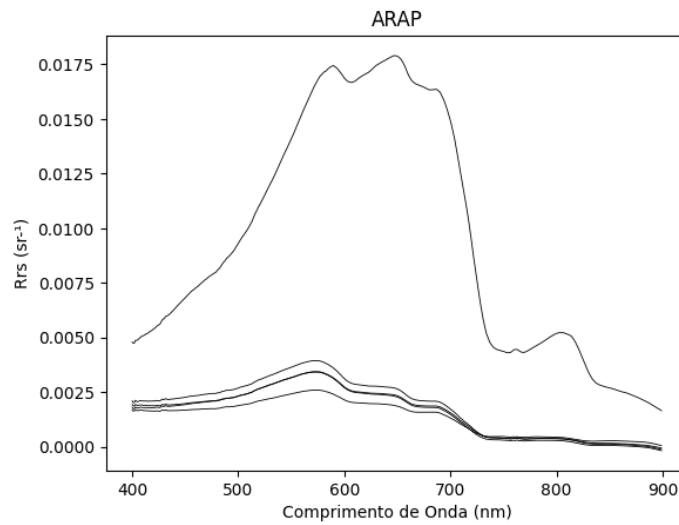


Fonte: Produção do autor.

Nas curvas espectrais do Rio Arapiuns (Figura 4.6) é possível agrupar em dois grupos de espectros de reflectância. O primeiro deles se assemelha ao Rio Tapajós com maior retroespalhamento de 500nm a 700nm, com valores que variam de 0,005 a 0,0175  $sr^{-1}$  e picos de menor espalhamento em 775nm e 800nm, característica de presença de fitoplâncton. O outro grupo possui grande absorção em todos os comprimentos de onda com valores que não ultrapassam 0,0025  $sr^{-1}$  e valores que se aproximam de zero a partir de 715 nm, característicos de águas claras (DA SILVA et al., 2021b).



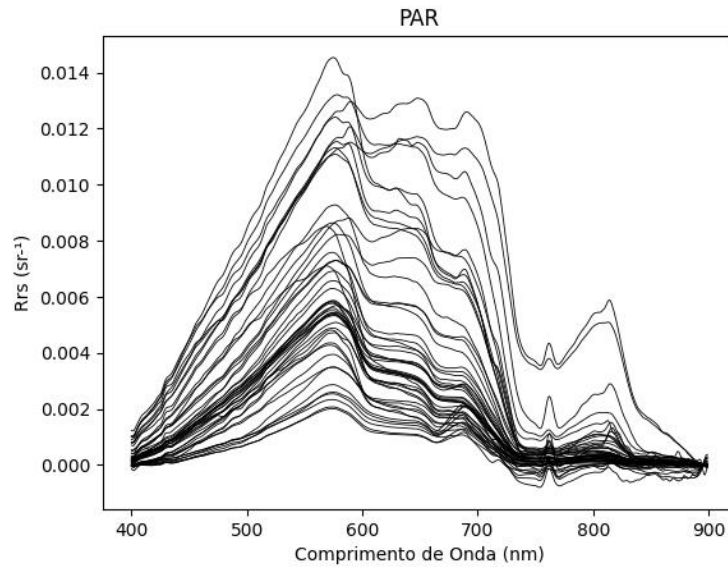
Figura 4.6 – Rrs Rio Arapiuns.



Fonte: Produção do autor.

Os espectros de reflectância da Baía de Paranaguá (Figura 4.7) se assemelham, em seu formato e intensidade, aos espectros de reflectância do Rio Tapajós. É possível observar alta reflectância em torno de 550nm com valores que variam de 0,002 a  $0,014sr^{-1}$ , indicando a presença de chl-a. Em 675nm também é possível observar vale com absorção característico de fitoplâncton. Assim como Billings, Baía de Paranaguá possui grande reflectância próximo a 760nm e 810nm, indicando a presença de fitoplâncton.

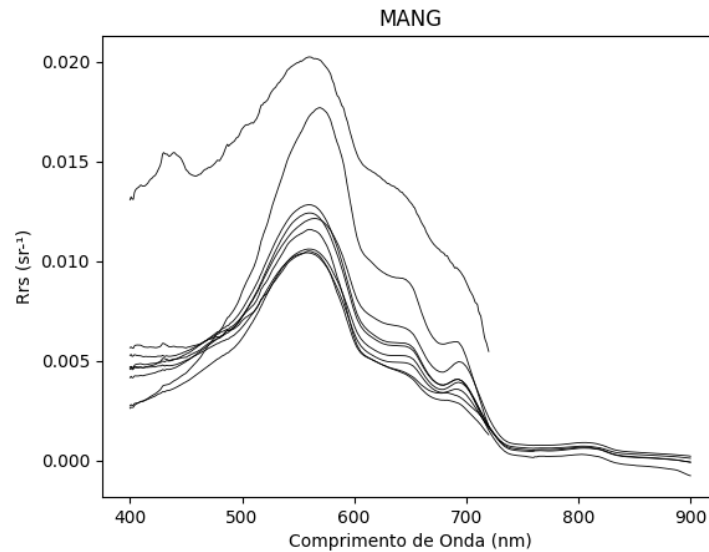
Figura 4.7 – Rrs Baía de Paranaguá.



Fonte: Produção do autor.

Lagoa de Mangueira (Figura 4.8) apresentou curvas espectrais com maior reflectância em próximo de 550nm, com valores que variam de 0,015 a  $0,01sr^{-1}$  com curva de absorção em próximo de 675nm com valores que variam de 0,005 a  $0,007sr^{-1}$ , característica de presença de pigmento fotossintético Chl-a.

Figura 4.8 – Rrs Lagoa de Mangueira.



Fonte: Produção do autor.

## 4.2 Avaliação da acurácia radiométrica absoluta

Nesta pesquisa foram obtidos, aproximadamente, 480 *matchups* de 96 imagens de 48 sensores diferentes. Todas as imagens de satélite obtidas são do mesmo dia de coleta *insitu* com diferença máxima de 3,5 horas.

Para a validação radiométrica por método de correção atmosférica foram avaliadas todas as oito bandas presentes no SuperDove. Como os métodos ACOLITE DSF e 6SV possuem abordagens diferentes, o número amostral varia por método e por banda. Valores negativos de  $\rho_s$  foram descartados.

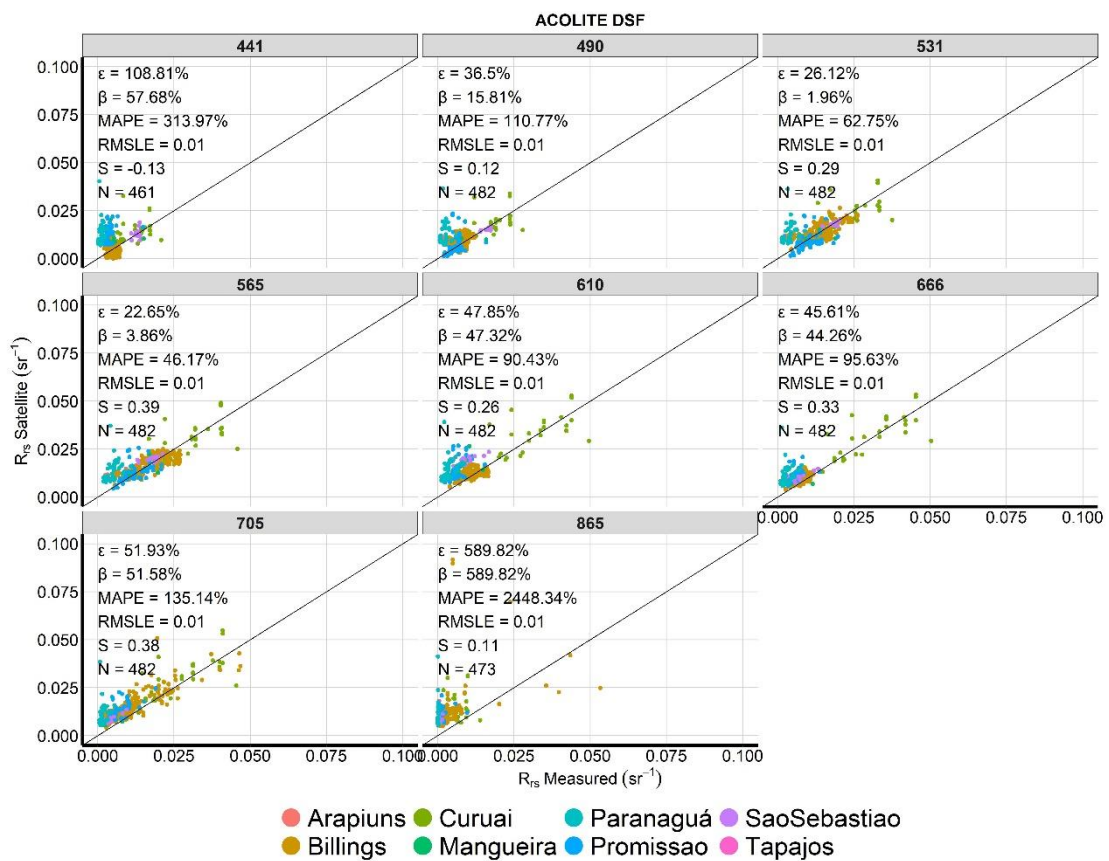
### 4.2.1 Avaliação do Método ACOLITE DSF (por banda e por campanha)

A acurácia de  $\rho_s$  nas bandas do sensor SuperDove estão ilustradas na Figura 4.9 e suas estatísticas estão sumarizadas na Tabela 4.1. O método de correção atmosférica DSF apresenta erros (ou seja, acurácia simétrica mediana) que variaram de 22,65% (Verde II) a 589,82% (banda NIR). As bandas 565nm (Verde II), 531nm (Verde I) e 490nm (Azul) apresentaram os menores erros, respectivamente, 22,65%, 26,12% e 36,5% com viés positivo de, respectivamente, 3,86%, 1,96% e 15,81%. As bandas 666nm (Vermelho), 610nm (Amarelo) e 705nm (Vermelho Limítrofe), apresentaram erros

intermediários, com valores que variaram de 45,61% a 51,93% e  $\beta$  que variam de 44,26 a 51,58%, demonstrando valores superestimados de  $\rho_s$  nos dados satelitais. As bandas com menor acurácia radiométrica foram as bandas 441nm (Azul Costeiro) e 865nm (Infravermelho próximo) com valores de  $\varepsilon$  igual a 108,81% e 589,82%, respectivamente. *Slopes* menores que 1 indicam que há uma subestimação da variável no eixo Y, principalmente com o aumento da variável no eixo X (MACIEL et al., 2019). Foram obtidos 482 matchups, por banda exceto para a banda 441nm (N=461) e NIR (N=473).

Abaixo os *scatter plots* (Figura 4.9) contendo os erros e viés desta análise.

Figura 4.9 *Scatter plots matchups* entre SuperDove ACOLITE e dados *insitu* por banda.



Fonte: Produção do autor.

A tabela abaixo (Tabela 4.1) sumariza as validações estatísticas da análise pelo método ACOLITE DSF, por banda.

Tabela 4.1 - Avaliação estatística da acurácia ACOLITE DSF por banda.

