



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/04.01.23.08-TDI

**OCORRÊNCIA E REMOÇÃO DOS EFEITOS DE
SUNGLINT EM IMAGENS HIPERESPECTRAIS DE
ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL DO SENSOR SpecTIR**

Annia Susin Streher

Dissertação de Mestrado em Senso-
riamento Remoto, orientada pelos
Drs. Claudio Clemente Faria Bar-
bosa, e Lênio Soares Galvão, apro-
vada em 26 de abril de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DR968E>>

INPE
São José dos Campos
2013

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Luciana Manacero - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/04.01.23.08-TDI

**OCORRÊNCIA E REMOÇÃO DOS EFEITOS DE
SUNGLINT EM IMAGENS HIPERESPECTRAIS DE
ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL DO SENSOR SpecTIR**

Annia Susin Streher

Dissertação de Mestrado em Senso-
riamento Remoto, orientada pelos
Drs. Claudio Clemente Faria Bar-
bosa, e Lênio Soares Galvão, apro-
vada em 26 de abril de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DR968E>>

INPE
São José dos Campos
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

St83o Streher, Annia Susin.
Ocorrência e remoção dos efeitos de sunglint em imagens hiperespectrais de alta resolução espacial do sensor SpecTIR / Annia Susin Streher. – São José dos Campos : INPE, 2013.
xx + 87 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/04.01.23.08-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Orientadores : Drs. Claudio Clemente Faria Barbosa, e Lênio Soares Galvão.

1. reflexão especular. 2. águas do caso 2. 3. sensoriamento aerotransportado. 4. COAS. 5. geometria de aquisição. I.Título.

CDU 528.8

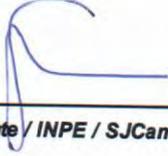


Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).

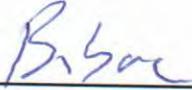
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Sensoriamento Remoto

Dra. Evelyne Márcia Leão de Moraes Novo



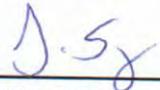
Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Cláudio Clemente de Faria Barbosa



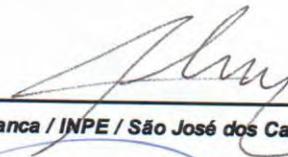
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Lênio Soares Galvão



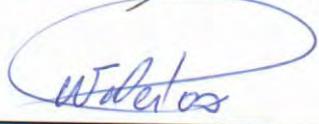
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Thiago Sanna Freire Silva



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Waterloo Pereira Filho



Convidado(a) / UFSM / Santa Maria - RS

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Annia Susin Streher**

São José dos Campos, 26 de Abril de 2013

"A ciência é uma disposição de aceitar os fatos mesmo quando eles são opostos aos desejos"

Burrhus Frederic Skinner

"Até mais, e obrigado pelos peixes."

Douglas Adams

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos e auxílio financeiro na campanha de campo. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por financiar o projeto que viabilizou a aquisição das imagens hiperespectrais (Processo 08/56252-0). À Fototerra pela realização do sobrevoo e ao Jürgen Langenwalter pelo auxílio com os metadados. Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e à Coordenação acadêmica do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto pela oportunidade e estrutura disponibilizada.

Ao Dr. Cláudio Clemente Faria Barbosa pela oportunidade, orientação e paciência ao longo do mestrado. O auxílio durante o período de disciplinas e seus esforços para que o trabalho fosse realizado foram ilimitados. Agradeço também ao Dr. Lênio Soares Galvão por quem acumulo cada vez mais admiração. Sua orientação e experiência em sensoriamento remoto foram fundamentais para que o trabalho fosse realizado com o rigor científico necessário.

Ao amigo Dr. Thiago Sanna Freire Silva, por dividir informações, conhecimentos e experiências que ajudaram a elucidar diversas questões do trabalho, além dos conselhos e conversas que certamente levarei para a vida inteira. À Dra. Evelyn Marcia Leão de Moraes Novo por ter acompanhado o trabalho desde seu início, sugerindo e questionando aspectos pertinentes à melhoria do trabalho. Aos colegas Joaquim Leão, Lino Augusto Sander de Carvalho, Otávio Cristiano Montanher e Carlos Araújo pela ajuda, disposição e bom humor necessários à realização de um conturbado trabalho de campo. Ao meu irmão mais velho, Rafael Damiani Ferreira por toda a colaboração ao longo do mestrado.

À turma da PGSER 2011, a qual tornou o tenso período das disciplinas muito mais divertido. Aos amigos da Batcaverna, do CST e aos demais colegas do INPE, muito obrigada pela convivência. Em especial, agradeço ao Felipe das Neves Fávoro, Clayton Borges, Jonas Cinquini e Otávio Cristiano Montanher pela parceria de todas as horas e pelas muitas esfiras e “dolerias” divididas. À minha grande amiga Catarina Marques Cecílio pelas longas conversas, comilanças e bons momentos vividos, mas principalmente por me fazer rir quando as coisas não davam muito certo. Ao Alan de Brito, pelo carinho e companheirismo de todas as horas. À Marina Muller, Carolina de Oliveira e Taísa Fedrizzi Maffazioli por estarem sempre comigo, mesmo longe.

A meus pais, Ivane e Gilberto, à minha irmã Nathália e a todo clã dos Susin por trazer ordem ao caos e acreditar em mim apesar de tudo. A vida é muito melhor com vocês.

RESUMO

O *sun glint*, também conhecido como reflexão especular da água, é um componente da radiação que atinge o sensor sem interagir com a coluna d'água. O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos de *sun glint* em imagens hiperespectrais do sensor aerotransportado SpecTIR, obtidas em diferentes horários e com direções de imageamento distintas, sobre o Reservatório de Ibitinga (SP) (águas do caso 2). O reservatório de Ibitinga, localizado no estado de São Paulo, foi selecionado como área de estudo, devido ao seu formato sinuoso, exigindo constantes mudanças na geometria de aquisição das imagens. Nos dias 23 e 24 de outubro de 2011 foram amostradas 14 estações de coleta de água, concomitantemente a aquisição das imagens SpecTIR em 357 bandas (398 - 2500 nm) e com 3 m de resolução espacial. Amostras de água foram analisadas em laboratório para quantificação dos constituintes opticamente ativos da água (COAs). Os efeitos de *sun glint* nas imagens foram corrigidos por meio do algoritmo proposto por Goodman *et al.* (2008). A eficácia deste método foi testada através da comparação com o algoritmo proposto por Kutser *et al.* (2009) e com o método de Kutser modificado. Foram gerados os coeficientes de correlações entre os dados analíticos das variáveis de qualidade da água coletadas em campo e os valores de reflectância das imagens, em regiões do espectro eletromagnético sensíveis a essas substâncias. Os resultados obtidos mostraram que o *sun glint* afetou não só os aspectos visuais das imagens, mas também a sua qualidade radiométrica, elevando os valores de reflectância em até três vezes mais do que o esperado para alvos aquáticos. O algoritmo de remoção de *sun glint* proposto por Goodman *et al.* (2008) produziu bons resultados, reduzindo as diferenças espectrais entre massas homogêneas de águas afetadas e não-afetadas por *sun glint*, permitindo uma melhor interpretação visual das cenas e melhorando a qualidade da informação espectral. O método de Kutser *et al.* (2009) não foi capaz de remover o *sun glint* nas áreas mais contaminadas da imagem, enquanto o método de Kutser modificado mostrou-se sensível ao processo de correção atmosférica e a relação sinal/ruído do sensor. O ângulo zenital solar foi o fator mais importante na ocorrência de *sun glint* nas imagens. Imagens adquiridas com ângulos zenitais maiores (próximos a 40°) foram menos suscetíveis a ocorrência de *sun glint*, enquanto as cenas com ângulos zenitais entre 30° e 40° apresentaram-se mais contaminadas, principalmente nas bordas. Apesar das imagens com ângulos zenitais maiores terem sido menos afetadas pelo *sun glint*, a radiação incidente não foi suficiente para caracterizar os COAs da água por meio de relações empíricas entre as suas concentrações e os dados espectrais. Os resultados mostraram claramente a divisão dos dados em dois conjuntos distintos, formados por ângulos zenitais maiores e menores de 40°. A correção dos dados para os efeitos do *sun glint* tende a agrupar todos os dados em um único conjunto, permitindo assim uma melhora nas relações observadas entre COAs e reflectância. A escolha do melhor ângulo zenital solar para a aquisição de imagens de ambientes aquáticos representa um *trade-off* entre sensibilidade a ocorrência do *sun glint* e a maximização do sinal referente a presença dos COAs.

OCURRENCE AND REMOVAL OF *SUNGLINT* EFFECTS IN HYPERSPECTRAL AND HIGH SPATIAL RESOLUTION IMAGES FROM THE SPECTIR SENSOR

ABSTRACT

Sunlint, also known as the specular reflection of light from water surfaces, is a component of sensor-received radiance that represents a confounding factor on the characterization of water bodies by remote sensing. The present study assessed the *sunlint* effects in airborne hyperspectral images acquired by the SpecTIR sensor at different time and flight directions over the Ibitinga reservoir (Case 2 waters). The Ibitinga reservoir, located in southeastern Brazil (state of São Paulo), was selected as the study area because of its meandering shape. As a result, there is demanding constant changes in data acquisition geometry to achieve complete coverage. Field data collection was carried out on October 23rd and 24th, 2011. During these two days, 14 water stations along the reservoir were sampled, concurrently with the SpecTIR image acquisition in 357 bands (398-2455 nm) and at 3 m spatial resolution. The optically active substances (OAS) were determined in laboratory. The effects of *sunlint* in the images were corrected using the Goodman et al. (2008) algorithm. The effectiveness of this method was tested through comparison of results with those from the algorithm proposed by Kutser et al. (2009) and from the Kutser modified method. Correlation coefficients were generated between the analytical water quality variables data and the reflectance values of the images. Results showed that the *sunlint* affected not only the visual aspects of images but also their radiometric quality, increasing the reflectance values up to three times more than the expected for water targets. The Goodman et al. (2008) algorithm produced good results, reducing spectral differences between homogeneous masses of waters affected and non-affected by *sunlint*, enabling better visual interpretation of the scenes and improving the quality of the spectral information. The Kutser et al. (2009) method was not able to remove the *sunlint* from the most contaminated areas, while the Kutser modified method was too sensitive to the atmospheric correction procedure and to signal/noise ratio. The solar zenith angle was found to be the most important factor in the occurrence of *sunlint* in the images. Images acquired with larger zenith angles (approximately 40°) are less predisposed to the occurrence of these features, while the scenes with zenith angles between 30° and 40° were more contaminated with *sunlint*, especially on the images edges. Although the images with larger zenith angles have been less affected by *sunlint*, the incident radiation was not sufficient to characterize the water OAS through empirical relationships between their concentrations and spectral data. The results clearly showed a data division into two distinct sets, formed by zenith angles above and below 40°. The correction of the *sunlint* effects tends to cluster all data in one assembly, allowing an improvement in the relations between the OAS and the reflectance. The choice of the best solar zenith angle for the acquisition of images over aquatic environments represents a trade-off between sensitivity to the *sunlint* occurrence and the signal maximization regarding the OAS presence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Fatores que influenciam o sinal capturado pelo sensor	6
Figura 2.2 - Espectro de absorção (a) e espalhamento (b) da água oceânica.....	8
Figura 2.3 – Reflectância de quatro superfícies: (a) superfície Lambertiana; (b) não Lambertiana (direcional); (c) espalhamento frontal ou reflexão especular; (d) retroespalhamento.....	14
Figura 2.4 – Diferenças na porção de sombreamento dos alvos com a variação da visada do sensor ao longo do seu campo de visada (<i>FOV</i>)....	16
Figura 2.5 - Geometria do <i>sunglint</i>	18
Figura 2.6 - Reflectância da superfície da água em função do ângulo zenital de incidência, com diferentes velocidades de vento.....	19
Figura 2.7- Imagens ópticas, de baixa e alta resolução espacial, afetadas por <i>sunglint</i>	21
Figura 3.1- Fluxograma geral das etapas do trabalho.....	25
Figura 3.2 - Localização do reservatório de Ibitinga, no estado de São Paulo, Brasil	27
Figura 3.3 – Coleta de amostras de água em campo para quantificação analítica dos COAs.....	29
Figura 3.4 - Condições de iluminação durante o trabalho de campo.	30
Figura 3.5 - Exemplo de uma região com massa de água considerada homogênea sob os efeitos de <i>sunglint</i> ,	32
Figura 3.6 - A) localização da estação meteorológica de Ibitinga – SP; B) condições da superfície do reservatório durante a amostragem que ocorreu concomitante ao sobrevoo.	33
Figura 3.7 - Equivalência entre os ângulos azimutais.	38
Figura 4.1 - Exemplos de imagens do sensor SpecTIR, adquiridas no reservatório de Ibitinga, afetadas por <i>sunglint</i>	43
Figura 4.2 - Direção e velocidade do vento na estação meteorológica de Ibitinga – SP.....	45
Figura 4.3 Imagem G composição cor verdadeira.....	47
Figura 4.4 – Imagem D composição cor verdadeira	48
Figura 4.5 – Transecto arbitrário traçado em um recorte da imagem G	50