Comprimento de onda (nm)		$\varepsilon$ (%)	$\beta$ (%)	MAPE	RMSLE	S	N
<b>Azul Costeiro</b>	<b>441</b>	108.81	57.68	313.97	0.01	-0.13	461
<b>Azul</b>	<b>490</b>	36.5	15.81	110.77	0.01	0.12	482
<b>Verde I</b>	<b>531</b>	26.12	1.96	62.75	0.01	0.29	482
<b>Verde II</b>	<b>565</b>	22.65	3.86	46.17	0.01	0.39	482
<b>Amarelo</b>	<b>610</b>	47.85	47.32	90.43	0.01	0.26	482
<b>Vermelho</b>	<b>666</b>	45.61	44.26	95.63	0.01	0.33	482
<b>Vermelho Limítrofe</b>	<b>705</b>	51.93	51.58	135.14	0.01	0.38	482
<b>Infravermelho Próximo</b>	<b>865</b>	589.82	589.82	2448.34	0.01	0.11	473

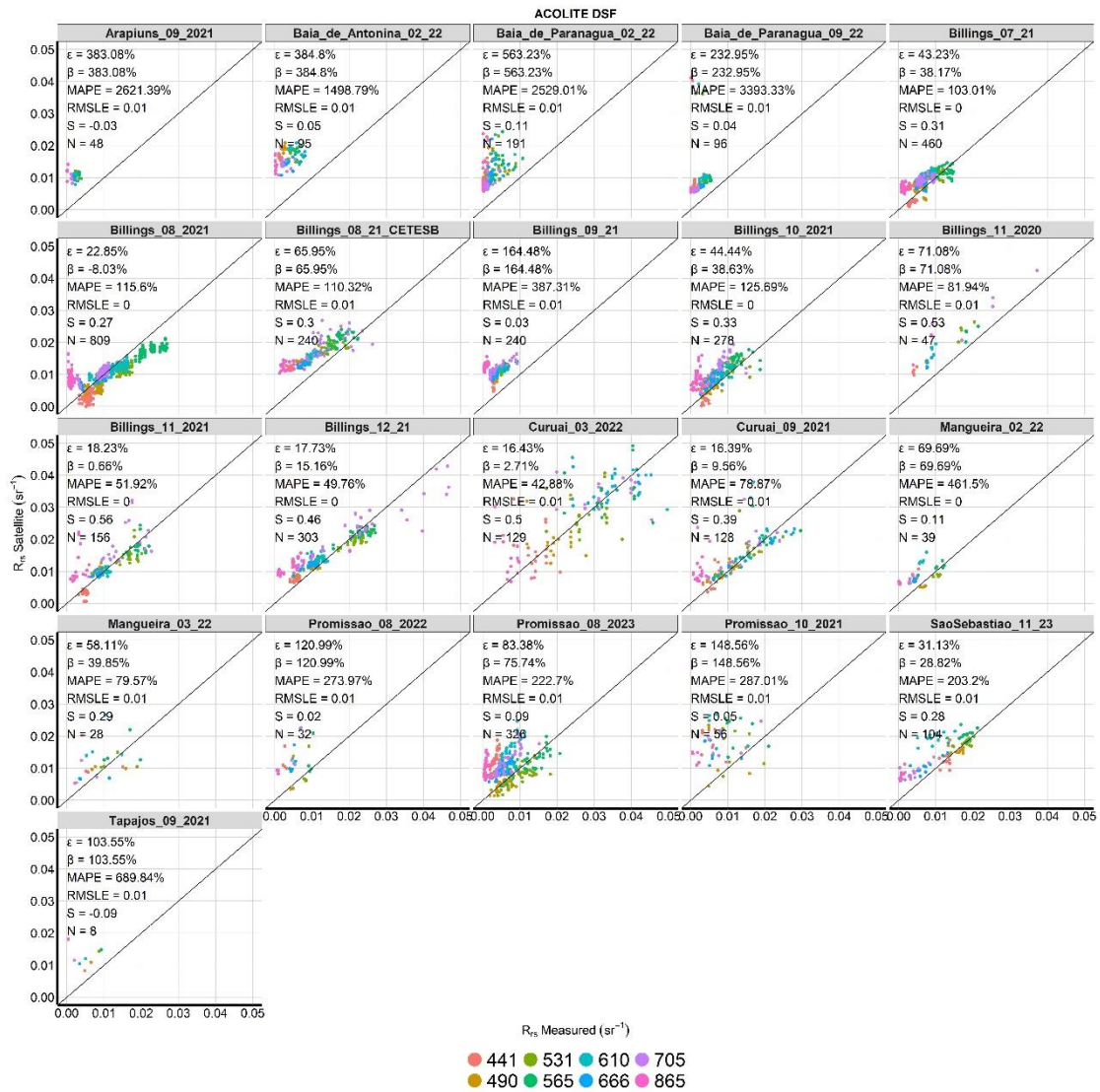
Fonte: Produção do autor.

Realizando uma análise por campanha, a partir do método de correção atmosférica ACOLITE DSF (Figura 4.12), permite observar o bom desempenho de  $\rho_s$ , mesmo quando analisadas todas as bandas (441nm e 885nm que obtiveram menor desempenho, descrito acima).

As campanhas com melhores desempenhos foram as campanhas de setembro de 2021 e março de 2020 de GLC, com  $\varepsilon$  em torno de 16% com viés de 9,56 e 2,71% (MAPE de ~79 e 43%, com S de 0,39 e 0,5). As campanhas de agosto, novembro e dezembro de 2021 de BILL, com  $\varepsilon$  abaixo de 23% e com  $\beta$  abaixo de no máximo 15%. (BILL em novembro de 2021 tem  $\beta$  com valor de 0,66%). O ambiente costeiro SEB apresentou erro na casa de 31%, com viés positivo de 28,82% (MAPE = 203% e S = 0,28). Os resultados com erro abaixo de 44% foram as campanhas de julho e outubro de 2021 de BILL (com viés positivo em torno

de 38%). Para as demais campanhas os erros foram mais elevados e em alguns casos (ex.: Arapiuns, Antonina, Paranaguá, BILL\_09\_21, BILL\_08\_21\_CETESB) observam-se *offsets* positivos causados pelo efeito de *glint* contidas nas imagens.

Figura 4.10 - Scatter plots para os matchups entre SuperDove ACOLITE DSF e dados *in situ* por campanha.

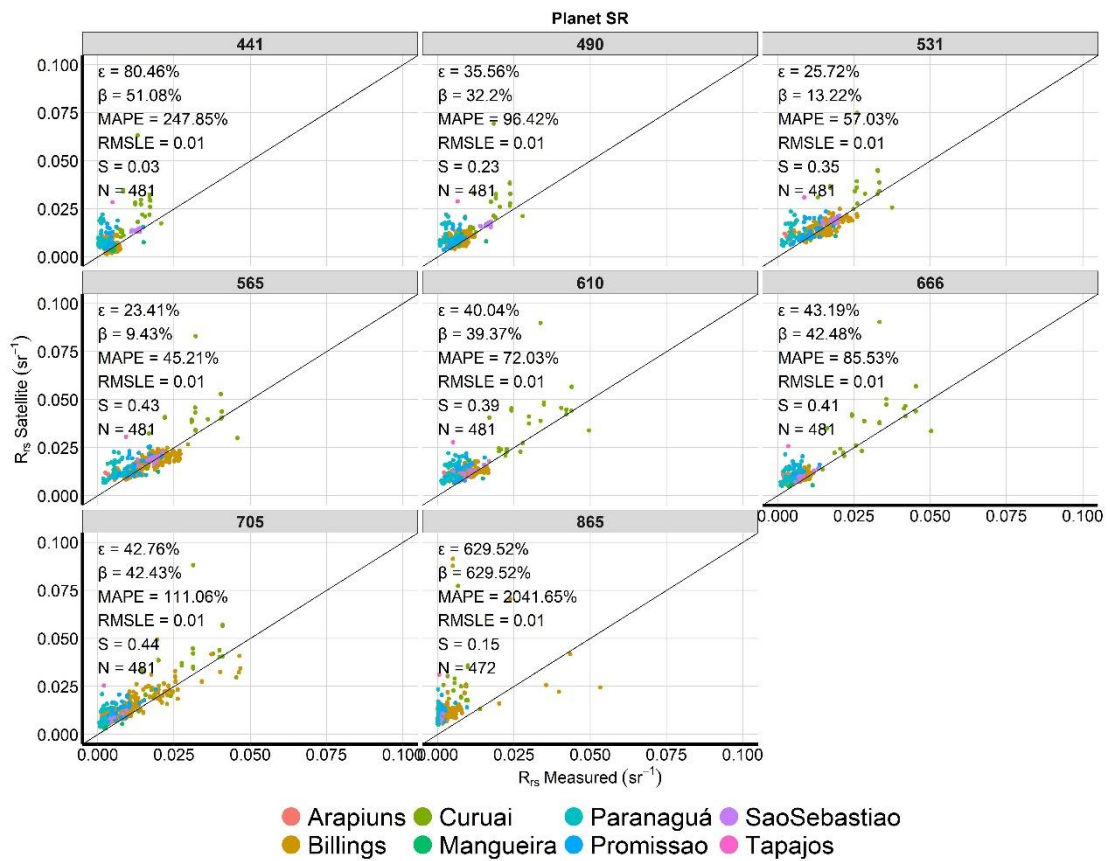


Fonte: Produção do autor.

#### 4.2.2 Avaliação do Método PSR 6SV (por banda e por campanha)

Os resultados do método de correção atmosférica 6SV (Figura 4.10 e sumarizados na Tabela 4.2), presente no produto *Surface Reflectance* do SuperDove, possuem  $\varepsilon$  similares ao método ACOLITE DSF. Os menores erros estão presentes nas bandas 565nm, 531nm e 490nm com valores que variam, respectivamente, de 23,41%, 25,72% e 35,56% (diferença de ~1%, em relação ao método DSF). Estas bandas possuem  $\beta$  de 9,43, 13,22 e 32,2% com valores superestimados de  $\rho_s$  dos dados satelitais e superiores ao método ACOLITE DSF. Assim como o método ACOLITE DSF, as bandas com acurácia intermediária forma respectivamente 610nm, 705nm e 666nm com  $\varepsilon$  iguais a 40,4, 42,76 e 43,19%, com viés em torno de 40% de superestimação. Como esperado, as bandas 441nm e 865nm possuem erros superiores a 80%, chegando a 629% na banda do NIR. O  $N$  para esta análise foi igual a 481, exceto para a banda NIR com  $N$  igual a 472 *matchups*.

Figura 4.11 - Scatter plots para os matchups entre SuperDove PSR e dados *insitu*.



Fonte: Produção do autor.



Tabela 4.2 - Avaliação estatística da acurácia PSR por banda.

Comprimento de onda (nm)	$\varepsilon$ (%)	$\beta$ (%)	MAPE	RMSLE	S	N
<b>Azul Costeiro 441</b>	80.46	51.08	274.85	0.01	0.03	481
<b>Azul 490</b>	35.56	32.2	96.42	0.01	0.23	481
<b>Verde I 531</b>	25.72	13.22	57.03	0.01	0.35	481
<b>Verde II 565</b>	23.41	9.43	45.21	0.01	0.43	481
<b>Amarelo 610</b>	40.04	36.37	72.03	0.01	0.39	481
<b>Vermelho 666</b>	43.19	42.48	85.53	0.01	0.41	481
<b>Vermelho Limítrofe 705</b>	42.76	42.43	111.06	0.01	0.44	481
<b>Infravermelho Próximo 865</b>	629.52	625.52	2041.65	0.01	0.15	472

Fonte: Produção do autor.

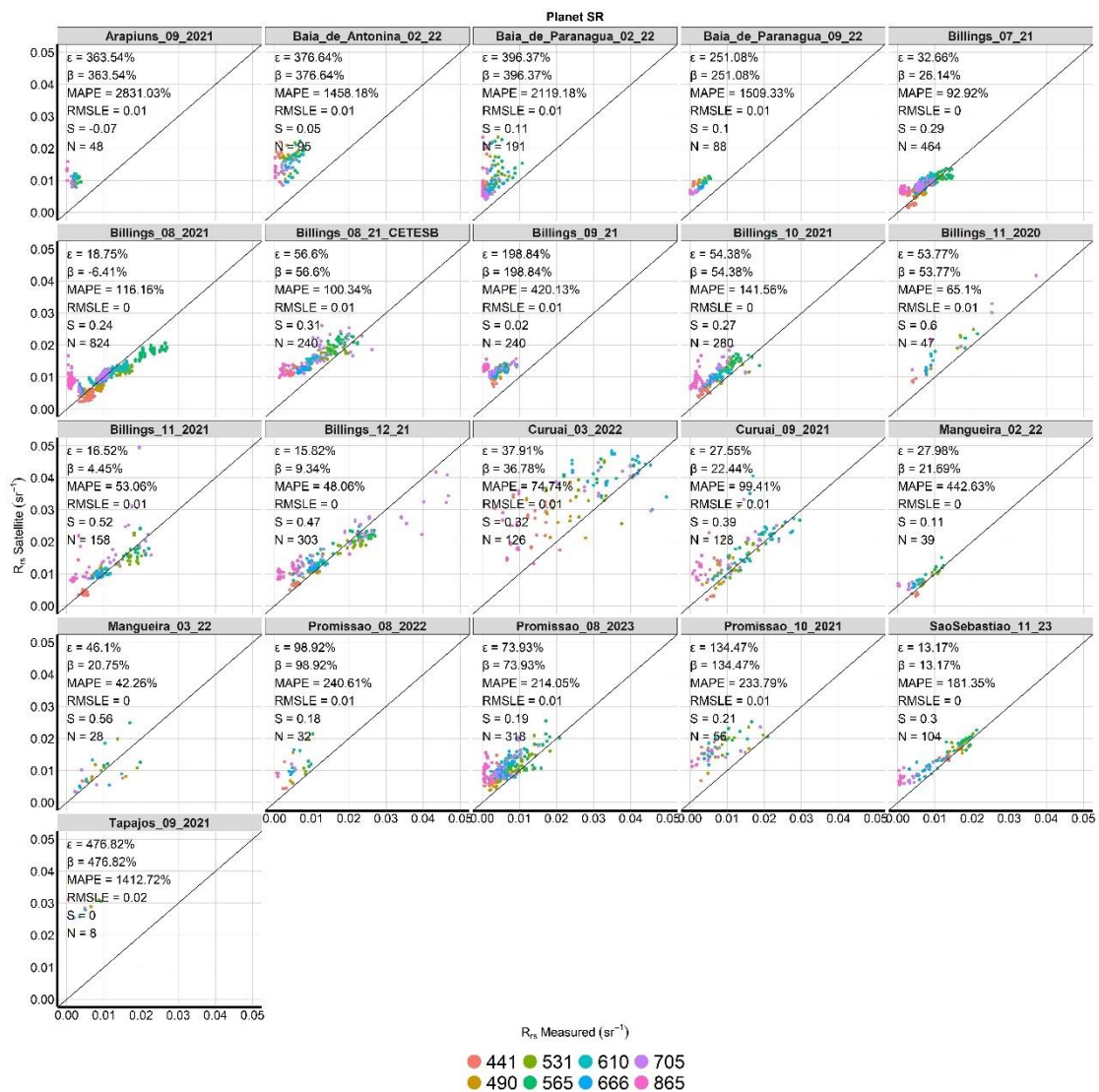
A análise realizada por campanha, a partir do método de correção atmosférica PSR 6SV (Figura 4.13), indicou a campanha do Canal de São Sebastião com a de menor erro e viés registrados entre as todas as campanhas realizadas. Possui  $\varepsilon$  de 13,17% e bias de mesmo valor, mesmo quando incluídas as bandas do Azul Costeiro e NIR. As campanhas com desempenho similar ao método ACOLITE DSF, com resultados de erros abaixo de 20%, foram encontrados na Represa Billings de dezembro de 2021 ( $\varepsilon = 15,82\%$  e  $\beta = 9,34$ ), seguido da campanha BILL de novembro de 2021 ( $\varepsilon = 16,52\%$  e  $\beta = 4,45$ ) e BILL de agosto de 2021 ( $\varepsilon = 18,75\%$  e  $\beta = -6,41$ ).

As campanhas com desempenho de acurácia radiométrica marginalmente aceitas foram encontradas na Represa Billings em julho de 2021 (BILL\_07\_21), Lago Grande do Curuai em setembro de 2021 (GLC\_09\_21) e em Mangueira em fevereiro de 2022 (MANG\_02\_22) com  $\varepsilon$  menores que 32% e  $\beta$  menores que 26,14%. Para o restante das campanhas o desempenho ficou degradado com

erros superiores a 50%. As análises foram coincidentes com os diferentes métodos de correção atmosférica.

A Figura 4.2 mostra os diagramas de dispersão com todas as validações estatísticas desta análise.

Figura 4.12 - Scatter plots para os matchups entre SuperDove Planet SR e dados *insitu* por campanha.



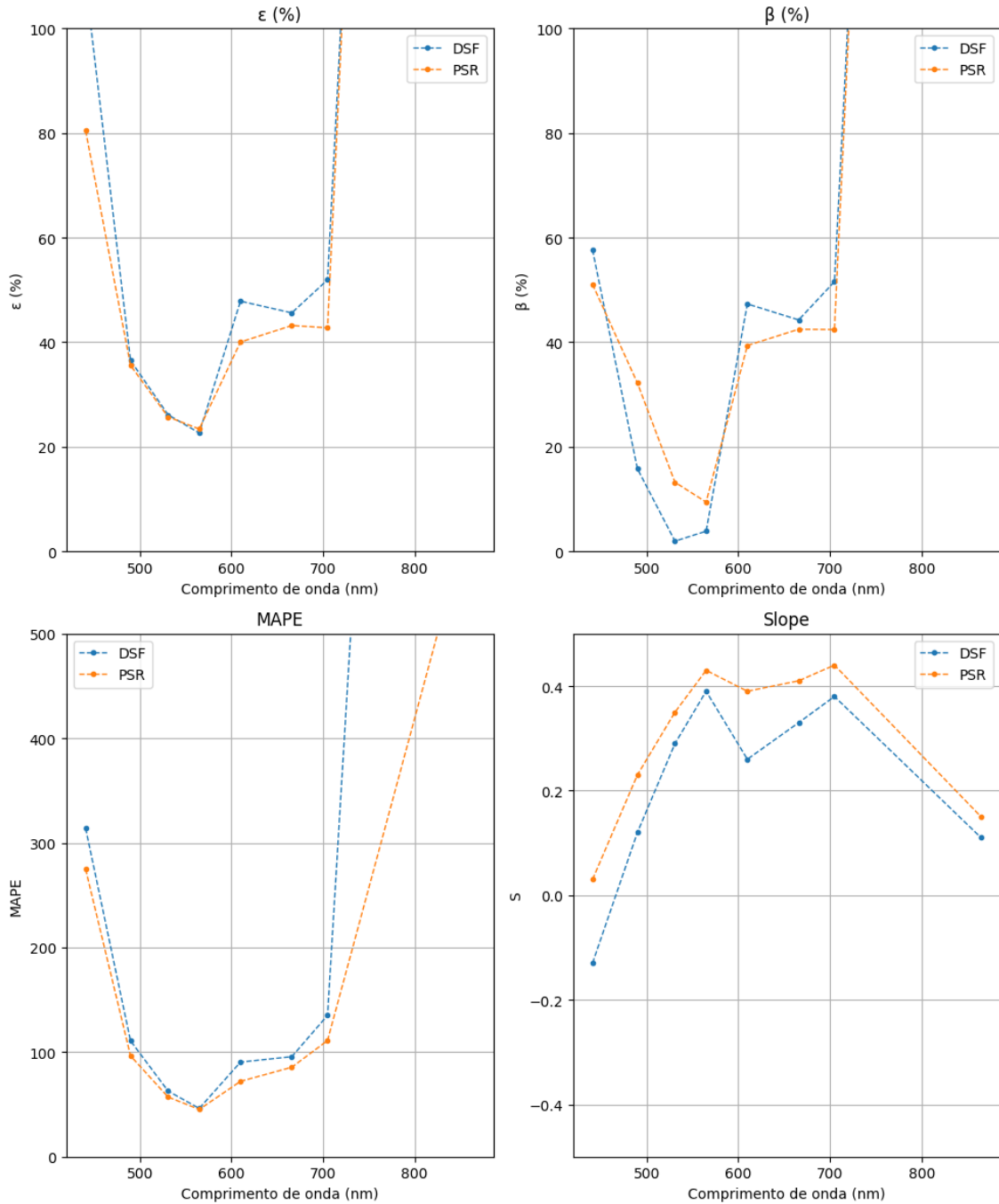
Fonte: Produção do autor.

### **4.2.3 Comparação entre os métodos ACOLITE DSF e PSR 6SV**

As estatísticas dos *matchups* estão sintetizados na Figura 4.11 onde é possível observar grande consistência entre os satélites pelos métodos analisados com baixos erros relativos nas bandas com maior sinal da água. As maiores diferenças são encontradas nas bandas Azul costeiro (441nm) e NIR (865nm) caracterizados respectivamente pelo maior sinal atmosférico e menor sinal de saída da água. Resultados semelhantes foram encontrados em Vanhellemont (2023).

O desempenho encontrado em DSF e PSR 6SV é similar, embora PSR obtenha vieses absolutos maiores nas bandas azul (490nm), Verde I (531) e Verde II (565nm). Houve uma diferença no erro entre os dois métodos de no máximo 6% (para banda amarela, excluindo azul costeiro e infravermelho próximo) e em relação ao viés uma diferença máxima de 18% com as mesmas condições. Para ambos os processamentos o viés segue em grande parte a forma invertida de um espectro de água (Figura 4.13) (VANHELLEMONT, 2023).

Figura 4.13 - Erros espectrais para DSF (azul) e PSR (laranja).



Fonte: Produção do autor.

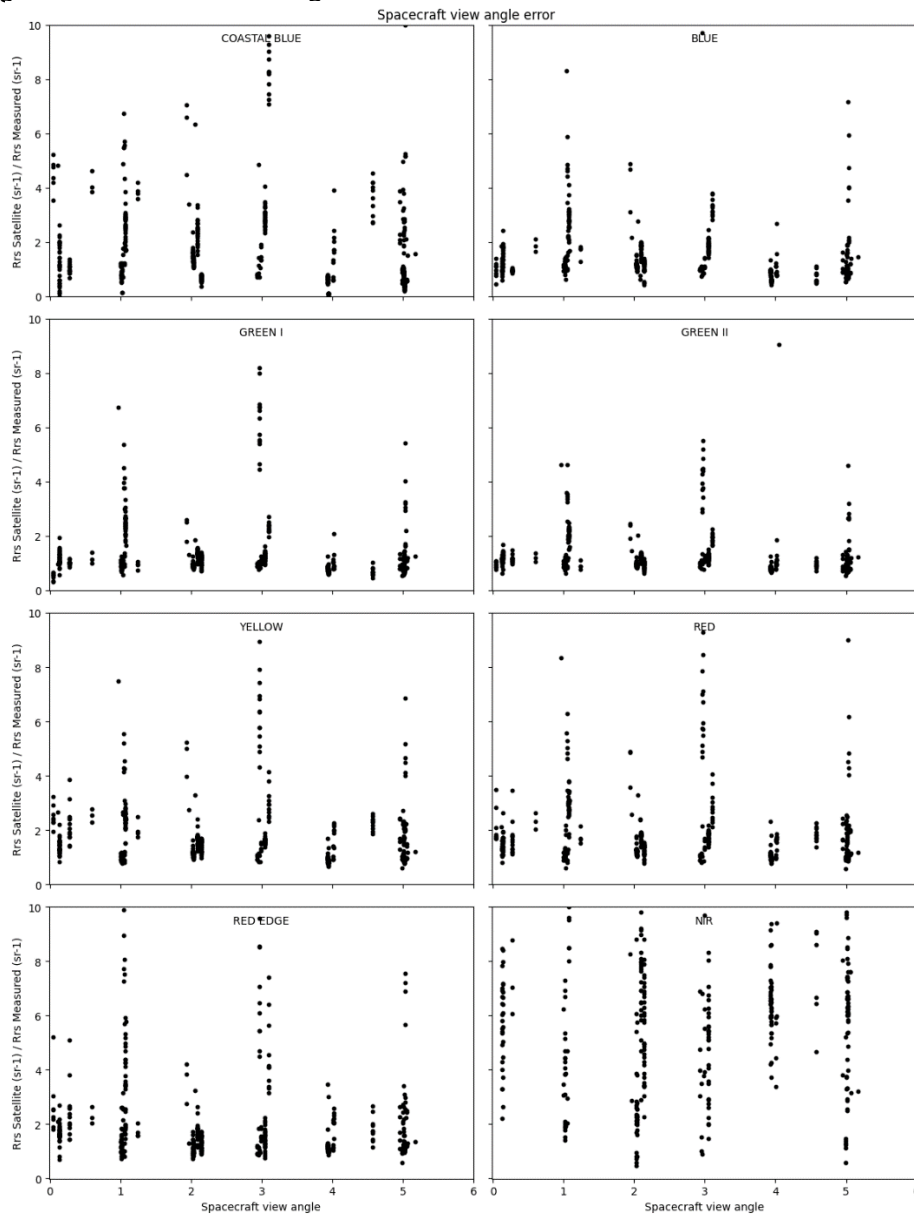
#### 4.2.4 Avaliação da geometria de iluminação na acurácia radiométrica