Figura 4.6 – Transecto arbitrário traçado em um recorte da imagem D	51
Figura 4.7 – Imagens-resíduos resultantes da aplicação do método de Goodman et al. (2008).	55
Figura 4.8 - Boxplot com o logaritmo natural dos resíduos (método de Goodman et al., 2008).....	57
Figura 4.9 – Fatiamento das imagens-resíduo evidenciando a distribuição espacial e a intensidade do <i>sunlint</i> , nas imagens SpecTIR. .	58
Figura 4.10 - Frequência relativa (%) das classes de intensidade de <i>sunlint</i> em cada uma das cenas.....	59
Figura 4.11 – Recorte da área em comum entre as imagens D e G.	60
Figura 4.12 – Recorte da área em comum entre as imagens D e C.	61
Figura 4.13 – Recorte da área em comum entre as imagens F e D.....	62
Figura 4.14 – Diagramas de dispersão dos dados de reflectância e concentração de clorofila-a (Chla_a).....	64
Figura 4.15 – Diagramas de dispersão dos dados de reflectância e concentração de Sedimentos inorgânicos em suspensão (SS_inorg).	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Exemplos de sensores hiperespectrais aerotransportados comumente utilizados em estudos voltados a caracterização de águas do Caso 2.....	12
Tabela 3.1 - Localização geográfica das estações de coleta (EC) no reservatório de Ibitinga -SP.....	28
Tabela 3.2 - Parâmetros de aquisição das imagens do sensor SpecTIR obtidas sobre o reservatório de Ibitinga -SP.....	30
Tabela 4.1 - Estatística descritiva dos perfis espaciais de reflectância de massas de água homogêneas utilizadas na identificação e caracterização de <i>sunlint</i> nas imagens de Ibitinga.	44
Tabela 4.2 - Diferença entre as médias dos valores de reflectância entres duas áreas, uma livre e outra contaminada por <i>sunlint</i>	53
Tabela 4.3 - Frequência relativa (%) das classes de intensidade de <i>sunlint</i> em um recorte das imagens D.	60
Tabela 4.4 - Frequência relativa (%) das classes de intensidade de <i>sunlint</i> em um recorte das imagens D.	61
Tabela 4.5 - Frequência relativa (%) das classes de intensidade de <i>sunlint</i> em um recorte das imagens F.	62
Tabela 4.6 - Correlação (r) entre alguns COAs e a reflectância de superfície originária das imagens SpecTIR.....	67

Lista de Siglas e Abreviaturas

AISA	Airborne Hyperspectral Imaging System
ALI	Advanced Land Imager
AVIRIS	Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer
AAS	Ângulo Azimutal Solar
AAR	Ângulo Azimutal relativo
AZS	Ângulo Zenital Solar
AZVI	Ângulo Zenital de Visada Instantâneo
BRDF	Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional
CASI	Compact Airborne Spectrographic Imager
CDOM	Matéria orgânica dissolvida
CEPAGRI	Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura
Chl_a	Clorofila-a
COAs	Constituintes Opticamente Ativos da água
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FLAASH	Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes
FOV	Field of View – Campo de Visada
GIFOV	Ground Instantaneous field of view
GLT	Geometry look-up table
HyMap	Hyper-spectral Mapper
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IVP	Infravermelho próximo
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MODTRAN	Moderate resolution atmospheric transmission
PAR	Radiação fotossinteticamente ativa
pb	Profundidade de banda
ROI	Region of interest
Secchi	Transparência de Secchi
SpecTIR	ProSpecTIR-VS
SS_inorg	Sedimentos inorgânicos em suspensão
SS_org	Sedimentos orgânicos em suspensão
SWIR	Infravermelho médio
TSS	Sólidos Totais em Suspensão
VIS	Visível
VNIR	Vísivel/Infravermelho próximo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Hipótese	3
1.2.	Objetivo geral	3
1.3.	Objetivos Específicos.....	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1.	Sensoriamento remoto aplicado ao estudo de ambientes aquáticos	5
2.2.	Constituintes opticamente ativos da água (COAs)	7
2.2.1.	Água pura	7
2.2.2.	Matéria orgânica dissolvida (CDOM).....	8
2.2.3.	Sólidos totais em suspensão (TSS)	9
2.2.4.	Fitoplâncton	9
2.3.	Sensoriamento remoto aerotransportado	10
2.4.	Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional.....	14
2.4.1.	Sunglint.....	16
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1.	Seleção da área de estudo	26
3.2.	Aquisição dos dados limnológicos in situ e das imagens hiperespectrais	27
3.3.	Pré-processamento das imagens hiperespectrais.....	30
3.4.	Identificação e caracterização de sunglint nas imagens hiperespectrais.....	32
3.5.	Aplicação e avaliação de métodos de remoção de sunglint.....	33
3.6.	Análise da geometria de aquisição dos dados na ocorrência de <i>sunglint</i>	37
3.7.	Análise dos efeitos de <i>sunglint</i> sobre a estimativa dos COAs, considerando a geometria de aquisição dos dados.....	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1.	Identificação e caracterização do <i>sunglint</i> nas imagens do Sensor SpecTIR.....	41
4.2.	Aplicação e avaliação dos métodos de remoção de <i>sunglint</i>	45
4.3.	Avaliação da geometria de aquisição das imagens na ocorrência de <i>sunglint</i>	54
4.4.	Análise dos efeitos do <i>sunglint</i> na caracterização dos COAs	63
5	CONCLUSÕES	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
	APÊNDICE A	79
	ANEXO A	87

1 INTRODUÇÃO

As águas interiores representam ecossistemas complexos e altamente dinâmicos, os quais sustentam uma ampla variedade de flora e fauna aquática e são críticos na preservação da biodiversidade global (REVENGA e KURA, 2003). O sensoriamento remoto óptico tem sido amplamente utilizado no monitoramento e manejo destes corpos de água, pois alguns dos parâmetros utilizados na avaliação da qualidade da água interagem com a radiação eletromagnética na região do visível e infravermelho próximo (KIRK, 2011). Portanto, tais constituintes podem ser teoricamente mapeados por meio de imagens oriundas de sensores remotos. Dentre os constituintes opticamente ativos (COAs) passíveis de monitoramento por sensoriamento remoto, podem ser citados os pigmentos fitoplanctônicos, principalmente clorofilas e ficocianinas, a matéria orgânica dissolvida e os sólidos totais em suspensão (IOCCG, 2000). Este tipo de monitoramento apresenta vantagens quando comparado aos métodos tradicionais, pois permite adquirir dados de maneira espacialmente contínua sobre amplas áreas, possibilitando a análise dos gradientes ecologicamente pertinentes e em escalas temporais adequadas (dias a décadas). Esta análise sinóptica é essencial à compreensão do funcionamento dos ecossistemas (DEKKER et al., 2001). Além disso, Dekker et al. (1995) mencionam que as imagens de satélite podem ser úteis no aperfeiçoamento do desenho amostral de programas de monitoramento, facilitando a seleção de locais adequados para coleta de amostras.

A alta resolução espectral e a possibilidade de ajuste da resolução espacial propiciada por sensores hiperespectrais aerotransportados, como o SpecTIR (SpecTIR LLC, operado no Brasil pela empresa FotoTerra), resulta em abordagens mais específicas na quantificação e identificação dos COAs. O sensor SpecTIR adquire imagens em 357 bandas (398-2455 nm), com largura de bandas de 5 nm e com resolução espacial que depende da altitude de voo (FERREIRA et al., 2011). Para o estudo da qualidade da água, as bandas posicionadas entre 450 e 900 nm são especialmente úteis em função da

resposta dos COAs nesta faixa espectral e da melhor relação sinal/ruído do sensor.

Um desafio que pode potencialmente afetar as aplicações do sensoriamento remoto óptico no monitoramento de corpos de água é a ocorrência de *sun glint* (reflexão especular da luz) nas imagens. O *sun glint* atua como um fator contaminante no sinal que atinge o sensor, pois a energia proveniente deste componente não carrega informação sobre a coluna de água (VAHTMÄE e KUTSER, 2008). Além de prejudicar o aspecto visual das imagens, o *sun glint* interfere também na qualidade espectral das áreas afetadas na imagem, uma vez que pode aumentar em cerca de duas ou mais vezes o valor da radiância que atinge o sensor (KAY et al., 2009). Com isso, o *sun glint* torna impreciso ou até mesmo impossibilita a classificação de habitats e a determinação e quantificação dos COAs da água e das feições bênticas, como demonstrado por Hochberg et al. (2003), Hedley et al. (2005) e Vahtmäe e Kutser (2008).

O efeito de *sun glint* pode acarretar perdas financeiras e científicas substanciais. Dependendo de sua intensidade, o uso das imagens hiperespectrais adquiridas por aeronaves pode ser comprometido, assim como a aplicação de algoritmos para obtenção de informação sobre a composição das águas. No caso de sensores aerotransportados pode-se otimizar o plano de voo, utilizando geometrias específicas de aquisição, de modo a minimizar os efeitos do *sun glint*. No entanto, de um ponto de vista prático, as recomendações sugeridas na literatura (DEKKER et al., 2001; MUSTARD, 2001) nem sempre podem ser seguidas, devido ao tamanho e ao padrão espacial dos corpos d'água. As formas sinuosas e irregulares de rios, lagos e represas constituem um grande desafio ao imageamento por sensores aerotransportados de visada estreita devido à necessidade de aquisição de dados em diferentes linhas de voo para fins de composição de mosaicos de cenas sobre corpos d'água. Diferentes faixas de imageamento, com geometrias de aquisição de dados distintas (horário e direção de imageamento), são muitas vezes necessárias para a cobertura completa do corpo d'água.

Nesse sentido, métodos de correção de *sun glint* foram delineados para minimizar tais efeitos indesejados. Muitos dos métodos de correção de *sun glint*

aplicados para imagens com alta resolução espectral utilizam abordagens desenvolvidas a partir de imagens multiespectrais. Apesar de apresentarem bons resultados em imagens hiperespectrais, estes métodos não se preocupam em manter a forma do espectro de reflectância dos pixels corrigidos. Procurando preencher essa lacuna, Goodman et al. (2008) e Kutser et al. (2009) desenvolveram métodos distintos para a minimização dos efeitos de *sunlint* em imagens de alta resolução espectral. Resumidamente, o método de Goodman et al. (2008) baseia-se no modelo de transferência radiativa de Lee et al. (1999) e utiliza-se dos coeficientes deste modelo e dos valores da reflectância em 750 e 640 nm para remover o *sunlint*. Por outro lado, o método de Kutser et al. (2009) explora a profundidade da banda de absorção do oxigênio, em 760 nm, para avaliar e remover os efeitos de *sunlint* das imagens hiperespectrais. Tais métodos são relativamente novos e foram testados apenas em um conjunto reduzido de imagens hiperespectrais. Em vista disso, a remoção do *sunlint* em imagens hiperespectrais é um tópico importante para o estudo adequado de águas interiores.

1.1. Hipótese

O presente estudo baseia-se na hipótese de que os métodos de remoção de *sunlint* são capazes de minimizar os efeitos das diferentes geometrias de iluminação em imagens hiperespectrais do sensor aerotransportado SpecTIR.

1.2. Objetivo geral

Estudar os efeitos de *sunlint* em imagens hiperespectrais do sensor aerotransportado SpecTIR, obtidas em diferentes horários e com direções de imageamento distintas, sobre o Reservatório de Ibitinga (SP) (águas do Caso 2).