Para o entendimento da variabilidade do  $R_{rs}$  foi realizada uma análise do ângulo de visada do sensor (nadir e off-nadir), ângulo azimutal de iluminação e ângulo

de elevação da iluminação através uma razão entre  $R_{rs}$  obtido do satélite e do levantamento em campo medido ( $\frac{R_{rs,est}}{R_{rs,med}}$ ). Valores próximos a 1 significam menor erro encontrado com as diferentes variáveis (MACIEL et al., 2020). Foram gerados gráficos por banda para o entendimento dessa variabilidade.

Como observado na Figura 4.14 as bandas Verde I e Verde II foram as menos afetadas pelos diferentes ângulos de visada do sensor. Os ângulos que obtiveram menores erros foram à zênite, 2° e de 4 a 4,5° (esta última com melhores resultados para todas as bandas). É possível observar que a 3° a variabilidade foi maior. Para as bandas Azul costeiro e NIR o ângulo de visada não influencia nesta razão, entretanto os resultados desta razão apresentam grande variabilidade. Para todas as bandas o registro a zênite performa bom resultado, como esperado, entretanto o registro em torno de 4° também retorna resultados satisfatórios, demonstrando que a diferença zenital não possui padrão que influencia sua qualidade.

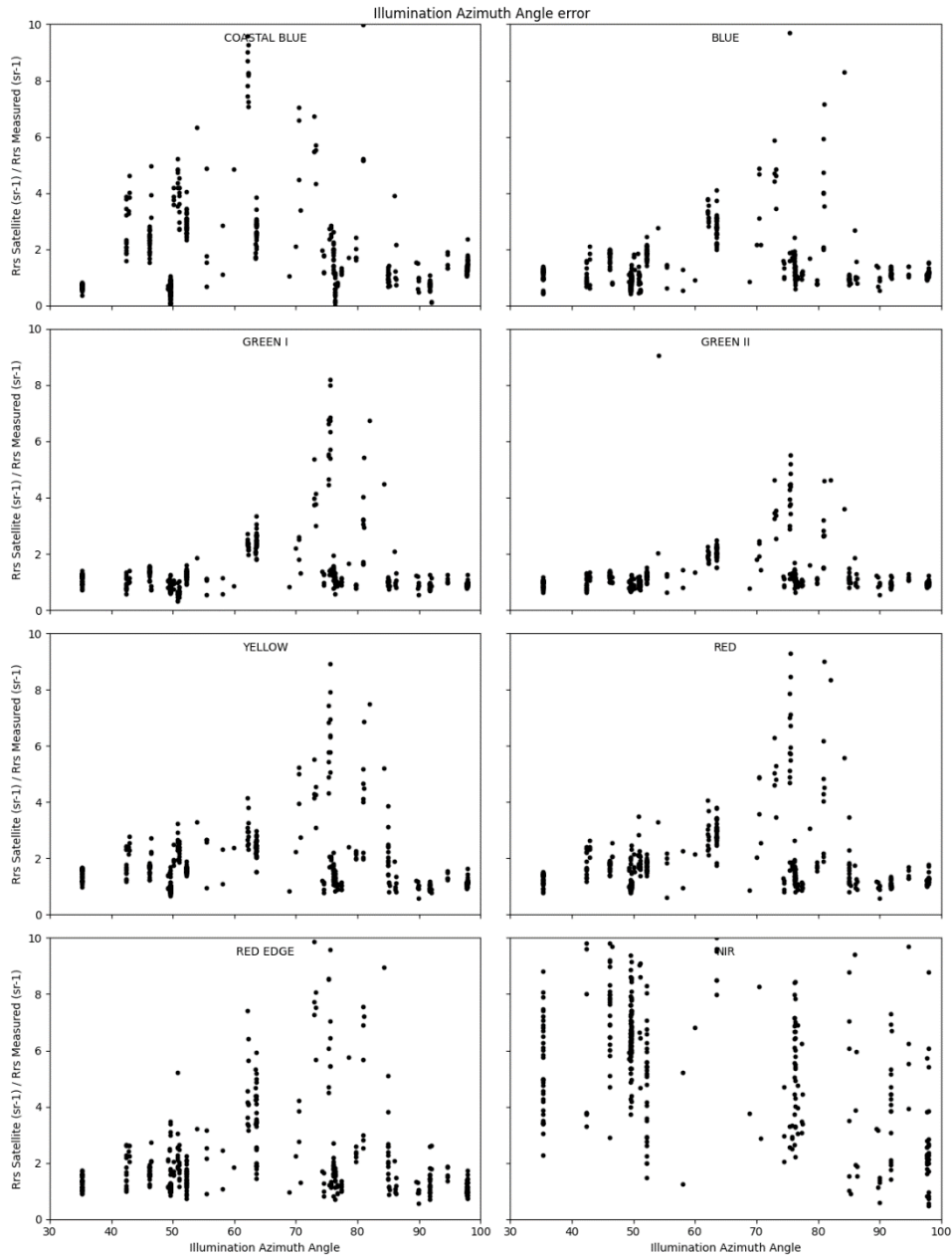
Figura 4.14 – Erros de ângulo de visada da razão entre estimado e medido.



Fonte: Produção do autor.

Em relação ao ângulo azimutal de iluminação (Figura 4.15) é possível perceber um padrão de resultados mais satisfatórios para todas as bandas (exceto Azul costeiro e NIR) até 45° e, de 90 a 100°. Entre 45 e 90° os resultados apresentam piora na razão entre  $\frac{R_{rs,est}}{R_{rs,med}}$ . As bandas com menores erros foram a banda Verde II, seguida de Verde I, Azul e Vermelho.

Figura 4.15 – Erros de ângulo azimutal da razão entre estimado e medido.



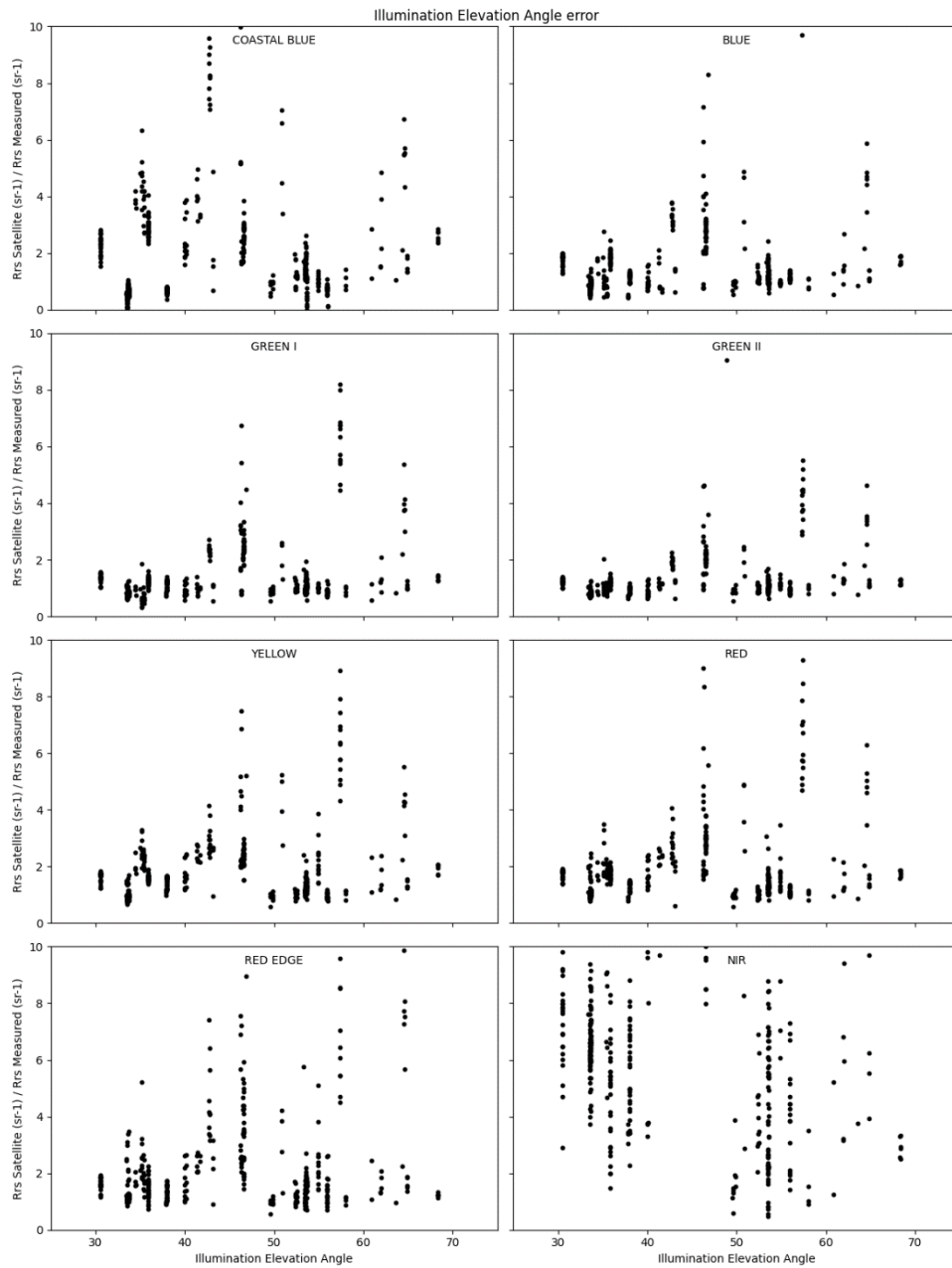
Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.16 representa a razão de  $R_{rs}$  adquirido pelo satélite e insitu ( $\frac{R_{rs,est}}{R_{rs,med}}$ ) sobre a variável do ângulo de elevação de iluminação do Sol. É possível observar que os melhores resultados foram aqueles entre 30 e 45° para todas as bandas (exceto Azul costeiro e NIR). As bandas com menores erros foram, respectivamente, Verde II, Verde I, Azul e Vermelho. Quando ângulos de

elevação foram registrados acima de 45° é possível observar maiores valores na

$$\frac{R_{rs,est}}{R_{rs,med}}$$

Figura 4.16 – Erros de ângulo de elevação da iluminação da razão entre estimado e medido.



Fonte: Produção do autor.



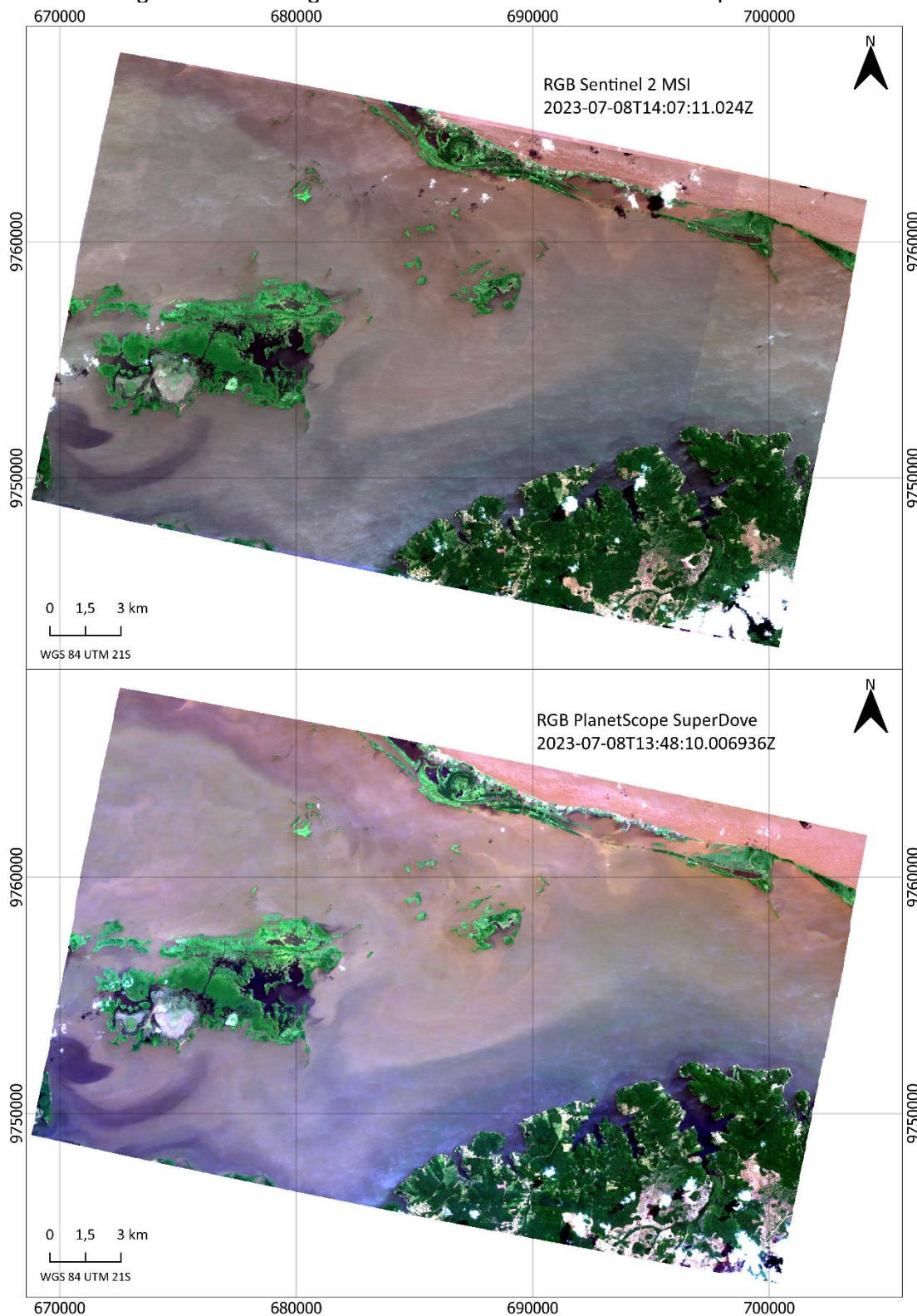
### 4.3 Avaliação da acurácia radiométrica relativa

Para Maciel *et al.* (2019) exercícios de inter-comparação usando sensores radiométricos de alta qualidade, como Landsat-8 e Sentinel-2, como referência, devem ser realizados para garantir a aplicabilidade dos *CubeSats* em estudos de águas interiores, uma vez que eles têm um potencial sem precedentes para fornecer informações espaço temporais detalhadas ao redor do globo.

A avaliação de acurácia relativa foi realizada no Lago Grande do Curuai (Figura 4.17) para a data de 08 de julho de 2023. A diferença temporal é de 19 minutos entre as aquisições das imagens (MSI - 2023-07-08T14:07:11.024Z; PSD- 2023-07-08T13:48:10.006936Z).

É possível observar na Figura 4.17 a presença de *glint* em ambas imagens e nuvens e sombras de nuvens em pequena quantidade na imagem do sensor MSI.

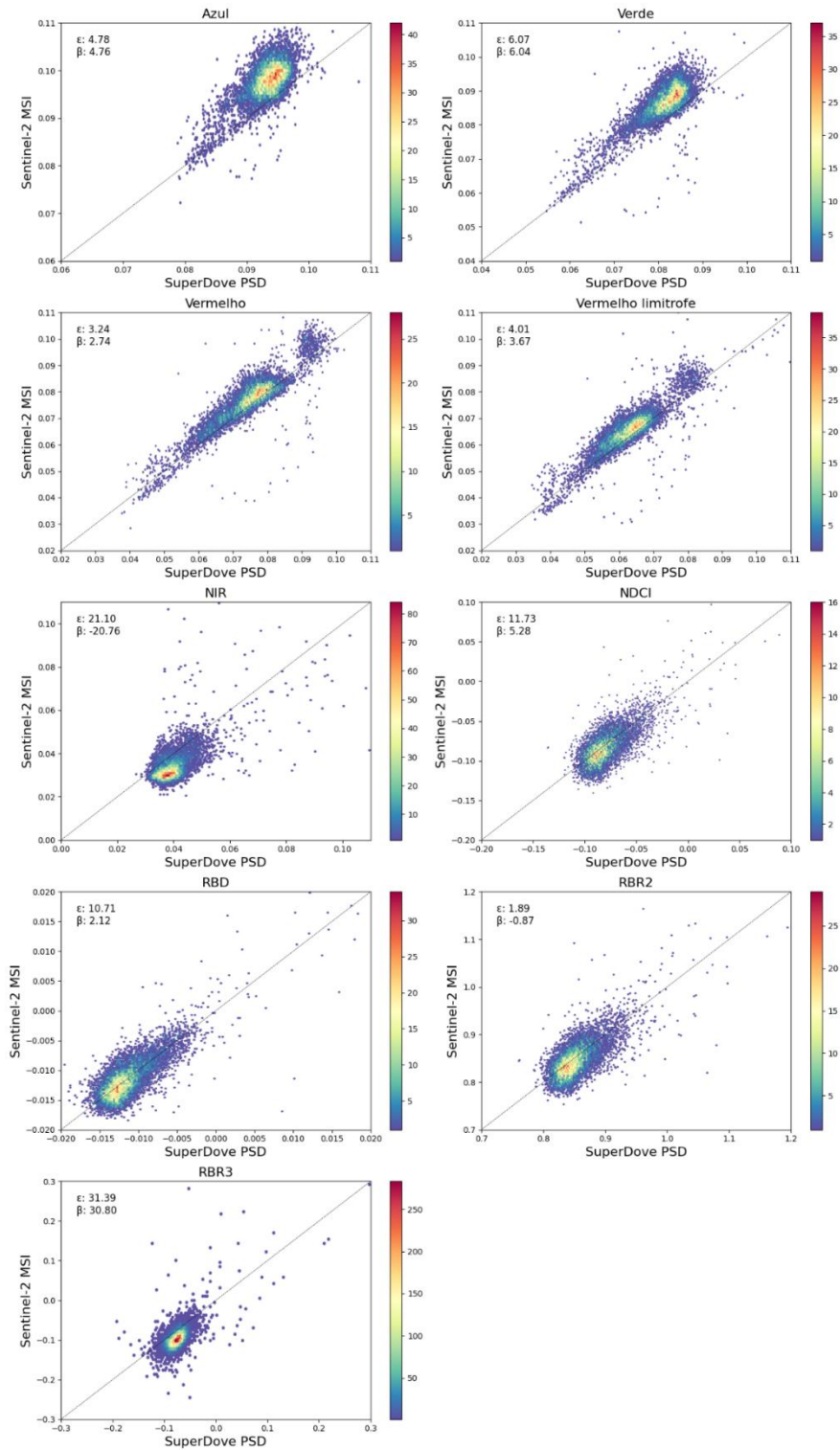
Figura 4.17 – Imagens RGB Sentinel 2 MSI e Planet Superdove.



Fonte: Produção do autor.

Os resultados apresentados na Figura 4.18 e 4.19 apontam  $\varepsilon$  que variam de 3,24% a 4,07% e  $\beta$  2,74% a 6,04% para as bandas do visível. A banda com melhor performance foi a banda do Vermelho com erro de 3,24% e viés de 2,74%. A banda do Vermelho limítrofe também obteve ótimo desempenho com  $\varepsilon$  de 4,01% e  $\beta$  de 3,67%. A banda NIR foi a que apresentou pior desempenho na comparação da acurácia radiométrica relativa com erro de 21,10% e viés negativo de -20,76%. As razões de banda obtiveram resultados com erros de até 11,73% e viés de 5,28% para NDCI. Dentre os RBI o RBR2 foi a razão com melhor desempenho ( $\varepsilon$  de 1,89 e  $\beta$  de -0,87%). RBD resultou em erro similar ao NDCI (10,31%) e viés de apenas 2,12%. RBR3, dentre as razões, foi o pior resultado com erro de 31,39% e viés de 30,80%.

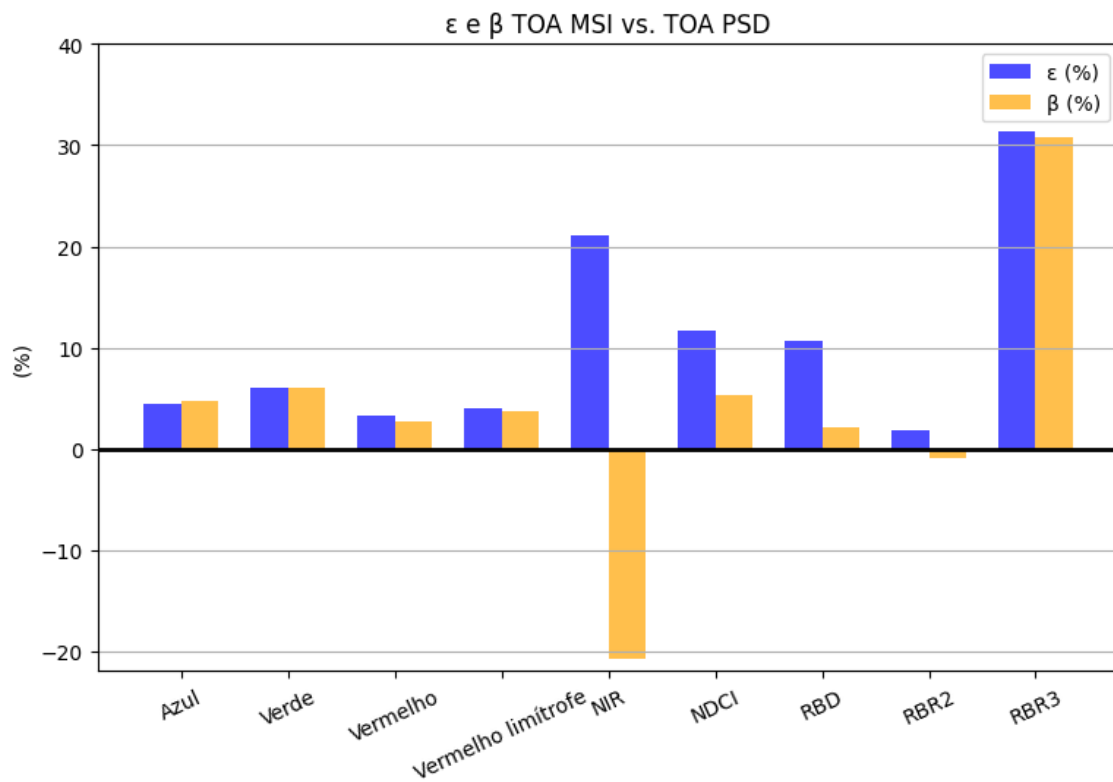
Figura 4.18 – Scatter Plots entre SuperDove e MSI para TOA.



Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.19 resume em gráfico de barra os erros e vieses da avaliação da acurácia radiométrica relativa entre SuperDove e MSI.

Figura 4.19 – Gráfico das estatísticas de erro e viés sensores MSI vs. SuperDove em TOA.



Fonte: Produção do autor.

## 5 DISCUSÃO

A princípio disponibilizadas imagens com três bandas (RGB), depois com quatro bandas (VNIR), e nesta última geração com oito bandas espectrais, os avanços dos sensores PlanetScope são perceptíveis ao longo do tempo. Para além do aumento da quantidade de bandas, ou seja, melhor resolução espectral, a melhora na resolução e qualidade radiométrica foram significativas, conforme apresentadas nesta pesquisa.

Este estudo fornece informações sobre a acurácia relativa (entre medidas *insitu* e SuperDove) e absolutas (entre MSI e SuperDove). Em relação a acurácia absoluta foi possível observar melhor desempenho para as bandas Verde I, Verde II, Amarela, Vermelho e Vermelho Limítrofe em relação as bandas Azul Costeiro e NIR e para ambos os métodos de correção atmosférica. Estas bandas podem ser explicadas por conta da alta absorção da atmosfera e vapor de água e baixo sinal refletido da água. As bandas Azul, Verde I e Verde II obtiveram erros muito similares para os métodos ACOLITE DSF e 6SV, porém o viés foi mais alto para o método 6SV, nestes comprimentos de onda. Foram encontrados menores erros e vieses nas bandas Amarela, Vermelha e Vermelha limítrofe quando aplicado o método 6SV em relação ao ACOLITE DSF. O erro encontrado na banda Azul costeiro foi significativamente menor quando utilizado o método 6SV nos produtos *Surface Reflectance* da Planet. Resultados similares foram encontrados em Vanhellemonnt (2023) em sua pesquisa sobre a avaliação das oito bandas do SuperDove para aplicações aquáticas.

Os resultados encontrados por Maciel et al. (2019), na avaliação do potencial dos *CubeSats* para aplicações em águas interiores brasileiras, quando avaliadas quatro bandas da geração Doves, aponta que as principais limitações são relacionadas a baixa qualidade radiométrica inter sensores para estudos bio-óticos (DASH et. al., 2016), o que parece superado nesta nova geração SuperDove, conforme apresentado nesta pesquisa. Maciel et al. (2019) avaliaram a resposta da acurácia radiométrica do Lago Grande do Curuai, Lago Grande de Monte Alegre e Rio Tapajós, e observaram melhor desempenho em Lago Grande do Curuai e Lago Grande de Monte Alegre na banda do azul com

erro (MAPE) de 12,76%, 32,12% de erro no verde, 38,88% no vermelho e 100,19% no NIR. Para o Rio Tapajós os resultados foram piores com erros de 194,53% no azul, 200,2% no verde, 229,87% no vermelho e mais de 713% no NIR. Pode-se observar erros muito maiores nas gerações passadas comparadas ao sensor em questão. Os autores observaram que apesar dos erros apresentados no Rio Tapajós serem derivados da correção atmosférica, baixo Sinal-Ruido e efeitos de glint, a baixa concentração de TSS influencia no sinal, uma vez que seu retroespalhamento é menor (MACIEL et al., 2019). Sendo assim, os resultados de Maciel et al., (2019) sugerem que existe uma aplicabilidade destes CubeSats para monitoramento de águas interiores em águas com maior turbidez, mesmo na geração com quatro bandas.

Resultados melhores para as bandas verde e vermelha em comparação com outros comprimentos de onda também foram demonstrados por outros estudos: Wang et al. (2019) observaram os melhores resultados para a banda verde (MAPE = 16,44%) e a banda vermelha (MAPE = 22,74%) ao avaliar o desempenho da correção atmosférica 6SV para imagens Landsat-8/OLI em três lagos turvos na China. Os autores também mostraram que o 6SV teve um desempenho melhor do que outros métodos de correção atmosférica baseados em modelos físicos e em imagens (MACIEL et al., 2019).

Esta pesquisa encontrou resultados semelhantes com o estudo de Collison et al. (2022) em que a precisão absoluta da banda espectral NIR foi a pior tanto para o produto TOA Planet quanto para o produto de reflectância de superfície.

O estudo de Tu et al. (2022) sobre a acurácia radiométrica do SuperDove, encontrou uma forte correlação linear entre os dados de reflectância do SuperDove e do Sentinel-2 para todas as bandas com sobreposição espectral, com uma precisão relativa (ou seja, erro médio relativo) próxima de zero em média ao considerar todas as unidades de superfície. Neste estudo foram avaliados principalmente alvos pseudoinvariantes terrestres. A reflectância relativamente menos precisa foi observada para águas profundas, onde os dados do SuperDove superestimaram a reflectância em 4% com uma incerteza média de 7% de reflectância, concordando com este estudo.

Vanhellemont (2023) observou que os produtos ACOLITE DSF e PSR forneceram resultados similares, assim como esta pesquisa, com erros relativos baixos, ou seja,  $MARD < 20\%$  no VIS, alcançando  $< 10\%$  nas bandas com o sinal mais alto, e vieses bastante baixos (MAD entre -0,01 e 0,01). Na média 6SV da Planet obtiveram melhores performances (24% vs. 33% em ACOLITE DSF).

Imagens de satélite de alvos aquáticos são contaminadas por níveis variáveis de efeitos de adjacência e *sun-glint* na interface ar-água. Segundo Harmel et al. (2018) o *sun-glint* provoca uma máscara de altos sinais radiantes, sendo muito superior ao sinal ascendente da coluna da água superestimando e distorcendo as feições espectrais, este fenômeno também é conhecido como efeito especular. Sua intensidade e ocorrência é dependente das condições ambientais, geometria de iluminação e geometria de aquisição do sinal radiante (COX; MUNK, 1956). Além da intensidade, sua frequência e extensão são empecilhos ao monitoramento dos constituintes e das variações na cor da água (CHEN et al., 2021).

Efeitos de adjacência de áreas próximas com alto contraste espectral com a água pode causar problemas significativos para aplicações aquáticas, e a adjacência de vegetação terrestre pode introduzir características espúrias no NIR e na banda Vermelho limítrofe nos espectros de água. Para o SuperDove, a banda NIR será mais impactada pelo brilho e adjacência não corrigidos, o que pode representar um grande fator de incerteza na avaliação dessa banda. Esses erros são agravados pelo alto nível de ruído no NIR, dificuldades de calibração sobre alvos de baixo sinal, bem como, pela presença potencial de materiais flutuantes e espumas. Os efeitos de brilho atualmente não são corrigidos no PSR nem em DSF, e o desenvolvimento de métodos de correção para imagens de satélite em escala métrica são áreas ativas para pesquisas futuras, especialmente para águas com alta turbidez e alta produtividade fitoplanctônica (VANHELLEMONT, 2023). Os métodos de correção de glint baseados no NIR (HOCHBERG et. al, 2003; HEDLEY et al., 2005) podem fornecer resultados bastante robustos para o SuperDove sobre águas claras (assumindo total absorção neste comprimento de onda), mas esses métodos utilizam suposições inválidas sobre águas com alta turbidez e grande presença de fitoplâncton e Chl-



a. A utilização do comprimento de onda no NIR pode ser uma alternativa para a correção do efeito de *glint* para águas claras, porém para águas com alta produtividade e presença de florações, esta correção não é possível. Foram realizados testes para correção de *glint* com o método ACOLITE DSF com a banda NIR, porém os resultados foram insatisfatórios e, portanto, não apresentados nesta pesquisa, resultando em muitas bandas com resultados negativos. São necessários desenvolvimento de algoritmos para correção automatizada de *sun-glint* para ambientes aquáticos para sensores com alta resolução espacial e ausência da banda SWIR.

O efeito de adjacência, também conhecido como "efeito de fundo" e "efeito ambiental", pode ser conceitualmente descrito como o aumento na radiância do alvo devido à dispersão de fótons refletidos de alvos adjacentes em direção ao campo de visão do sensor (OTTERMAN; FRASER, 1979; RICHTER et al., 2006; TANRÉ; HERMAN; DESCHAMPS, 1981) A magnitude do efeito de adjacência varia ao longo do corpo d'água em resposta à distância da fronteira terra-água, e é influenciada pelas características espectrais dos alvos terrestres (BULGARELLI; ZIBORDI, 2018). Este fenômeno reduz o contraste entre a alta refletividade da terra com a baixa refletividade da água. Como resultado, os fótons espalhados dos alvos terrestres próximos dos alvos aquáticos podem distorcer a resposta da refletância espectral da água. Isto é especialmente importante quando avaliados corpos d'água de menores extensões (MARTINS et al., 2017a; PAULINO et. al, 2022). Se não levado em conta, este efeito pode introduzir erros na resposta do sinal que saí da água (WARREN; SIMIS; SELMES, 2021) limitando o uso das imagens para predição de constituintes aquáticos (PAULINO et. al, 2022)

Como mencionado na Seção 3.4.2, os dados para correção de AOD são obtidos do sensor MODIS, porém, em alguns casos, não há sobreposição entre as imagens MODIS e PSR. Para estes casos é aplicado AOD de "céu claro" que nem sempre corresponde à realidade da cena. Uma alternativa possível é a utilização da banda azul costeira do sensor SuperDove para derivar AOD (TU et al., 2022). Por exemplo, o produto de reflectância do Landsat 8 OLI usa o AOD derivado de suas próprias bandas azul-costeira e azul, combinando a razão das

bandas azul e vermelha com os dados MODIS. Isso demonstrou melhorias na precisão da estimativa (VERMOTE et al., 2016).

Outra fonte de erro potencial dos produtos do SuperDove são os efeitos de *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF). Estudos anteriores apontam que, dependendo do ângulo de visada do sensor, este erro pode chegar a 5% (BREON; MAIGNAN, 2017). Apesar do ângulo de visada do SuperDove não passar de 6 graus, esta incerteza ainda não está bem documentada (KINGTON; COLLISON, 2022). Para um fluxo de trabalho mais robusto, podem-se considerar aplicar alguns modelos de BRDF baseados em kernel, por exemplo, para eliminar o efeito de variações direcionais.

Dados de  $R_{rs}$  demandam alta razão sinal-ruído (SNR), bandas espectrais apropriadas e alta resolução radiométrica para garantir medições de alta qualidade. Valores baixos de SNR são uma limitação potencial para a obtenção de produtos de sensoriamento remoto da água de alta qualidade (MACIEL et al., 2020). A obtenção da  $R_{rs}$  em ambientes de baixa turbidez requer sensores com alta razão sinal-ruído (SNR) e fidelidade radiométrica para garantir produtos de sensoriamento remoto de alta qualidade (PAHLEVAN; SCHOTT, 2012). O SNR do MSI para a banda do azul, corresponde a 154, para a banda verde, 168, para a banda vermelha 142, vermelho limítrofe 117 e para a banda NIR equivale a  $172 \text{ W m}^{-2} \text{ msr}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$  (ESA, 2015). Já os valores encontrados para estas bandas são, respectivamente, 170, 150, 138, 57,  $137 \text{ W m}^{-2} \text{ msr}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$  (EDAP, 2021). Estes valores demonstram que os valores maiores são encontrados em MSI (exceto para a banda do azul) e muito próximo ao PSD. Isso demonstra avanços significativos em relação à razão sinal-ruído do sensor em questão.