1.3. Objetivos Específicos

- I. Identificar a ocorrência, o tipo e a magnitude do *sunlint* nas imagens SpecTIR;
- II. Avaliar a eficiência do método de Goodman et al. (2008) na remoção dos efeitos de *sunlint* das imagens SpecTIR, comparando os resultados

com os obtidos da aplicação do método de Kutser et al. (2009) e de uma variante deste método;

- III. Discutir a influência da geometria de aquisição dos dados (iluminação e visada) na ocorrência e distribuição espacial do *sunlint* nas imagens SpectTIR;
- IV. Avaliar os efeitos de *sunlint* na estimativa dos COAs da água do reservatório, considerando a geometria de aquisição dos dados hiperespectrais do SpectTIR;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo de ambientes aquáticos

Os sistemas sensores são capazes de registrar o fluxo radiante em vários comprimentos de onda selecionados nos domínios do visível (VIS), infravermelho próximo (IVP) e infravermelho médio ou de ondas curtas (SWIR) do espectro eletromagnético. As origens dos fluxos de radiação que atingem o sensor podem ser intrínsecas, de acordo com as características físicas, químicas e biológicas, carregando assim informações sobre os alvos. Quando extrínsecas ao objeto de estudo afetam o nível de energia quantificada e se traduzem em ruído na imagem final. No caso de sistemas aquáticos, a diferenciação destas componentes radiativas é ainda mais importante, pois a energia proveniente dos sistemas aquáticos é relativamente baixa (KIRK, 2011). A radiação que atinge o sensor possui componentes originárias do espalhamento pela atmosfera, da reflexão especular, da radiação de fundo, no caso de ambientes rasos, e do fluxo de radiação emergente da coluna de água (Figura 2.1). Se o objetivo do estudo for avaliar a qualidade da água, por exemplo, o feixe de luz de interesse é o que penetra no corpo de água e interage com os COAs. Por outro lado, se o objetivo for estudos batimétricos ou bentônicos, o sinal de interesse é o que interage com o fundo do corpo de água e os demais sinais devem ser removidos. A influência dos fluxos de radiação pode ser maior ou menor, dependendo das condições físicas no momento da detecção da radiância (L) pelo sensor (por exemplo, elevação solar e atmosfera). Os diferentes fluxos de radiação são descritos a seguir.

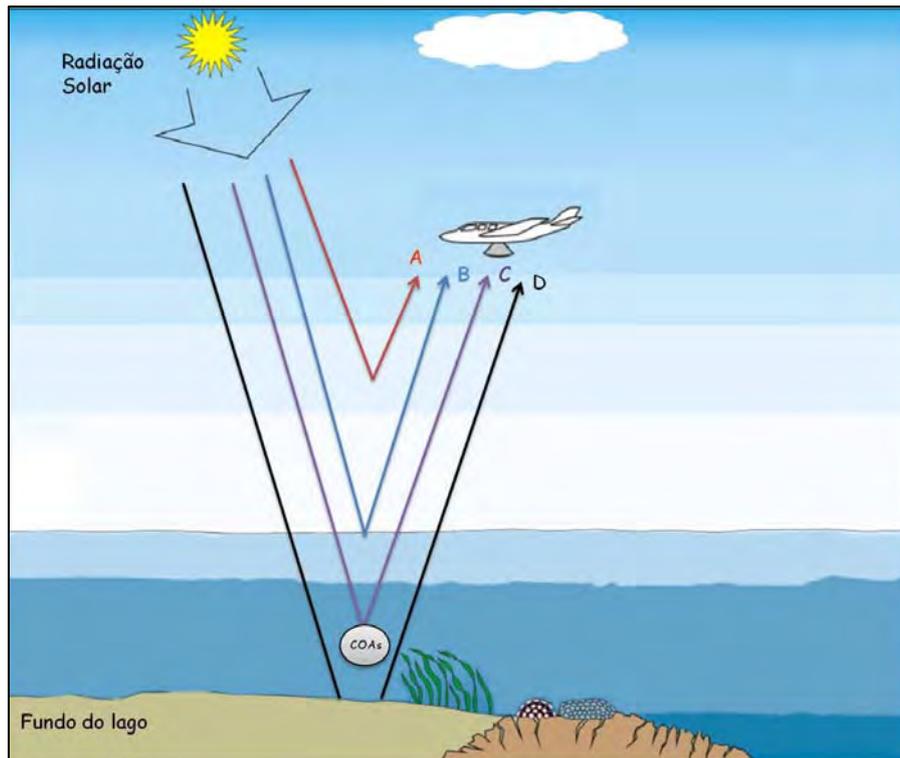


Figura 2.1- Fatores que influenciam o sinal capturado pelo sensor: A) espalhamento pela atmosfera (radiação difusa); B) reflexão especular da água; C) espalhamento pelos COAs; D) espalhamento pelo fundo do lago.

Fonte: Modificado de Dekker et al. (2012).

A) Espalhamento pela atmosfera – ocasionado pelo espalhamento simples ou múltiplo das moléculas de ar e por aerossóis atmosféricos.

B) Reflexão especular da água (*sunlint*) – a superfície da água apresenta propriedades especulares, as quais estão relacionadas às características físicas da interface água-ar. Provocam a reflexão do fluxo radiante incidente, de tal maneira que este fluxo (ou pelo menos uma parcela) não consegue penetrar além do primeiro milímetro da coluna d'água. Dependendo do posicionamento entre o sensor, a superfície da água e o Sol, a reflexão da luz pode atingir diretamente o sistema óptico do sensor, ocasionando o *sunlint*. O *sunlint* pode dominar os demais fluxos de radiação e prejudicar a verificação das características ópticas do sistema aquático (KAY et al., 2009).

C) Espalhamento pelos COAs da água – é a componente da radiação que penetra no corpo de água e interage com a água e seus COAs, cuja natureza é modificada em decorrência desta interação.

Em sensoriamento remoto de ambientes aquáticos, considera-se a divisão de dois tipos de águas, conforme sugerido por Morel e Prieur (1977). Águas oceânicas, que são opticamente simples, são classificadas como “águas do Caso 1”. A variabilidade nas características ópticas da coluna de água é influenciada pelo fitoplâncton e seus produtos de degradação e os demais constituintes covariam em relação ao fitoplâncton. As águas continentais e estuarinas, classificadas como “águas do Caso 2”, são consideradas opticamente complexas e são caracterizadas pela sobreposição da absorção e do espalhamento espectral dos diferentes COAs da coluna de água.

D) Reflexão de fundo – radiação que penetra na coluna de água e interage com as feições bênticas. A influência da reflectância do fundo é mais pronunciada em águas rasas e claras e ocorrerá conforme as propriedades espectrais do material do fundo.

2.2. Constituintes opticamente ativos da água (COAs)

São quatro os constituintes de águas naturais que interagem com a radiação eletromagnética, alterando o espectro de reflectância: as próprias moléculas de água, a matéria orgânica dissolvida (*coloured dissolved organic matter* - CDOM), o fitoplâncton e os sólidos totais em suspensão (TSS). Em geral, a variação nas concentrações dos COAs regulará a intensidade de radiação refletida pela coluna de água e a magnitude das feições espectrais produzidas (KIRK, 2011), definindo assim a forma final da curva da resposta espectral do corpo de água.

2.2.1. Água pura

A água pura absorve pouca radiação nas regiões do azul e do verde do espectro eletromagnético, absorvendo mais intensamente na região do vermelho e do infravermelho próximo em diante (KIRK, 2011). Já o espalhamento comporta-se de maneira contrária a absorção. É máximo na região do azul e decresce exponencialmente em direção ao infravermelho (Figura 2.2). A transmitância na região do visível é alta, o que contribui para o alto coeficiente de atenuação e para o baixo sinal de reflectância (WOODRUFF et al., 1999; BARBOSA, 2005).

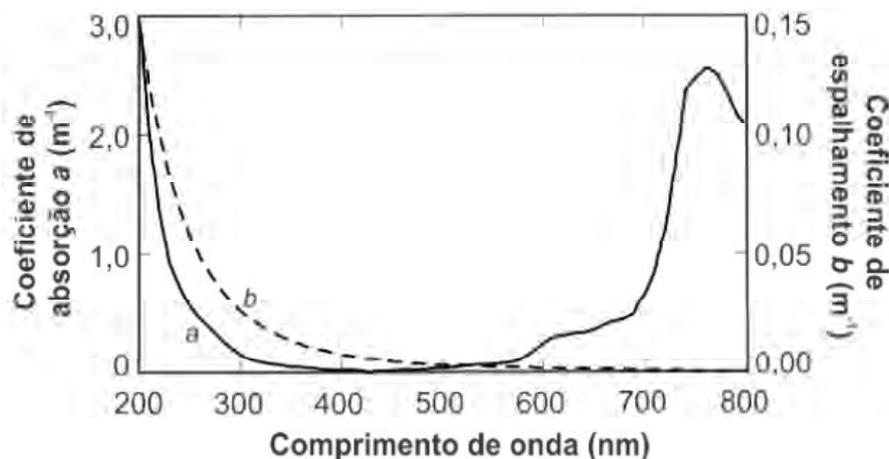


Figura 2.2 - Espectro de absorção (a) e espalhamento (b) da água oceânica.

Fonte: Adaptada de Mobley (1994).

2.2.2. Matéria orgânica dissolvida (CDOM)

Matéria orgânica dissolvida é um termo utilizado para uma vasta gama de compostos orgânicos complexos dissolvidos nas águas naturais. Estes compostos podem ter origem autóctone, resultantes dos processos de degradação de partículas orgânicas, ou podem ser provenientes de fontes alóctones, sendo a vegetação ripária a principal fonte de suprimento, associadas às atividades humanas, agricultura, esgotos, etc. O CDOM é de extrema importância para a estrutura e funcionamento dos ecossistemas aquáticos, por absorver eficientemente os comprimentos de onda curtos, protegendo a biota de danos induzidos por radiação UV-B (KUTSER, et al., 2005).

A concentração de CDOM afeta as propriedades ópticas de corpos de água, acarretando impactos diretos na magnitude e na distribuição espectral da luz na coluna de água (ZHAO et al., 2009). Estes compostos frequentemente apresentam coloração amarelada devido ao elevado coeficiente de absorção da luz na região do azul (400 a 500 nm), reduzindo exponencialmente no sentido dos comprimentos de onda mais longos (IOCCG, 2000). O coeficiente de absorção varia notavelmente entre os diferentes ecossistemas límnicos, uma vez que a variabilidade no decaimento da curva exponencial depende da composição do CDOM (MOBLEY, 1994). De acordo com Chen et al. (2004), a absorção pode diminuir consideravelmente a quantidade de radiação

fotossinteticamente ativa (*Photosynthetically Active Radiation*, PAR) disponível para o fitoplâncton, além de introduzir erros no estudo de águas naturais por sensoriamento remoto por modificar a cor da água. O comportamento espectral da água com matéria orgânica dissolvida foi estudado por diversos autores, dentre os quais Mantovani e Novo (1996), Kutser (2005), Morel e Gentili (2009) e Giardino et al. (2010).

2.2.3. Sólidos totais em suspensão (TSS)

Os sólidos totais em suspensão causam o assoreamento de lagos e represas, bem como servem como fonte de entrada de nutrientes, favorecendo a ocorrência de processos de eutrofização. O TSS consiste na soma das frações da matéria orgânica (TSO) e da matéria inorgânica (TSI) em suspensão na água. Os TSS são relativamente fáceis de detecção por sensoriamento remoto, devido ao intenso espalhamento da radiação incidente (LIU et al., 2003). De acordo com KIRK (2011), as propriedades de absorção dos TSS têm recebido menos atenção, frente às dificuldades de aquisição deste parâmetro. O autor elucida que em concentrações típicas, os sólidos totais em suspensão não apresentam forte absorção da radiação incidente, ao contrário, espalham intensamente.

Os TSI dominam o sinal retroespalhado pelos constituintes em suspensão na água, pois apresentam um índice de refração muitas vezes maior que o das partículas orgânicas (MOBLEY, 1994). Quando presente, o TSS produz um aumento da reflectância na região do visível e do IVP. O aumento na concentração de sedimentos ocasiona o deslocamento do pico de reflectância para comprimentos de ondas maiores. A porcentagem de energia refletida na região entre 570 e 700 nm aumenta com o aumento da concentração de sedimentos suspensos na água e apresenta também uma elevação do sinal em 810 nm (GOODIN et al., 1993; LODHI et al., 1997).

2.2.4. Fitoplâncton

O fitoplâncton é composto por um conjunto de organismos aquáticos microscópicos que vivem toda ou parte de sua vida em suspensão na coluna de água (REYNOLDS, 2006). Estes organismos são capazes de converter

matéria inorgânica em orgânica por meio da fotossíntese. Este mecanismo fisiológico ocorre devido à presença dos pigmentos fotossinteticamente ativos, moléculas capazes de captar energia eletromagnética no intervalo compreendido entre 400 e 700 nm (KIRK, 2011). Como os pigmentos estão presentes em diferentes proporções nos vários grupos fitoplanctônicos (WEAVER e WRIGLEY, 1994; TORRECILLA et al., 2011), ao absorverem a energia eletromagnética, acabam por promover feições espectrais específicas no espectro de reflectância. Devido a essa interação dos pigmentos com a radiação, a discriminação e quantificação das comunidades fitoplanctônicas pode ser realizada pelo sensoriamento remoto de alta resolução espectral. De modo geral, os pigmentos que atuam na fotossíntese provocam a diminuição da reflectância na faixa do azul (400-515 nm) e o aumento na faixa do verde (515-600 nm). O aumento de reflectância no verde é atribuído ao fato de ocorrer um processo de espalhamento interno nas células do fitoplâncton (WEAVER E WRIGLEY, 1994; KIRK, 2011). De fato, essas algas são partículas refratoras, provocando o aumento do espalhamento também em comprimentos de onda do IVP (700-900 nm).

2.3. Sensoriamento remoto aerotransportado

Devido à possibilidade de ajuste de suas resoluções espaciais, radiométricas e temporais, o sensoriamento remoto aerotransportado proporciona certas vantagens sobre o sensoriamento remoto orbital, no que se refere ao monitoramento de águas interiores, estuarinas e costeiras (MOSES et al., 2012; KUTSER et al., 2009). Os sensores orbitais com características espectrais mais adequadas para ambientes aquáticos são desenvolvidos para oceanos, com resoluções espaciais que não são compatíveis com as dimensões da maioria dos lagos e reservatórios, o que dificulta a extração de pixels puros de água e, com isso, a caracterização da qualidade da água por estes sensores. Esse problema pode ser facilmente contornável com o uso de sensoriamento remoto aerotransportado, uma vez que o campo de visada instantâneo projetado no terreno (*ground instantaneous field of view* - GIFOV) de tais sensores pode ser adaptado à escala de trabalho, respeitando as limitações operacionais da aeronave impostas pela altitude de voo. Apesar de os sensores orbitais com resolução espacial refinada estarem atualmente em

operação, como IKONOS e WorldView, estes apresentam o GIFOV fixo e não possuem a resolução espectral e a sensibilidade apropriada para avaliar e distinguir pigmentos fotossintetizantes em águas opticamente complexas (KUTSER et al., 2006; MOSES et al., 2012).

Além da possibilidade de configurar a resolução espacial à escala de trabalho, a maioria dos sensores aerotransportados também permite que o número, a localização e a largura das bandas espectrais sejam ajustáveis (BERTELS et al., 2008; MOSES et al., 2012). Tal peculiaridade é importante para a caracterização de águas do Caso 2, como elucidado no trabalho de Dekker e Petters (1993), onde os autores demonstraram que sensores com bandas largas não são capazes de discriminar clorofila-a de sólidos totais em suspensão. Segundo os mesmos, a baixa resolução espectral não permitiu o desenvolvimento de abordagens analíticas eficazes na estimativa dos COAs da água. Kutser et al. (2006) mostraram que sensores multiespectrais, como o *Advanced Land Imager (ALI) /Earth Observing-One (EO-1)*, o *Thematic Mapper (TM)/Landsat* ou o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)/Terra*, não são capazes de separar águas dominadas por cianobactérias de águas dominadas por outros grupos de algas. Isso porque, a configuração espectral das bandas destes sensores não permite detectar feições de absorção causadas pelas ficocianinas.

A maioria dos sensores que operam adquirindo imagens hiperespectrais são aerotransportados (Tabela 2.1). Isso ocorre porque as limitações tecnológicas na obtenção de tais dados em aeronaves são menores que as impostas aos sensores orbitais. O termo imageamento hiperespectral define-se como a aquisição de imagens em centenas de bandas contíguas e registradas, de modo que para cada pixel da imagem, um espectro de radiância pode ser derivado (GOETZ, 2009). Nesse sentido, a disponibilidade de dados hiperespectrais proporciona a viabilidade de estudos mais específicos, como os que almejam avaliar a diversidade e distribuição da comunidade fitoplanctônica. Metsamaa et al. (2006) destacaram que sensores remotos, com largura espectral de bandas de 10 nm (ou menos) e com relação sinal ruído de 1000:1, são adequados para a discriminação e mapeamento de espécies de cianobactérias. Hunter et al. (2008) demonstraram que a resolução espectral

do sensor tem um significativo impacto na capacidade de discriminar comunidades heterogêneas de fitoplâncton, mesmo quando misturadas a sedimentos em suspensão, desde que estejam combinadas a altos teores de clorofila-a. Hunter et al. (2010), a partir de dados dos sensores hiperespectrais aerotransportados CASI-2 e AISA Eagle, estimaram e mapearam as concentrações de clorofila-a e ficocianina em águas do Caso 2 dominadas por fitoplâncton, obtendo bons resultados na identificação dos *patches* de cianobactérias. Outras aplicações de sensores hiperespectrais aerotransportados incluem o mapeamento de recife de corais (KUTSER et al., 2003; BERTELS et al., 2008) e de macroalgas (O'NEILL et al., 2011), a extração de feições bênticas (JUPP et al., 1996) e batimétricas (HEEDGE et al., 2007; GOODMAN et al., 2008;).

Tabela 2.1 - Exemplos de sensores hiperespectrais aerotransportados comumente utilizados em estudos voltados a caracterização de águas do Caso 2. **RE:** resolução espectral; **LB:** largura de banda; **NB:** número de bandas; **NBits:** número de bits; **FOV:** Campo de visada - *Field of View*.

Sensor	Tecnologia	RE (nm)	LB (nm)	NB	N bits	FOV	Aplicações
AISA	pushbroom	400 - 970	2,9	até 256	12	39,7°	mapeamento de algas macroscópicas
AVIRIS	Wiskibroom	375 - 2500	10	224	12	30°	Batimetria, avaliação da cor da água
CASI	CCD	400-1050	2,2	até 288	14	40,5°	Batimetria, mapeamento de recife de corais, avaliação do teor de clorofila e ficocianinas; mapeamento de algas macroscópicas
HyMap	Wiskibroom	450-2500	15	126	16	61,3°	Batimetria, mapeamento de recife de corais
ProSpectTIR - VS	CCD	400-2500	5	357	12	24°	Avaliação do teor de Clorofila-a-

Outra vantagem é o ajuste da revisita do sensor aerotransportado na área de estudo, de acordo com a necessidade de avaliação (BERTELS et al., 2008).

Eventos de *blooms* nocivos de cianobactérias tóxicas são altamente dinâmicos, podendo se modificar rapidamente no espaço e no tempo, de acordo com a velocidade e direção do vento (HUNTER et al., 2010). Assim, observações em estações de coleta fixas ou ao longo de transectos, podem não ser representativas da distribuição e abundância dos *patches* de algas no corpo de água. Observações sinópticas proporcionadas por sensoriamento remoto permitem avaliar e estimar tais fenômenos. Porém, o ciclo de revisita da maioria dos sensores orbitais é muito longo para estas avaliações (MOSES et al., 2012). De acordo com Keith et al. (2012), uma alternativa é o uso de sensores remotos aerotransportados, os quais oferecem a aquisição rápida de informações referentes à resposta do ecossistema frente às mudanças ambientais, vindo ao encontro com a necessidade das agências de monitoramento. Ressalta-se também que o controle do horário de aquisição dos dados permite selecionar o horário mais adequado para estudar um fenômeno específico e ajuda a mitigar as condições climáticas adversas, como a cobertura de nuvens e neblina, que muitas vezes dificultam a coleta de dados confiáveis de sensores orbitais (MYERS e MILLER, 2005; MOSES et al., 2012). Além disso, ter a data e o horário que será realizado o imageamento, permite planejar um levantamento de dados de campo concomitante ao sobrevoo do sensor, a fim de coletar dados para validação e desenvolvimento de algoritmos.

Por outro lado, o sensoriamento remoto aerotransportado apresenta algumas desvantagens no monitoramento de rotina. A cobertura geográfica limitada de cada linha de voo e os altos custos relativos envolvidos na obtenção destes dados são exemplos destas dificuldades (MYERS e MILLER, 2005; BERTELS et al., 2008). Além do mais, coletar dados hiperespectrais sobre ambientes aquáticos é uma tarefa complexa, devido ao baixo sinal oriundo dos corpos de água. Nesse sentido, vários fatores devem ser considerados quando se planeja uma missão, para que as imagens sejam coletadas de maneira adequada a atingir os objetivos do estudo. Uma revisão sobre tópicos importantes no planejamento de uma missão com sensores aerotransportados foi feita por Myers e Miller (2005), visando à obtenção de uma boa relação custo/benefício para a caracterização de ambientes límnicos e costeiros.

2.4. Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional

A radiância espectral que deixa a água e atinge o sensor é função das propriedades ópticas da água, porém depende também do ângulo zenital solar (AZS) e da direção de observação. Esta dependência é regida pela Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional (*Bidirectional reflectance distribution function* - BRDF). As diferentes configurações de visada influenciam no registro da radiação eletromagnética captada pelos sensores remotos, devido ao fato de que muitos alvos na superfície terrestre apresentam variado grau de anisotropia (MOURA, 2012). A existência de estruturas em um alvo pode modular as interações com a radiação eletromagnética incidente, conseqüentemente, esta radiação pode ser refletida mais fortemente em algumas direções do que em outras (LIESENBERG, 2005) (Figura 2.3).

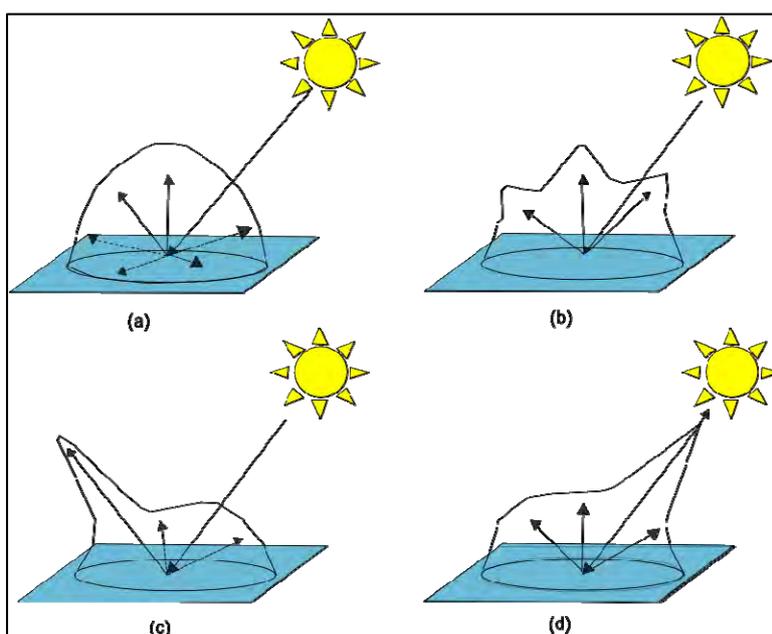


Figura 2.3 – Reflectância de quatro superfícies: (a) superfície Lambertiana; (b) não Lambertiana (direcional); (c) espalhamento frontal ou reflexão especular; (d) retroespalhamento.

FONTE: Modificado de Liesenberg (2005).

Em alvos anisotrópicos, a BRDF permite identificar picos de reflectância, máximos e mínimos, conhecidos como *hot spot* e *cold spot*, respectivamente. Estes termos são usualmente utilizados para estudos envolvendo vegetação, onde o *hot spot* encontra-se na direção de retroespalhamento da luz. Já para

ambientes aquáticos, os maiores valores de reflectância são na direção de espalhamento frontal, o qual adiciona um importante componente da radiação que atinge o sensor. Tanto para alvos terrestres quanto aquáticos, o *hot spot* pode ser identificado em imagens onde o sensor encontra-se ao nadir, quando o ângulo de visada instantâneo é próximo ao AZS (LIESENBERG, 2005). Quando a luz é registrada pelos sensores, cada pixel da imagem é associado a uma diferente geometria de iluminação e visada. Ao realizar a varredura ao longo do seu Campo de Visada (*Field of View* - FOV), o sensor imageador apresenta diferentes ângulos zenitais de visada instantâneos (AZVI) em relação à superfície. Ao nadir, o AZVI é zero, mas à medida que a visada se afasta lateralmente do centro da faixa em direção às bordas, o ângulo aumenta progressivamente, para ambos os lados, até o valor da metade do FOV. Em decorrência desse apontamento instantâneo, a imagem poderá apresentar nítida diferença de brilho entre uma e outra extremidade (Figura 2.4), especialmente para sensores com campo de visada amplo, dependendo da orientação da iluminação em relação ao eixo de deslocamento do sensor (MOREIRA, 2008).

Sensores aerotransportados geralmente têm ângulo de visada superior à 20° do nadir, como o caso do SpecTIR, que varia 24° para cada lado da vertical. Nesse caso é esperada a ocorrência de situações específicas de alvos que, devido à forma, aparecerão mais brilhantes na borda do que no centro de uma determinada imagem. Isso porque, em geral, a BRDF de alvos anisotrópicos apresenta maiores valores nas proximidades do ângulo de iluminação, no efeito de retroespalhamento, decrescendo nos maiores zênites de observação (MOREIRA, 2008).