Embora das bandas do SuperDove coincidam exatamente com os picos de absorção e espalhamento dos constituintes opticamente ativos dos sistemas aquáticos, as bandas Amarelo (610nm) e a banda do Vermelho (665nm) e Vermelho Limítrofe (705nm) podem ser muito úteis para a estimativa de concentração de pigmentos em águas com alta produtividade e turbidez. O pico de absorção máximo da PC é em aproximadamente em 620nm e o pico de

absorção da clorofila-a em aproximadamente em 670nm, uma variação de 10nm e 5nm ao comprimento de onda central do PS.SD.

## 6 CONCLUSÃO

Apesar deste sensor (PS.SD) ter sido desenvolvido, primariamente, para aplicações em ambientes terrestres, os resultados desta pesquisa demonstram que a qualidade radiométrica do SuperDove nas bandas do visível e vermelho limítrofe (exceto Azul Costeiro e NIR) é suficiente para o monitoramento da qualidade da água em ambientes costeiros e continentais no Brasil, utilizando os métodos de correção atmosférica 6SV (Planet) e ACOLITE DSF.

O produto PSR (método 6SV) apresentou bons resultados para as bandas do azul (490nm), verde I (531nm) e verde II (565nm) com erros que correspondem de 23,41% a 35,56%. Erros intermediários foram encontrados nas bandas amarelo (610nm), vermelho e vermelho limítrofe com erros de 40,04 a 43,19%. Como esperado, erros mais altos foram encontrados nas bandas azul costeiro (441nm) e NIR com valores de 80,46% e mais de 620%, respectivamente.

Para o método ACOLITE DSF os erros encontrados foram similares ao método 6SV. Para as bandas azul (490nm), verde I (531nm) e verde II (565nm) os erros não ultrapassam 36,5% com destaque para a banda verde II com erro igual a 22,65%. As bandas com desempenhos intermediários, com erros abaixo de 51,93% foram as do amarelo (47,85%), vermelho (45,61%) e vermelho limítrofe (51,93%). Azul costeiro e NIR apresentaram erros acima de 108%.

Nesta pesquisa observou-se que analisado a acurácia radiométrica de todas as bandas, por campanha; o reservatório Billings, Lago Grande do Curuai e o Canal de São Sebastião obtiveram erros e vieses baixos (13% de erro em Canal São Sebastião em 6SV e 16,43% de erro e 2% de viés para Curuai em ACOLITE DSF). Entretanto, para a Baía de Paranaguá o erro apresentado foi de 563,23%, com o método de correção atmosférica ACOLITE, e 369,37% com o método 6SV. Para o Rio Arapiuns, Rio Tapajós e Baía de Antonina também apresentaram erros muito altos, acima de 300%.

Apesar da grande quantidade de satélites SD em órbita e variação da geometria de aquisição do dado, não foi observado uma tendência de aumento dos erros. Conclui-se que existe uma grande correspondência entre os dados medidos em

campo com o sensor SuperDove e observou-se consistência entre os diferentes sensores desta constelação de satélites.

Os resultados apresentados neste estudo também mostraram grande consistência entre a Rrs do SuperDove com a do sensor MSI. Para a banda verde (565nm) foi encontrado o maior erro na comparação inter-sensores com valor de 6,07% e viés de 6,04%. Para as demais bandas (azul, vermelho e vermelho limítrofe), o erro não ultrapassa 4,78% com viés de 4,76%. Em relação às análises realizadas com razão de bandas e índices espectrais, os melhores resultados foram para RBR2 (com erro de 1,89% e viés de 0,87%) e RBD com erro igual a 10,71% e viés de 2,12%. Nesta comparação, para o NDCI obteve-se um erro similar ao RBD com valor igual a 11,73% e viés de 5,28%. Sua grande similaridade e concordância com o MSI permite a integração dos algoritmos desenvolvidos para o MSI para a estimativa de qualidade de água e concentração de constituintes. Sua resolução espacial e temporal mais fina possibilita monitoramento contínuo ao longo do tempo e em corpos d'água de menor extensão, expandindo as áreas possíveis de serem monitoradas.

Esta pesquisa demonstrou promissora a utilização do SuperDove para obtenção de Rrs em bandas utilizadas para a estimativa de constituintes aquáticos como clorofila-a, c-ficocianina e TSS. Entretanto, ainda é necessária a aplicação de algoritmos e validações destas estimativas.

Este trabalho analisou diferentes ambientes aquáticos com grande variabilidade de COAs e tipos ópticos. Pesquisas futuras devem ser realizadas avaliando a acurácia radiométrica do SuperDove para os diferentes OWT classificados, encontrados no Brasil e no mundo. Os resultados encontrados neste trabalho apontam que os dados de Rrs obtidos pelo SuperDove podem ser utilizados no monitoramento de ambientes aquáticos continentais e costeiros.

Finalmente observa-se que ainda é necessário o desenvolvimento de técnicas acuradas de correção de glint de sensores sem a faixa do SWIR e com alta resolução espacial, além de melhores métodos de correções atmosféricas e de correção de adjacência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOSA, C.C.F.; NOVO, E.M.L.M; MARTINS, V.S. **Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações**. INPE: São José dos Campos, 2019. 178p. ISBN 978-85-17-0009-9.
- Begliomini, F.N. **Cyanobacteria monitoring on urban reservoir using hyperspectral orbital remote sensing data and machine learning**. 2022. 104 p. Dissertation (Master in Remote Sensing) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2022.
- BETTENCOURT, P.; WASSERMAN, J. C.; DIAS, F. F.; ALVES, P. R.; BEZERRA, D. B.; SANTOS, C. A.; ZOTES, L. P.; BARROS, S. R. Remote sensing applied to the evaluation of spatial and temporal variation of water quality in a coastal environment, southeast Brazil. **Journal of Geographic Information System**. v. 11, p. 500-521. 2019.
- BOUILLON, S.; ABRIL, G.; BORGES, A. V.; DEHAIRS, F.; GOVERS, G.; HUGHES, H. J.; MERCKX, R.; MEYSMAN, F. J. R.; NYUNJA, J.; OSBURN, C.; MIDDELBURG, J. J. Distribution, origin and cycling of carbon in the Tana River (Kenya): a dry season basin-scale survey from headwaters to the delta. **Biogeosciences**, v. 6, p. 2475-2493, 2009.
- BREON, F. M.; MAIGNAN, F. A BRDF-BPDF database for the analysis of Earth target reflectances. **Earth System Science Data**, v. 9, n. 1, p. 31–45, 2017.
- BRIVIO, P. A.; GIARDINO, C.; ZILIOLI, E. Validation of satellite data for quality assurance in lake monitoring applications. **The Science of the Total Environment**, v. 268, n.1/3, p. 3-18, 2001.
- BULGARELLI, B.; KISELEV, V.; ZIBORDI, G. Simulation and analysis of adjacency effects in coastal waters: a case study. **Applied Optics**, v. 53, n. 8, p. 1523-1545, 2014
- CAIRO, C.T. **Caracterização temporal das propriedades bio-ópticas do reservatório de Ibitinga/SP**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015.
- CARDOSO-SILVA, S.; CARDOSO-SILVA, S.; NISHIMURA, P. Y.; PADIAL, P. R.; MARIANI, C. F.; LUIZ, M.; POMPÊO, M. Compartimentalização e qualidade da água: o caso da Represa. **Bioikos**, v. 28, n. 1, p. 31-43, 2014.

CHEN, J.; HE, X.; LIU, Z.; LIN, N.; XING, Q.; PAN, D. Sun glint correction with an inherent optical properties data processing system. **International Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 2, p. 617–638, 2021

COPERNICUS. **MultiSpectral Instrument (MSI) Overview**. 2023. Disponível em: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument>. Acesso em: 23 mar. 2023.

CORNARA, S.; PIRONDINI, F.; PALMADE, J. Sentinel-3 coverage-driven mission design: coupling of orbit selection and instrument design. **Acta Astronautica**, v. 140, p. 439–451, 2017.

CÔRTEZ, P. L.; TORRENTE, M.; PINTO FILHO, A. A.; RUIZ, M. S.; DIAS, A. J. G.; RODRIGUES, R. Crise de abastecimento de água em São Paulo e falta de planejamento estratégico. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, p. 7–26, 2015.

COX, C.; MUNK, W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter. **Josa**, v. 44, n. 11, p. 838–850, 1954.

DA SILVA, E. F. F.; NOVO, E. M. L. M.; LOBO, F. L.; BARBOSA, C. C. F.; NOERNBERG, M. A.; ROTTA, L. H. S.; CAIRO, C. T.; MACIEL, D. A.; FLORES JÚNIOR, R. Optical water types found in brazilian waters. **Limnology**, v. 22, n. 1, p. 57–68, 2021.

DASH, J.; OGUTU, B. O., Recent advances in space-borne optical remote sensing systems for monitoring global terrestrial ecosystems. **Progress in Physical Geography**, v. 40, n. 2, p. 322–351. 2016.

DEKKER, A. G. **Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing**. 1993. Thesis (PHD in Research and Graduation internal) – Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam, 1993. Disponível em: <https://research.vu.nl/ws/portalfiles/portal/62846616/complete+dissertation.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2023.

DORJI, P.; FEARNES, P. Impact of the spatial resolution of satellite remote sensing sensors in the quantification of total suspended sediment concentration: a case study in turbid waters of Northern Western Australia. **PLoS ONE**, v. 12, n. 4, 2017.

DUDGEON, D.; ARTHINGTON, A. H.; GESSNER, M. O.; KAWABATA, Z.-I.; KNOWLER, D. J.; LÉVÊQUE, C.; NAIMAN, R. J.; PRIEUR-RICHARD, A.-H.; SOTO, D.; STIASSNY, M. L. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. **Biological Reviews**, v. 81, n. 2, p. 163–182, 2006.

- EUROPEAN SPACE AGENCY. **Planet imagery specifications**. 2020. Disponível em: <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/Planet-combined-imagery-product-specs-2020.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2023.
- FRAGOSO, C. R. Jr.; MARQUES, D. M. M.; FERREIRA, T. F.; JANSE, J. H.; VAN NES, E. H. Potential effects of climate change and eutrophication on a large subtropical shallow lake. **Environ. Model. Softw.**, v. 26, p. 1337-1348, 2011.
- FRAZIER, A. E.; HEMINGWAY, B. L. A technical review of planet smallsat data: practical considerations for processing and using PlanetScope imagery. **Remote Sensing**, v. 13, n. 19, 2021.
- GITELSON, A. A.; DALL'OLMO, G.; MOSES, W.; RUNDQUIST, D. C.; BARROW, T.; FISHER, T. R.; GURLIN, D.; HOLZ, J. A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: validation. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p. 3582–3593, 2008.
- GUIMARÃES JUNIOR., C. Caracterização limnológica preliminar do reservatório da UHE Mário Lopes Leão – Promissão. **CESP**, v. 4, p. 89 – 103. 1989.
- HARMEL, T.; CHAMI, M.; TORMOS, T.; REYNAUD, N.; DANIS, P.A. Sun glint correction of the Multi-Spectral Instrument (MSI)-SENTINEL-2 imagery over inland and sea waters from SWIR bands. **Remote Sensing of Environment**, v. 204, p. 308–321, 2018.
- HEDLEY, J.D.; HARBONE, A.R.; MUMBY, P.J. Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 10, p. 2107-2112, 2005.
- HENDERIKX FREITAS, F.; DIERSSEN, H. M. Evaluating the seasonal and decadal performance of red band difference algorithms for chlorophyll in an optically complex estuary with winter and summer blooms. **Remote Sensing of Environment**, v. 231, 2019.
- HESTIR, E. L.; BRANDO, V. E.; BRESCIANI, M.; GIARDINO, C.; MATTA, E.; VILLA, P.; DEKKER, A. G. Measuring freshwater aquatic ecosystems: the need for a hyperspectral global mapping satellite mission. **Remote Sensing of Environment**, v. 167, p. 181-195, 2015
- HOCHBERG, E. J.; ANDRÉFOUËT, S.; TYLER, M. R. Sea surface correction of high spatial resolution ikonos images to improve bottom mapping in near-shore environments. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 7, p. 1724–1729, 2003. 3, 4, 31



KINGTON, J.; COLLISON, A. **Scene level normalization and harmonization of planet dove imagery**. 2022. Disponível em:

[https://assets.planet.com/docs/scene\\_level\\_normalization\\_of\\_planet\\_dove\\_imagery.pdf](https://assets.planet.com/docs/scene_level_normalization_of_planet_dove_imagery.pdf). Disponível em: 27 maio 2023.