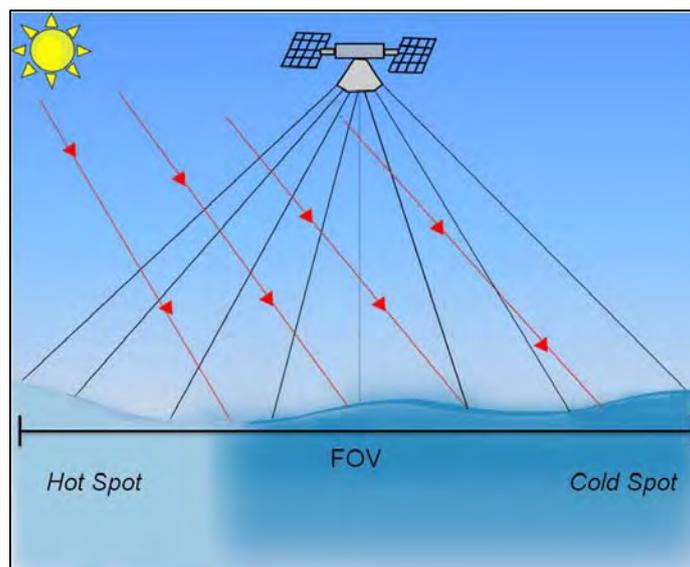


Figura 2.4 – Diferenças na porção de sombreamento dos alvos com a variação da visada do sensor ao longo do seu campo de visada (FOV).

Fonte: Modificado de Jackson et al. (1979)

Ao considerar a configuração geométrica Sol-sensor-alvo, o registro da radiação eletromagnética pelo sensor remoto estará condicionado a fatores associados à densidade e ao arranjo dos objetos na superfície, às sombras determinadas pelos ângulos de iluminação e de observação e às propriedades da reflectância, da transmitância e da absorvância dos alvos (LIESENBERG, 2005). A presença dos COAs da água que espalham a radiação em comprimentos de onda selecionados e a presença de vento, que ocasiona a formação de ondas, caracterizam os corpos de água como alvos anisotrópicos (SU et al., 2000; GATEBE et al., 2005; GLEASON et al., 2012). A anisotropia da superfície da água tem consequências práticas para a interpretação do sinal detectado por sensores remotos, afetando a qualidade dos produtos gerados (p. ex., imagens cor do oceano) e a obtenção de dados de aerossóis (GATEBE et al., 2005).

2.4.1. Sunlint

A BRDF tem como um efeito direto redistribuir o brilho solar, de maneira desigual, em uma variedade de ângulos. A partir de um determinado ângulo, a luz do sol é refletida diretamente pela superfície da água, sem interagir com a coluna de água. Quando essa componente da radiação atinge o FOV do

sensor, passa a ser chamada como *sunlint*, sendo que os sensores ópticos podem ser bastante afetados por esse fenômeno. De acordo com Myers e Miller (2005), em algumas condições este efeito pode ser o fator mais importante a ser evitado no planejamento de um sobrevoo. O *sunlint* ocorre na imagem quando a orientação da superfície da água é tal que a luz do sol é refletida diretamente na direção do sensor, sendo uma função da rugosidade da superfície da água, da posição do sol e do ângulo de visada do sensor (KAY et al., 2009) (Figura 2.5). O *sunlint*, contudo tem seus efeitos mais pronunciados quando as condições para observações por sensores remotos são mais eficazes (céu claro) e quando as imagens são coletadas com uma resolução espacial mais refinada (HEDLEY et al., 2005). O *sunlint* constitui um componente da radiação que chega até o sensor que não interage com os COAs, apresentando uma intensidade de sinal muito maior que o sinal retroespalhado pela água. Segundo Kay et al. (2009), o efeito de *sunlint* pode aumentar em duas ou mais vezes o valor do sinal refletido. Este aumento nos valores de reflectância pode acarretar saturação de brilho do pixel e dificultar a obtenção de informações referentes ao teor de clorofila, feições bentônicas e batimétricas, demandando que o sensor utilizado possua um alto limiar máximo de radiância registrada, para que possa ser útil para este tipo de estudo.

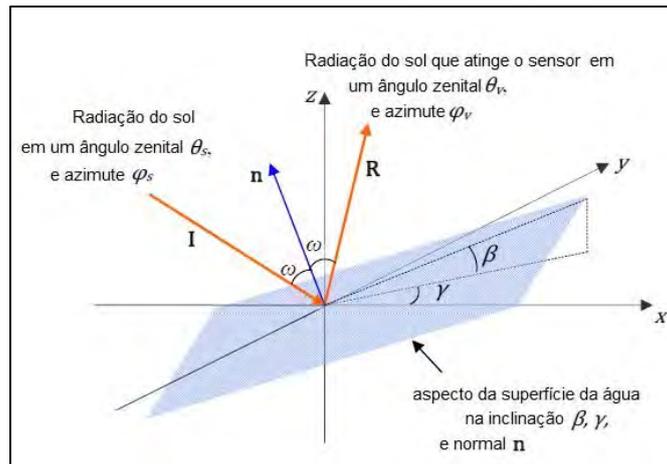


Figura 2.5 - Geometria do *sunlint*. A luz do sol, ao longo do vetor I, é refletida pela da superfície da água para o satélite na direção R. A normal à superfície da água é n. x, y e z formam um sistema de eixos, com o eixo z verticalmente para cima a partir da posição média da superfície do corpo de água. A escolha da direção x é arbitrária, neste caso, x é o vento. Os ângulos zenitais são medidos a partir do eixo z, enquanto os ângulos azimutais são medidos no sentido horário do eixo x, no plano x-y. A inclinação mais acentuada da face da superfície da água é β , em azimute γ .

Fonte: Modificado de Kay et al. (2009).

A dependência da reflectância (luz não polarizada) em relação ao AZS é dada pela reflexão de Fresnel (KIRK, 2011):

$$r = \frac{1}{2} \frac{\sin^2(\theta_a - \theta_w)}{\sin^2(\theta_a + \theta_w)} + \frac{1}{2} \frac{\tan^2(\theta_a - \theta_w)}{\tan^2(\theta_a + \theta_w)} \quad (1)$$

Onde, r é a reflectância; θ_a é o ângulo de incidência da luz no ar; θ_w é o ângulo de incidência do feixe de luz vertical descendente transmitido na água.

A reflexão de Fresnel é condicionada ao índice de refração da água. O índice de refração da água é adimensional e fracamente dependente do comprimento de onda na faixa espectral do visível, variando entre 1,3431, em 400 nm, até 1,3301, em 700 nm, a 20°C, para águas interiores (MOBLEY, 1994). Esta característica faz com que o *sunlint* não apresente uma curva espectral distinta e seja dependente dos ângulos de incidência da luz. A proporção de luz incidente que é refletida pela superfície lisa da água aumenta 2%, para os raios incidentes ao zênite, até 100% de reflectância, conforme aumenta o ângulo de incidência (Figura 2.6). Pode-se notar que a reflectância permanece baixa até

60° de ângulo zenital, aumentando rapidamente em ângulos zenitais maiores. Na figura 2.6, as três curvas mais baixas mostram o efeito do vento, em três velocidades diferentes, sobre a reflectância. Observa-se que, em ângulos zenitais baixos, a rugosidade da água causada pelo vento tem pouco efeito nos valores refletidos. No entanto, com baixa elevação solar, a reflectância é significativamente reduzida pela maior velocidade do vento, uma vez que a rugosidade da superfície da água aumenta o ângulo entre a direção da luz e o seu ponto de entrada na água (KIRK, 2011).

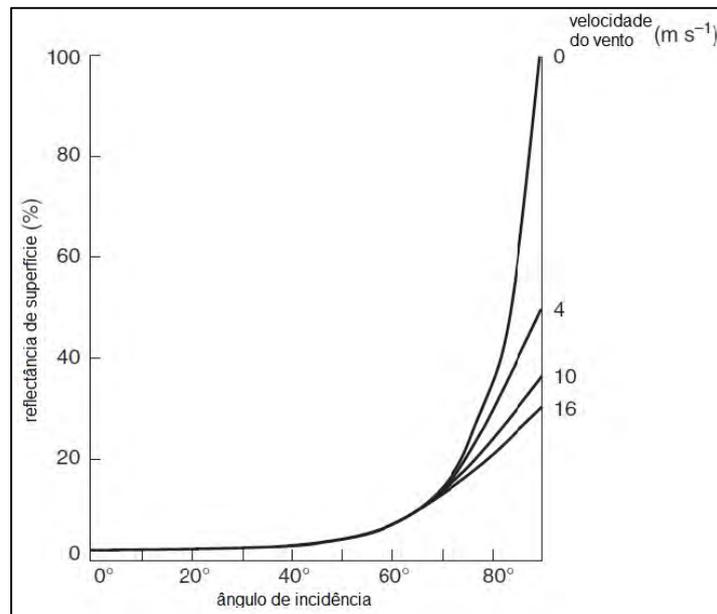


Figura 2.6 - Reflectância da superfície da água em função do ângulo zenital de incidência, com diferentes velocidades de vento.

Fonte: Modificado de Kirk (2011).

Com base em suas propriedades físicas, os efeitos de *sun glint* podem ser minimizados. No caso de sensores aerotransportados, otimiza-se o plano de voo, de modo que o sensor voe na direção do sol ou na direção contrária ao sol (MUSTARD et al., 2001), mantendo o ângulo zenital solar entre 30° e 60° (DEKKER et al., 2001) e a direção de voo em até 10° de azimute relativo (MYERS e MILLER, 2005). No entanto, estas recomendações nem sempre podem ser seguidas, devido ao tamanho e ao padrão espacial dos corpos de água. As formas sinuosas e irregulares de rios, lagos e represas constituem um grande desafio ao planejamento da aquisição de imagens por sensores de campo de visada estreito, uma vez que diferentes geometrias de aquisição são

necessárias para imagear toda a área. Em estudos batimétricos, por exemplo, as linhas de voo são determinadas pelos dados de batimetria e o *sun glint* se torna uma feição recorrente em imagens usadas para esse fim (PHILLIPOT, 2007). Em tais casos, estes efeitos tornam-se um fator degradante nas imagens, interferindo na precisão da estimativa das características ópticas das massas de água a partir dos dados detectados remotamente. Em vista disso, é importante reconhecer e remover o *sun glint* das imagens de sensoriamento remoto.

Na área da imagem afetada por *sun glint*, a superfície lisa da água se torna um espelho prateado, na direção *cross-track* de imageamento, enquanto a superfície mais rugosa da água aparece mais escura (Figura 2.6). Existem três situações em que o *sun glint* pode ocorrer: ao longo de um trecho em imagens de cor do oceano (com amplo campo de visada) (Figura 2.6 A), por ondas individuais em imagens de alta resolução espacial, e na direção *cross-track* de imageamento em sensores aerotransportados (Figura 2.6 B) (KAY, 2011). O *sun glint* induzido por ondas ocorre quando a orientação da superfície introduz reflexões causadas pela ondulação da superfície da água. O *cross-track glint* ocorre devido ao movimento do sensor em relação à posição da fonte de iluminação (MILLER, 2012). Diversos métodos têm sido desenvolvidos para correção de *sun glint* em imagens oceânicas de resolução espacial grosseira (WANG e BAYLEY, 2001; WANG, 2007) e em imagens de águas do Caso 2 com resolução espacial refinada (HOCHBERG et al., 2003; HEDLEY et al., 2005; LYZENGA, 2006; PHILLIPOT, 2007; GOODMAN et al., 2008; KUTSER et al., 2009). Em ambos os casos, o princípio é estimar a contribuição do *sun glint* à radiação que chega ao sensor e, em seguida, subtraí-la do sinal recebido.

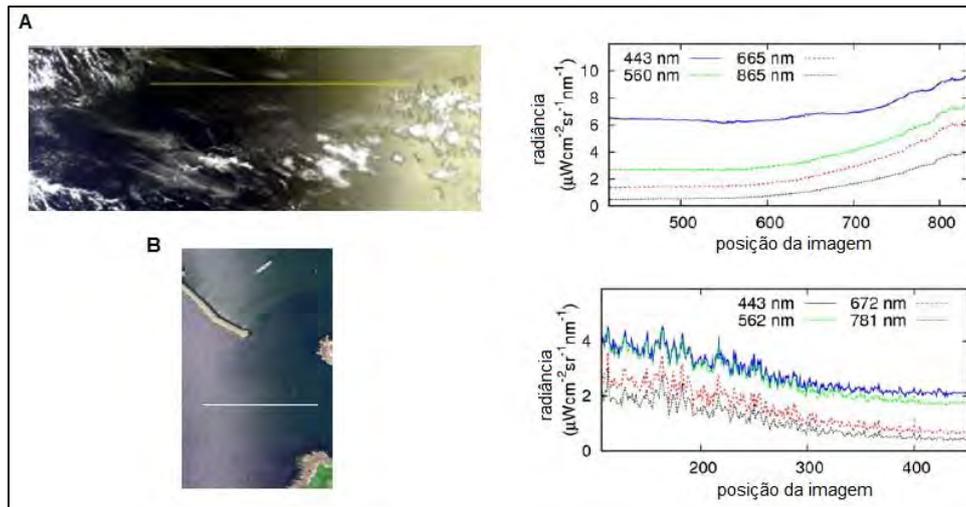


Figura 2.7- Imagens ópticas, de baixa e alta resolução espacial, afetadas por *sun glint*.