KIRK, J. T. O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**.

Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 665 p. ISBN(9780521151757).

KUTSER, T.; VAHTMAE, E.; PRAKS, J. A sun glint correction method for hyperspectral imagery containing areas with non-negligible water leaving NIR signal. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 2267-2274, 2009.

LAMOUR, M.; ANGULO, R.; SOARES, C. Bathymetrical Evolution of Critical Shoaling Sectors on Galheta Channel, Navigable Access to Paranaguá Bay, Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 23, p. 49-58, 2009.

LOBO, F. L.; NAGEL, G. W.; MACIEL, D. A.; CARVALHO, L. A. S.; MARTINS, V. S.; BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M. AlgaeMAP: Algae Bloom Monitoring Application for Inland Waters in Latin America. **Remote Sens.**, v. 13, p. 2874, 2021.

LOBO, F.L.; JORGE, D.S. Processamento de dados, modelagem e mapeamento de parâmetros bio-ópticos. In: BARBOSA, C.C.F.; NOVO, E.; MARTINS, V.S. (Ed.) Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações. São José dos Campos: INPE, 2019. ISBN 978-85-170009-9.

LONDE, L.R. **Comportamento espectral do fitoplâncton de um reservatório brasileiro eutrofizado–Ibitinga (SP)**. 2008. 223 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), , São José dos Campos. Disponível em: [http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/08.18.12.14/doc/tese\\_Luciana\\_Londe.pdf](http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/08.18.12.14/doc/tese_Luciana_Londe.pdf). Acesso em: 25 abr. 2023.

MACIEL, D. A.; NOVO, E. M. L. D. M.; BARBOSA, C. C. F.; MARTINS, V. S.; FLORES JÚNIOR, R.; OLIVEIRA, A. H.; SANDER DE CARVALHO, L. A.; LOBO, F. D. L. Evaluating the potential of CubeSats for remote sensing reflectance retrieval over inland waters. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, n. 7, p. 2807–2817, 2020.

MACIEL, D.; NOVO, E.; DE CARVALHO, L. S.; BARBOSA, C.; FLORES JÚNIOR, R.; LOBO, F. L. Retrieving total and inorganic suspended sediments in Amazon floodplain lakes: a multisensor approach. **Remote Sensing**, v. 11, n. 15, 2019.

MARANDOLA JUNIOR, E.; MARQUES, C.; PAULA, L. T.; CASSANELI, L. B. Crescimento urbano e áreas de risco no litoral norte de São Paulo. **Rev. bras. estud. popul.** v. 30, n. 1, p. 35-56, 2013.

MARTINS, V. S. Sistemas orbitais para monitoramento de ambientes aquáticos. In: BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MARTINS, V. S. (Ed.). **Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações.** São José dos Campos: INPE, 2019. p.107-135.

MARTINS, V. S.; BARBOSA, C. C. F.; DE CARVALHO, L. A. S.; JORGE, D. S. F.; LOBO, F. L.; DE MORAES NOVO, E. M. L. Assessment of atmospheric correction methods for sentinel-2 MSI images applied to Amazon floodplain lakes. **Remote Sensing**, v. 9, n. 4, 2017a.

MARTINS, V. S.; KALEITA, A.; BARBOSA, C. C. F.; FASSONI-ANDRADE, A. C.; LOBO, F. L.; NOVO, E. M. L. M. Remote sensing of large reservoir in the drought years: implications on surface water change and turbidity variability of Sobradinho reservoir (Northeast Brazil). **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 13, p. 275-288, 2018.

MARTINS, V. S.; LYAPUSTIN, A.; CARVALHO, L. A. S.; BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M. Validation of high-resolution MAIAC aerosol product over South America. **Journal of Geophysical Research**, v. 122, n. 14, p. 7537-7559, 2017b.

MATTHEWS, M. W. Bio-optical modeling of phytoplankton chlorophyll-a. In: MISHRA D. R.; OGASHAWARA, I.; GITELSON, A. A. (Ed.). **Bio-optical modeling and remote sensing of inland waters.** Amsterdam: Candice Janco, 2017. Disponível em: [https://ioccg.org/wp-content/uploads/2017/06/book\\_cover\\_toc.pdf](https://ioccg.org/wp-content/uploads/2017/06/book_cover_toc.pdf). Acesso em: 13 fev. 2023.

MISHRA, S.; MISHRA, D. R. Normalized difference chlorophyll index: a novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 117, p. 394–406, 2012.

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

MOBLEY, C. D. **Light and water: radiative transfer in natural waters.** [S.l.] Academic Press, 1994. 592 p.

MOREL, A.; BRICAUD, A. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton. **Deep Sea Research**. v. 28, p. 1375-1393, 1981.

NIROUMAND-JADIDI, M.; LEGLEITER, C. J.; BOVOLO, F. Bathymetry retrieval from CubeSat image sequences with short time lags. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 112, 2022.

NOVACK, T., ESCH, T., KUX, H., STILLA, U., 2011. Machine learning comparison between WorldView-2 and QuickBird-2-simulated imagery regarding object-based urban land cover classification. **Remote Sensing**, v. 3, p. 2263–2282, 2011.

OTTERMAN, J.; FRASER, R. S. Adjacency effects on imaging by surface reflection and atmospheric scattering: cross radiance to Zenith. **Applied Optics**, v. 197, n. 16, p. 2852-2860, 1979

PAHLEVAN, N.; CHITTIMALLI, S. K.; BALASUBRAMANIAN, S. V.; VELLUCCI, V. Sentinel-2/Landsat-8 product consistency and implications for monitoring aquatic systems. **Remote Sensing of Environment**. v. 220. p. 19-29. 2018.

PAHLEVAN, N.; MANGIN, A.; BALASUBRAMANIAN, S. V.; SMITH, B.; ALIKAS, K.; ARAI, K.; BARBOSA, C.; BÉLANGER, S.; BINDING, C.; BRESCIANI, M.; GIARDINO, C.; GURLIN, D.; FAN, Y.; HARMEL, T.; HUNTER, P.; ISHIKAZA, J.; KRATZER, S.; LEHMANN, M. K.; LIGI, M.; MA, R.; MARTIN-LAUZER, F. R.; OLMANSON, L.; OPPELT, N.; PAN, Y.; PETERS, S.; REYNAUD, N.; SANDER DE CARVALHO, L. A.; SIMIS, S.; SPYRAKOS, E.; STEINMETZ, F.; STELZER, K.; STERCKX, S.; TORMOS, T.; TYLER, A.; VANHELLEMONT, Q.; WARREN, M. ACIX-Aqua: a global assessment of atmospheric correction methods for Landsat-8 and Sentinel-2 over lakes, rivers, and coastal waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 258, 2021.

PAULINO, R. S.; MARTINS, V. S.; NOVO, E. M. L. M.; BARBOSA, C. C. F.; DE CARVALHO, L. A. S.; BEGLIOMINI, F. N. Assessment of adjacency correction over inland waters using Sentinel-2 MSI images. **Remote Sensing**, v. 14, n. 8, 2022.

RICHTER, R.; BACHMANN, M.; DORIGO, W.; MÜLLER, A. Influence of the adjacency effect on ground reflectance measurements. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 3, n. 4, p. 565-569, 2006.

ROYER, A.; VINCENT, P.; BONN, F. Evaluation and correction of viewing angle effects on satellite measurements of bidirectional reflectance. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 51, n. 12, p. 1899–1914, 1985.

SAGAN, V.; PETERSON, K. T.; MAIMAITIJIANG, M.; SIDIKE, P.; SLOAN, J.; GREELING, B. A.; MAALOUF, S.; ADAMS, C. Monitoring inland water quality using remote sensing: potential and limitations of spectral indices, bio-optical

simulations, machine learning, and cloud computing. **Earth-Science Reviews**, 2020.

SCHAEFFER, B. A.; SCHAEFFER, K. G.; KEITH, D.; LUNETTA, R. S.; CONMY, R.; GOULD, R. W. Barriers to adopting satellite remote sensing for water quality management. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 21, p. 7534–7544, 2013.

SIOLI, H. Hydrochemistry and geology in the Brazilian Amazon region. **Amazoniana**, v. 1, n. 3, p. 267-277, 1968.

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

SUN, D.; LI, Y.; WANG, Q. Partitioning particulate scattering and absorption into contributions of phytoplankton and non-algal particles in winter in Lake Taihu (China). **Hydrobiologia**, v. 644, p. 337–349, 2010.

TANRÉ, D.; HERMAN, M.; DESCHAMPS, Y. Influence of the background contribution upon space measurements of ground reflectance. **Applied Optics**, v. 20, n. 20, p. 3676-3683, 1981.

TU, Y. H.; JOHANSEN, K.; ARAGON, B.; EL HAJJ, M. M.; MCCABE, M. F. The radiometric accuracy of the 8-band multi-spectral surface reflectance from the planet SuperDove constellation. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 114, 2022.

VANHELLEMONT, Q. **ACOLITE user manual**. [S.l.]: RBINS, 2022. 45 p.

VANHELLEMONT, Q. Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives. **Remote Sensing of Environment**, v. 225, p. 175–192, 2019.

VANHELLEMONT, Q. Daily metre-scale mapping of water turbidity using CubeSat imagery. **Optics Express**, v. 27, n. 20, p. A1372, 2019.

VANHELLEMONT, Q. Evaluation of eight band SuperDove imagery for aquatic applications. **Optics Express**, v. 31, n. 9, p. 13851, 2023.

VERMOTE, E.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J.-J.; TANRÉ, D.; DEUZÉ, J. L.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J. J.; KOTCHENOVA, S. Y. Second simulation of

a satellite signal in the solar spectrum-vector (6SV): an overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, p. 675-586, 1997.

WANG, D.; MA, R.; XUE, K.; LOISELLE, S. A. The assessment of landsat-8 OLI atmospheric correction algorithms for inland waters. **Remote Sensing**, v. 11, n. 2, 2019.

WANG, M.; SHI, W. Estimation of ocean contribution at the MODIS near-infrared wavelengths along the east coast of the U.S.: two case studies. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 13, p. 1–5, 2005.

WARREN, M.A. et al. Complementary water quality observations from high and medium resolution Sentinel sensors by aligning chlorophyll-a and turbidity algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 265, p. 1–18, 2021.

WESTALL, F.; BRACK, A. The importance of water for life. **Space Science Reviews**, v. 214, p.50, 2018.

WICAKSONO, P.; LAZUARDI, W. Assessment of PlanetScope images for benthic habitat and seagrass species mapping in a complex optically shallow water environment. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 17, p. 5739–5765, 2018.

YANG, H.; KONG, J.; HU, H.; DU, Y.; GAO, M.; CHEN, F. A review of remote sensing for water quality retrieval: progress and challenges. **Remote Sensing**, v. 14, n. 8, 2022.