A) Recorte de uma imagem MERIS do Oceano Pacífico, mostrando a área afetada por *sun glint* do lado direito e a radiância em quatro bandas do sensor ao longo da linha marcada na imagem. **B)** *Cross-track glint* em uma imagem CASI de Plymouth Sound (UK), mostrando a área afetada por *sun glint* no lado esquerdo e a radiância em quatro bandas do sensor ao longo da linha marcada na imagem.

FONTE: Modificado de Kay et al. (2009).

2.4.1.1. Métodos de remoção de *sun glint*

Várias abordagens têm sido sugeridas para a identificação e remoção do *sun glint*, a fim de isolar o sinal que contém informações sobre a coluna de água e feições bênticas. Tais métodos podem ser divididos em duas categorias principais (KAY et al., 2009). A primeira categoria engloba os métodos utilizados em imagens de oceano, com resoluções na escala de 100-1000 m. Estes métodos são baseados em modelos estatísticos da superfície do mar, os quais são utilizados para calcular a probabilidade da superfície da água estar orientada em uma direção que acarrete *sun glint*, levando em conta a velocidade e direção do vento e a posição do Sol e do sensor (COX e MUNK, 1954). São utilizados em uma série de instrumentos operacionais de cor do oceano, como MODIS, o *MEdium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS) e o *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS). No entanto, estes métodos só podem corrigir situações com *sun glint* moderado e grandes erros permanecem nas áreas mais afetadas (WANG e BAYLEY, 2001).

As previsões de *sunlint*, baseadas na probabilidade de distribuição das ondas na superfície da água, são razoáveis em uma escala de 100-1000 m, mas se tornam menos precisas em imagens com resoluções espaciais de 1-10 m. Nestes casos, não se pode supor que o tamanho do pixel é maior que as feições da superfície da água. Portanto, as suposições estatísticas sobre a composição das facetas da superfície da água não são adequadas (KAY, 2011).

Nesse sentido, o segundo conjunto de métodos abrange os algoritmos de remoção de *sunlint* em imagens de alta resolução espacial, os quais utilizam dados do infravermelho próximo para estimar a quantidade de sinal proveniente de efeitos *sunlint* no sinal recebido pelo sensor (KAY et al., 2009, KAY, 2011; CASAL et al., 2011). Tais métodos baseiam-se no pressuposto de que o sinal que deixa a água nesta região do espectro é desprezível e, por isso, qualquer sinal restante após a correção atmosférica pode ser atribuído ao *sunlint*. Os algoritmos mais comumente empregados utilizam o espectro de regiões mais profundas do corpo de água (pixels mais escuros devido à absorção da radiação na região do infravermelho próximo), o qual é analisado na imagem e usado para estabelecer uma relação linear entre o IVP e a reflectância oriunda do *sunlint* (HOCHBERG et al., 2003; HEDLEY et al., 2005; LYZENGA et al., 2006).

A relação linear entre radiancias do *sunlint* do VIS e do IVP tem a sua base física no índice de refração de água, que é (quase) o mesmo em comprimentos de onda do VIS e IVP (MOBLEY, 1994). É importante salientar, entretanto, que nem sempre é possível assumir que a reflectância do IVP é insignificante, uma vez que esta pode ser afetada pela reflectância de fundo, concentração de partículas inorgânicas em suspensão e pelo espalhamento das células fitoplanctônicas. Nestes casos, os métodos desenvolvidos por Hochberg et al. (2003) e Hedley et al. (2005) corrigem excessivamente o sinal, eliminando não só o *sunlint*, mas também as informações referentes as propriedades dos corpos de água (GOODMAN et al, 2008, KUTSER et al, 2009). De acordo com Kay et al. (2009), outra limitação desses métodos, é o pressuposto de que a relação entre os comprimentos de onda do VIS e do IVP, observados em regiões de águas profundas, são as mesmas para toda a imagem, o que pode

não ser verdade se as propriedades atmosféricas não forem uniformes. Além disso, estes métodos foram desenvolvidos para imagens multiespectrais e não são facilmente adaptáveis ao uso operacional em dados hiperespectrais (MILLER, 2012).

Métodos alternativos de correção de *sunglint* em imagens hiperespectrais de alta resolução espacial foram desenvolvidos por Goodman *et al.* (2008) e Kutser *et al.* (2009). O método de Kutser *et al.* (2009) se baseia na banda de absorção do oxigênio, em 763nm. De acordo com os autores, se a correção atmosférica aplicada for eficiente, a reflectância nessa região do espectro deve ser zero e qualquer sinal remanescente pode ser atribuído aos efeitos de *sunglint*. Apesar dos bons resultados apresentados, este método é bastante sensível aos procedimentos de correção atmosférica, os quais podem gerar feições espúrias nessa região do espectro.

O método desenvolvido por Goodman *et al.* (2008) baseia-se no modelo de Lee *et al.* (1999) e assume que a reflectância em 750 nm deve se aproximar de zero, permitindo, no entanto, que existam valores maiores que zero nessa região do espectro. Para isso, os autores desenvolveram equações nas quais coeficientes constantes são adicionados a cada comprimento de onda e os valores de reflectância em 750 nm variam em função do sinal observado na região de 640 nm. De acordo com os autores, os coeficientes são independentes do sensor e, portanto, são igualmente aplicáveis a qualquer sensor que tenha bandas situadas em 750 nm e 640 nm, em qualquer conjunto de dados. Lee *et al.* (2012) aplicaram com sucesso o método de Goodman *et al.* (2008) na remoção de *sunglint* em imagens multiespectrais do WorldView-2. Este método também permite a correção do *sunglint* sob situações de variações transversais ao longo da cena (*cross-scene*), uma vez que cada pixel é corrigido de forma independente (KAY *et al.*, 2009), mas aplica-se a mesma correção para cada comprimento de onda, assumindo que o *sunglint* é espectralmente constante.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos sequenciais realizados no presente trabalho são apresentados no fluxograma da Figura 3.1. Cada etapa será discutida nas seções subsequentes, cuja numeração é apresentada abaixo. A seção 3.1 refere-se à área de estudo selecionada; a seção 3.2 refere-se ao delineamento experimental para a aquisição das imagens hiperespectrais e para a coleta de dados em campo; a seção 3.3 apresenta os procedimentos de pré-processamento das imagens SpectIR; a seção 3.4 apresenta como o *sunlint* foi identificado e caracterizado nas imagens hiperespectrais; a seção 3.5 descreve os métodos utilizados na remoção do *sunlint*. Por fim, as seções 3.6 e 3.7 apresentam a metodologia utilizada para a análise dos efeitos da geometria de iluminação e visada sobre a distribuição espacial do *sunlint* e sobre os impactos causados na caracterização dos COAs da água.

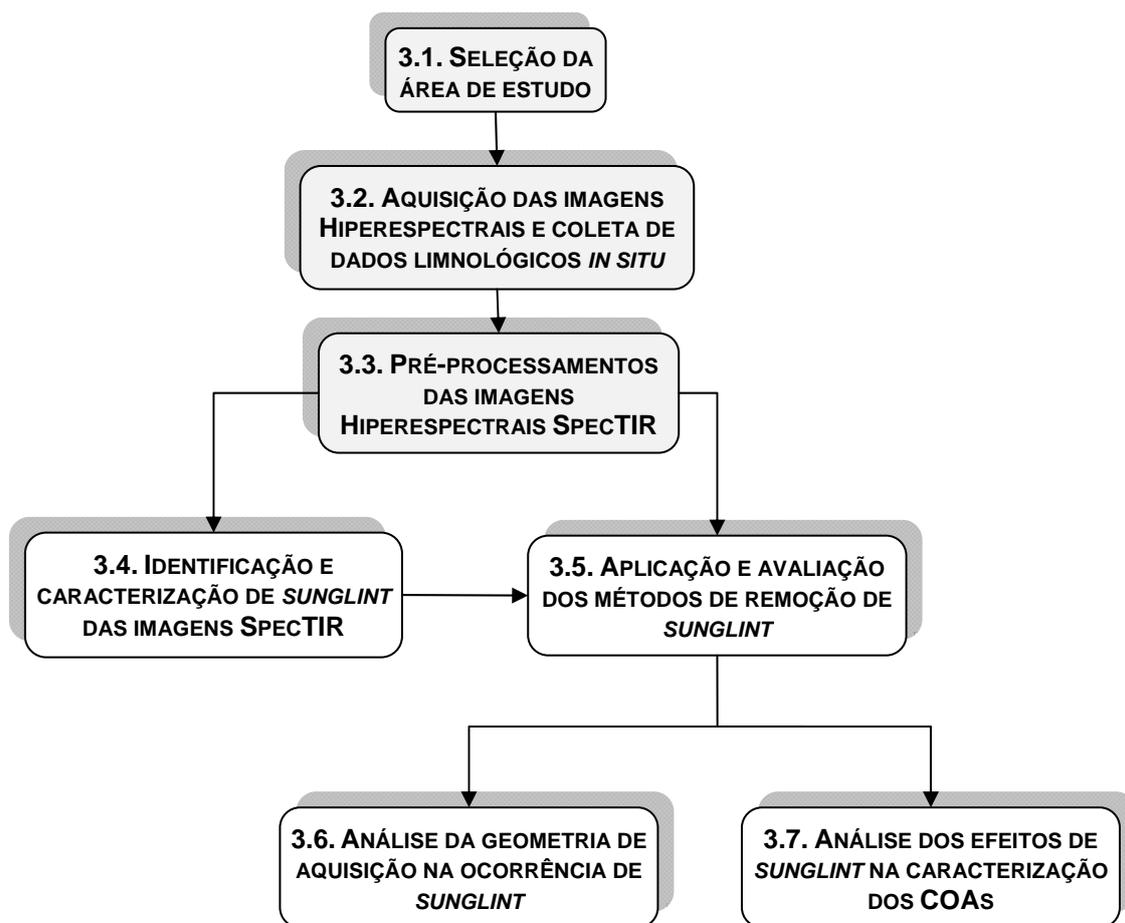


Figura 3.1- Fluxograma geral das etapas do trabalho.

3.1. Seleção da área de estudo

A seleção da área de estudo foi feita com base em estudos pré-existentes (LONDE, 2008) e levou em consideração as características morfológicas do lago. O reservatório Ibitinga está localizado na região central do Estado de São Paulo, no interior da bacia do Rio Tietê (Figura 3.2). O reservatório tem um formato sinuoso, o qual exigiu constantes mudanças na direção de imageamento da aeronave transportando o sensor SpecTIR (geometria de aquisição das imagens), a fim de que toda a área abrangida pelo lago fosse imageada. Como consequência, as condições de *sun glint* no presente estudo não puderam ser minimizadas unicamente pelo planejamento do sobrevoo. A área de estudo também foi selecionada porque está inserida em um estudo mais amplo feito através do projeto FAPESP intitulado “*Environmental and Socioeconomic Impacts Associated with the Production and Consumption of Sugarcane Ethanol in South Central Brazil*”. O projeto aborda um amplo espectro de tópicos relacionados aos impactos da produção e do consumo do etanol e da cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil.

O reservatório de Ibitinga é parte de um sistema de reservatórios em cascata. Tem como limite à montante a barragem da Usina Hidrelétrica Álvaro de Souza Lima (Bariri) e à jusante a Usina Hidrelétrica Mário Lopes Leão (Promissão). O reservatório apresenta uma área alagada de 10,7km², 450 km de perímetro e cerca de 114 km² de espelho d'água (CESP, 2012). A extensão aproximada da represa é de 70 km no Rio Tietê, 25 km no Rio Jacaré-Guaçu e 25 km no Rio Jacaré-Pepira (CESP, 2012), sendo estes considerados seus principais afluentes. O reservatório possui um volume médio de 55,7 x 10⁶ m³, profundidade média de 8,6 m e tempo de residência da água de 21,6 dias (VIEIRA et al., 2002; CESP, 2012).

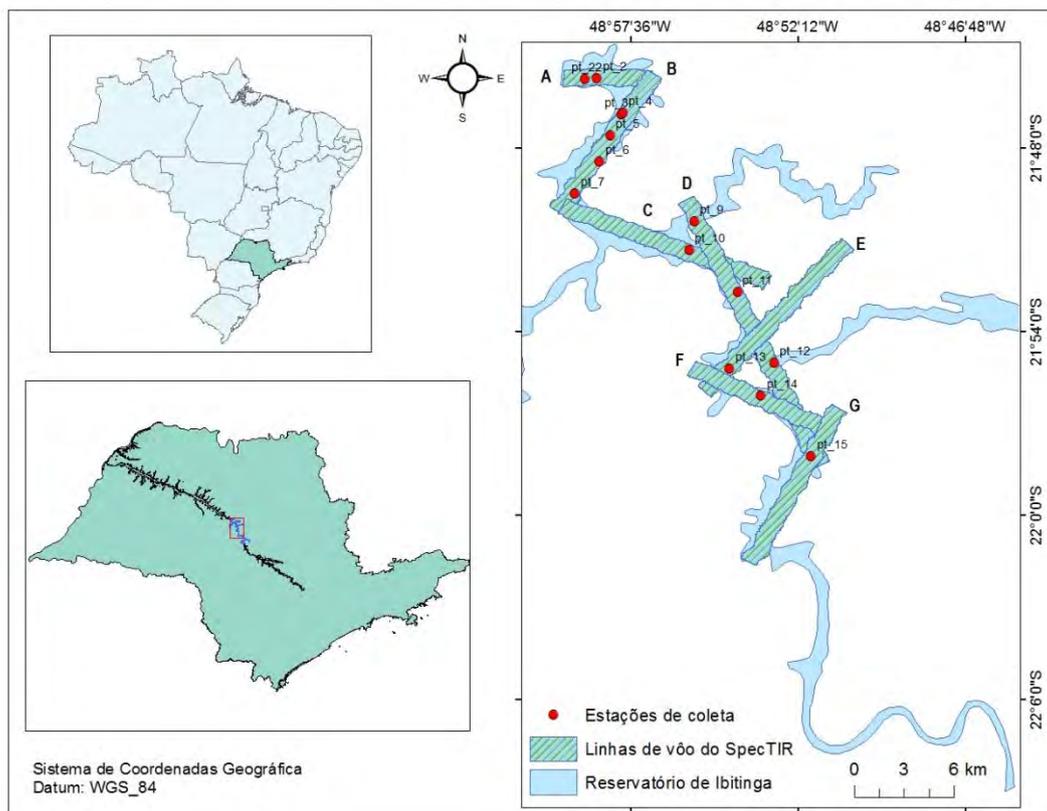


Figura 3.2 - Localização do reservatório de Ibitinga, no estado de São Paulo, Brasil, onde imagens do sensor SpecTIR foram adquiridas para o estudo do efeito de *sunlint* sobre as propriedades ópticas de água. À direita, observa-se o formato do reservatório, com as linhas de voo na cor verde, a partir daqui referidas “A, B, C, D, E, F e G”, e as estações de amostragem em campo na cor vermelho.

3.2. Aquisição dos dados limnológicos *in situ* e das imagens hiperespectrais

O trabalho de campo foi realizado nos dias 23 e 24 de outubro de 2011. O mês de outubro foi escolhido para a realização do trabalho de campo com base nas análises preliminares de sazonalidade do fitoplâncton (LONDE, 2008) e das condições climáticas que poderiam impor restrições ao imageamento da área, como a cobertura de nuvens e a precipitação excessiva. A análise da cobertura de nuvens foi feita com base na série histórica de imagens Landsat TM, órbita 221/75, do reservatório de Ibitinga. Nestes dois dias, foram coletadas amostras de água em 11 estações no primeiro dia e três estações no segundo, totalizando 14 estações amostrais ao longo do reservatório (Tabela 3.1). No

segundo dia, a amostragem ocorreu simultaneamente a aquisição das imagens hiperespectrais do sensor SpecTIR, operado pela empresa FotoTerra.

Tabela 3.1 - Localização geográfica das estações de coleta (EC) no reservatório de Ibitinga -SP.

EC	Longitude W	Latitude S	Data de coleta	EC	Longitude W	Latitude S	Data de coleta
pt_2	48°58'42.35"	21°45'44.28"	23/10	pt_10	48°55'43.64"	21°51'19.94"	24/10
pt_3	48°57'56.52"	21°46'56.03"	23/10	pt_11	48°54'12.42"	21°52'43.28"	23/10
pt_4	48°57'52.16"	21°46'51.02"	24/10	pt_12	48°52'59.77"	21°55'33.38"	23/10
pt_5	48°58'04.76"	21°48'03.89"	23/10	pt_13	48°54'25.06"	21°55'13.08"	23/10
pt_6	48°58'53.08"	21°48'21.24"	23/10	pt_14	48°53'24.25"	21°57'07.88"	23/10
pt_7	48°59'04.99"	21°49'32.92"	23/10	pt_15	48°51'48.02"	21°58'44.69"	23/10
pt_9	48°55'35.72"	21°50'24.61"	24/10	pt_22	48°59'08.99"	21°45'41.22"	24/10

Em cada estação foram coletadas amostras de água para a quantificação dos COAs (Figura 3.3). A clorofila (Chl_a) foi extraída com etanol 80 % a quente (75° C) por 5 minutos em tubos de ensaio. Em seguida, os tubos foram mergulhados em água gelada (0° C). As amostras foram mantidas por um período de 6 a 24 horas no refrigerador, na ausência de luz, para fins de quantificação da clorofila por análise espectrofotométrica (NUSCH, 1980). Após a quantificação de clorofila, a mesma amostra foi acidificada com HCl 0,4 N para avaliar a concentração de feofitina (feof).

As amostras coletadas para a determinação das concentrações de sólidos suspensos inorgânicos (SS_{inor}), orgânicos (SS_{org}) e sólidos totais em suspensão (TSS) foram filtradas utilizando filtros Whatman GF/C, os quais foram secos a 60° por 24 horas e pesados, obtendo-se assim o teor de TSS. Os filtros foram calcinados a 550 °C e pesados novamente, para quantificação dos SS_{inor}. A quantificação de SS_{org} foi obtida pela diferença entre os pesos dos filtros, de acordo com a metodologia de Wetzel e Likens (1991). As concentrações de carbono dissolvido total e de carbono orgânico e inorgânico dissolvido foram determinadas por meio de análises com gás infravermelho em um Analisador de Carbono Orgânico Total – SHIMADZU, modelo TOC-5000 (Anexo A).



Figura 3.3 – Coleta de amostras de água em campo para quantificação analítica dos COAs.

O sensor aerotransportado SpecTIR opera nas regiões do visível/infravermelho próximo (VNIR), nos comprimentos de onda entre 400 e 1000 nm, e na região do infravermelho de ondas curtas (SWIR), nos comprimentos de onda entre 1000 e 2500 nm. Este sensor já foi aplicado com sucesso para estimar diferentes concentrações de clorofila-a em corpos d'água (FERREIRA et al, 2011) e na identificação de alvos submersos para fins militares (BURT, 2012). A variabilidade na geometria de aquisição das imagens desta missão permitiu a avaliação da ocorrência de *sun glint* em diferentes ângulos de iluminação e visada (Tabela 3.2). Todas as cenas foram adquiridas ao nadir, com um tamanho de pixel de 3 m x 3 m e com 16 bits de resolução radiométrica.

Tabela 3.2 - Parâmetros de aquisição das imagens do sensor SpecTIR obtidas sobre o reservatório de Ibitinga -SP. As imagens de A a G estão identificadas na Figura 3.2.

Imagem	Horário local	Horário local	Zênite solar (graus)	Azimute solar (graus)	Direção de voo (graus)	Azimute relativo (graus)	Comprimento da linha de voo (km)	Altitude média do vôo (km)
	<i>inicial</i>	<i>final</i>						
A	09:23:52	09:24:52	52,7	88,3	275	186,7	4,69	2,748
B	09:33:20	09:35:29	50,4	87,2	33,8	53,4	10,09	2,741
E	10:18:30	10:20:52	40	82,0	224,7	142,7	11,06	2,753
C	10:27:54	10:30:28	37,9	80,7	296,8	216,1	12,47	2,748
D	10:37:08	10:40:39	35,6	79,4	153,7	74,3	17,08	2,747
F	10:45:51	10:47:36	33,7	77,9	301,3	22,4	8,56	2,755
G	10:54:02	10:56:02	31,7	76,3	209,4	133,1	10,41	2,760

As condições do céu para aquisição das imagens não eram 100% ideais, devido à radiação difusa ocasionada pela presença de nuvens no céu (Figura 3.4). Apesar de o voo ter sido realizado abaixo da cobertura de nuvens, ainda assim algumas áreas das imagens ficaram comprometidas pela ocorrência de nuvens e sombras.



Figura 3.4 - Condições de iluminação durante o trabalho de campo realizado no dia 24 de outubro de 2011, no reservatório de Ibitinga - SP.

3.3. Pré-processamento das imagens hiperespectrais

O pré-processamento das imagens hiperespectrais ocorreu em três etapas básicas: correção atmosférica, correção geométrica e a criação de máscaras para delimitação dos corpos de água. Todas estas etapas foram executadas no software ENVI 4.8.

A correção atmosférica foi realizada utilizando o pacote FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*), que incorpora o código de transferência radiativa MODTRAN4. Cada cena foi corrigida individualmente, com os parâmetros de aquisição específicos de cada imagem (latitude e longitude do pixel central; horário e data da aquisição da imagem, altitude do sensor, tamanho de pixel e altitude da superfície imageada), os quais foram fornecidos pela empresa FotoTerra. Para todas as imagens foi utilizado o modelo de atmosfera tropical e o modelo rural de partículas de aerossóis. A escolha dos modelos de atmosfera e de aerossol foi feita com base nas sugestões do manual do FLAASH e de testes utilizando os diferentes modelos disponíveis. O conteúdo de vapor de água da atmosfera foi adquirido através da banda do sensor SpectTIR situada em 1135 nm e a visibilidade, parâmetro que define o coeficiente de extinção atmosférico, foi definida acima de 70 km para todas as cenas, tendo assim pouca interferência na correção das imagens. Do processo de correção atmosférica, resultaram imagens em reflectância de superfície, as quais permitiram caracterizar espectralmente os alvos.

Após a correção atmosférica, realizou-se a correção geométrica de cada uma das cenas. Este processo foi realizado no pacote *Map Tools* do ENVI 4.8, a partir das informações contidas nos arquivos GLT (*Geometry Look-up Table*) fornecidos pela empresa FotoTerra. O arquivo GLT é utilizado para fazer a correção geométrica de todas as bandas e contém valores codificados referentes à localização exata de cada pixel na imagem de saída. No caso dos pixels que não possuem a correspondência exata com este arquivo, o interpolador vizinho mais próximo foi utilizado.

Para os processamentos seguintes, foram recortadas as partes de terra das imagens, restando apenas áreas de superfície de água na cena. As máscaras foram desenhadas manualmente, utilizando a ferramenta de seleção de Regiões de Interesse (*Region of Interest, ROI*), tangenciando os limites do corpo de água do reservatório, áreas de macrófitas (mais próximas às margens e banco de macrófitas quando identificados visualmente), nuvens, sombras e barcos, componentes os quais interferem nas análises espectrais.

3.4. Identificação e caracterização de *sunlint* nas imagens hiperespectrais

A identificação das regiões afetadas por *sunlint* foi realizada primeiramente a partir de inspeção visual das imagens. Em seguida, procuraram-se visualmente nas imagens cor verdadeira, massas de águas homogêneas que estivessem com pelo menos uma parte sob o efeito de *sunlint*. Por isto, pressupõe-se que as massas de águas homogêneas representam regiões de águas opticamente invariantes, com dominância de apenas um COA e sem grandes diferenças em sua concentração. Para tal, realizou-se também uma verificação nos espectros de reflectância dessas áreas nas imagens, a fim de garantir a premissa acima. Nesse sentido, as mudanças nas características do espectro de reflectância puderam ser atribuídas majoritariamente aos efeitos de *sunlint* (Figura 3.5).

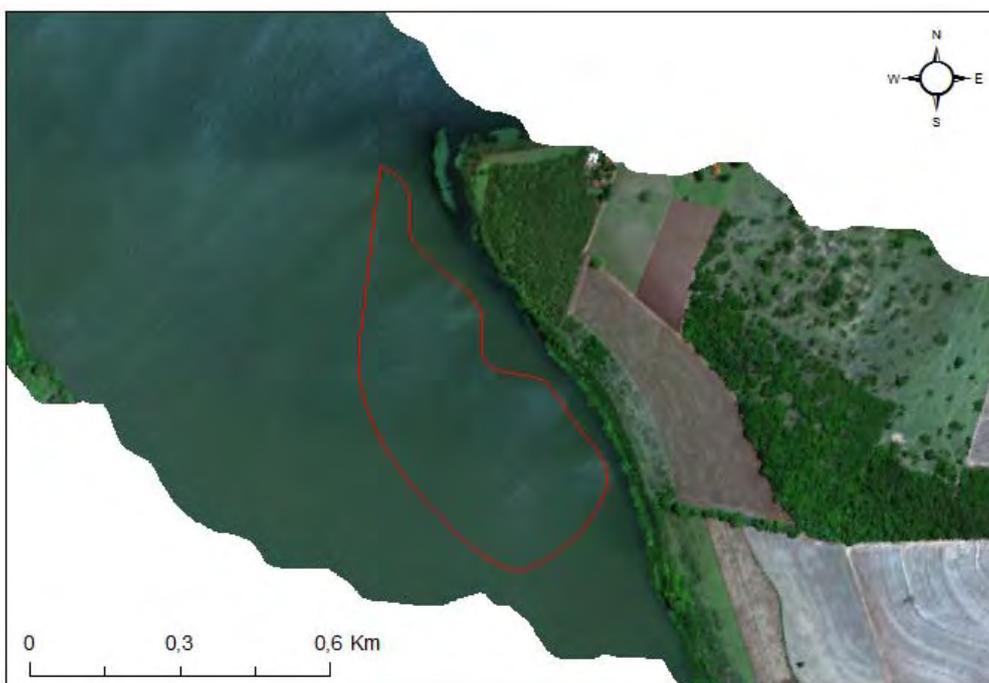


Figura 3.5 - Exemplo de uma região com massa de água considerada homogênea sob os efeitos de *sunlint*, delimitada pela linha em vermelho na cena. Uma análise visual sugere uma região dominada por clorofila (dado um maior espalhamento no verde), extraída da Imagem F - composição cor verdadeira (R - 638 nm; G - 548 nm; B - 460 nm).

Após delimitar as massas de águas homogêneas, foram traçados transectos, iniciando-os sempre na área não contaminada em direção à região identificada sob maior influência de *sunlint* na massa de água. Tais perfis foram traçados

para 3 bandas na região do VIS (460, 548, 638 nm) e 2 bandas na região do IVP (782 nm e 860 nm). Foram então exportados em formato ASCII para o EXCEL, onde os gráficos foram gerados. Para interpretação do impacto do *sun glint* nos valores de reflectância, foram extraídos os valores de média, desvio padrão e amplitude dos perfis traçados no software R (versão 2.15.1).

A fim de avaliar o tipo de *sun glint* presente nas imagens (*cross-track* ou induzido por ondas), foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) os dados referentes à velocidade e direção de vento para o dia do sobrevoo com o sensor SpectTIR. Os dados foram provenientes da estação meteorológica de Ibitinga-SP (Lat.: -21.8556°; Long.: -48.8000°), a qual representa a estação meteorológica mais próxima ao reservatório de Ibitinga (Figura 3.6A). Como o relevo da região é plano, pressupõe-se que os dados de vento da estação meteorológica podem ser extrapolados para a região do reservatório. Além do mais, a equipe de coleta que estava em campo no momento do sobrevoo e não registrou a influencia de grandes ondas no reservatório (Figura 3.6B).

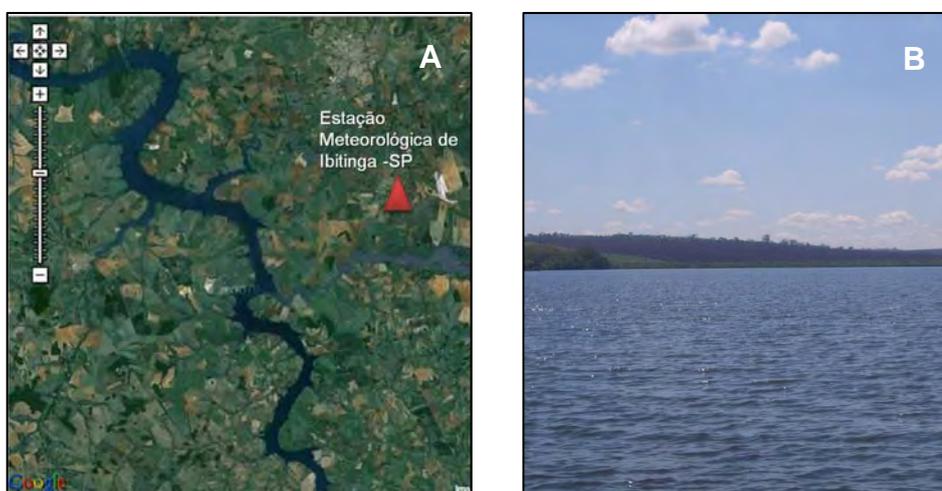


Figura 3.6 - A) localização da estação meteorológica de Ibitinga – SP; B) condições da superfície do reservatório durante a amostragem que ocorreu concomitante ao sobrevoo.

FONTE: Modificado de INMET (2012).

3.5. Aplicação e avaliação de métodos de remoção de *sun glint*

O algoritmo Goodman et al. (2008) tem como entrada a reflectância de sensoriamento remoto acima da superfície da água R_{rs}^{raw} (sr^{-1}), a qual pode

ser aproximada a partir da divisão da reflectância de superfície por π . A correção do *sunlint* é calculada como um *offset* constante (Δ) ao longo de todos os comprimentos de onda, dependendo da diferença entre R_{rs} em 640 e 750 nm, como descrito a seguir:

$$R_{rs}(\lambda) = R_{rs}^{raw}(\lambda) - R_{rs}^{raw}(750) + \Delta$$

$$\Delta = 0,000019 + 0,1[R_{rs}^{raw}(640) - R_{rs}^{raw}(750)] \quad (3)$$

Onde $R_{rs}(\lambda)$ é a reflectância de sensoriamento remoto sem *sunlint* em todos os comprimentos de onda; $R_{rs}^{raw}(\lambda)$ é a reflectância de sensoriamento remoto acima da água em todos os comprimentos de onda; $R_{rs}^{raw}(750)$ é a reflectância de sensoriamento remoto acima da água em 750 nm; $R_{rs}^{raw}(640)$ é a reflectância de sensoriamento remoto acima da água em 640 nm, e Δ é o *offset* adicionado a cada comprimento de onda.

As constantes 0,000019 e 0,1 foram fornecidas pelo modelo de Lee et al. (1999). De acordo com os autores, podem ser aplicadas a imagens oriundas de qualquer sensor hiperespectral, desde que existam bandas localizadas em 750 nm e 640 nm. Após a correção do *sunlint*, as imagens foram convertidas novamente para reflectância de superfície (a partir daqui referidas como imagens *deglint*), a fim de facilitar a interpretação dos resultados.

Para fins de avaliação do desempenho do algoritmo de *deglint* de Goodman et al. (2008) e comparação entre métodos de remoção de *sunlint*, aplicou-se o algoritmo desenvolvido por Kutser et al. (2009) em duas imagens que possuem uma área em comum (imagens D e G) e estavam bastante contaminadas por *sunlint*. Esse método foi escolhido por ter sido desenvolvido essencialmente para o uso em imagens hiperespectrais, pois usa dados próximos a feição de absorção do oxigênio em 760 nm. O método de Kutser et al. (2009) assume que a quantidade de *sunlint* presente na imagem é proporcional à profundidade da banda de absorção do oxigênio.

Para este trabalho, as bandas escolhidas tiveram que ser adaptadas à resolução espectral do sensor SpectTIR. O comprimento de onda central da

feição de absorção do oxigênio foi determinado em 753 nm, visto a impossibilidade de coletar a reflectância em 760 nm, devido a uma feição espúria gerada pelo algoritmo de correção atmosférica. O próprio autor afirma que nesses casos, outras bandas (e.g. 750, 775 nm) podem ser utilizadas sem que a performance do método seja comprometida.

$$D = \frac{R(738) + R(860)}{2} - R(753) \quad (4)$$

Onde D é a imagem profundidade de banda de absorção do oxigênio; $R(738)$, $R(860)$, $R(753)$ são os valores de reflectância nesses comprimentos de onda.

Na imagem D, assume-se que quanto mais próximo a zero for o número digital do pixel, menor a influência do *sun glint*. Pixels com valores mais altos estão mais contaminados. A imagem D pode conter valores negativos, geralmente causados por ruídos (KUTSER et al., 2009). Por isso, normaliza-se a imagem D transformando todos os valores negativos para zero e dividindo a imagem pelo valor máximo de D. Com isso, a imagem D normalizada (D_{norm}) apresenta todos os valores de pixel entre zero e um. A variação espectral do *glint* ($G(\lambda)$) foi obtida pela subtração entre o espectro oriundo da região com maiores e menores valores de D_{norm} , por meio da ferramenta *Spectral Math* do ENVI. Para tanto, foram geradas duas ROIs (polígonos de 10 x 10 pixels), extraídas visualmente no ENVI 4.8, as quais foram sobrepostas à imagem original de onde se extraiu a curva espectral para cada ROI. Uma ROI representou a região com valores mais altos (sob influência de *sun glint*) e a outra a região com os menores valores, livre dos efeitos de *sun glint*. Obteve-se, assim, a variação espectral do *glint* ($G(\lambda)$). A imagem contendo a distribuição espacial do *sun glint* resultou do produto entre a imagem D_{norm} e a variação espectral do *sun glint* ($G(\lambda)$) (KUTSER et al., 2009). A partir dessa imagem pode-se remover o *sun glint* das imagens simplesmente subtraindo a imagem contendo a distribuição espacial do *sun glint* da imagem original.

$$R_{deglint}(x, y, \lambda) = R(x, y, \lambda) - G(\lambda) * D_{norm}(x, y) \quad (5)$$

Onde $R_{deglint}(x, y, \lambda)$ é a imagem corrigida para os efeitos de *sunlint*, $R(x, y, \lambda)$ é a imagem original, sob os efeitos de *sunlint*, $G(\lambda)$ é a variação espectral do *sunlint* e $D_{norm}(x, y)$ é a distribuição espacial do *sunlint*.

Uma variação do método de Kutser et al. (2009) também foi testada em duas imagens selecionadas, linhas de voo D e G, a fim de se evitar a utilização da Equação 3. Essa adaptação baseou-se nas mesmas pressuposições de Kutser et al. (2009), quanto a influência do *sunlint* na profundidade de banda do oxigênio. Ao invés de se gerar a imagem D_{norm} a partir das equações propostas, essa imagem foi obtida a partir da técnica de remoção do contínuo. Portanto, a diferença entre os dois métodos (Kutser et al., 2009 e Kutser modificado) é a forma de obtenção da imagem D (profundidade da banda de absorção do oxigênio).

A remoção do contínuo foi realizada, escolhendo-se o comprimento de onda inicial em 739 nm e o final em 860 nm, pois são os comprimentos de onda que cercam a feição de absorção do oxigênio. São os mesmo comprimentos de onda utilizados por Kutser et al. (2009). A formulação matemática para a remoção do contínuo dos espectros de reflectância é (CLARK e ROUSH, 1984; GALVÃO, 2001):

$$R_{cr}(\lambda) = \frac{R_{original}(\lambda)}{R_{contínuo}(\lambda)} \quad (6)$$

Onde $R_{cr}(\lambda)$ é a reflectância normalizada após a remoção do contínuo, $R_{original}(\lambda)$ é reflectância de superfície em um determinado comprimento de onda e $R_{contínuo}(\lambda)$ é a reflectância projetada na linha do contínuo neste mesmo comprimento de onda.

A partir da imagem do contínuo $R_{cr}(\lambda)$, obtém-se a imagem profundidade de banda de absorção do oxigênio:

$$PB_{oxi} = 1 - R_{cr}(753nm) \quad (7)$$

Onde PB_{oxi} é a imagem profundidade de banda de absorção do oxigênio e $R_{cr}(753nm)$ é a reflectância normalizada após a remoção do contínuo em 753 nm.

Depois de gerar a imagem PB_{oxi} , aplicaram-se os mesmos procedimentos de Kutser et al. (2009), gerando no final a imagem $R_{deglint}(x, y, \lambda)$, conforme a Equação 4.

Para avaliar o desempenho relativo dos três métodos (Goodman et al., 2008; Kutser et al., 2009; Kutser et al. modificado), foi realizada uma comparação entre os valores de reflectância das áreas livres e contaminadas por *sun glint*, em massas de água consideradas homogêneas, antes e depois da aplicação de cada um dos métodos testados. Utilizaram-se as imagens cor verdadeira para identificar as ROIs (30 pixels cada) com e sem *sun glint* dentro das massas de água homogêneas. Foram avaliadas cinco áreas no total (10 ROIs no total), sendo duas na imagem G (áreas g1 e g3) e três na imagem D (áreas d1, d2 e d3). Valores de reflectância foram extraídos para 3 bandas na região do VIS (460, 548, 638 nm) e 2 bandas na região do IVP (753 nm e 860 nm). Assumiu-se que, como ambas as áreas representam a mesma massa de água, os valores de reflectância deveriam ser semelhantes e com isso, a diferença entre os valores extraídos esperados seria próxima à zero. Nesse sentido, foi interpretado que o método com maior capacidade de remoção de *sun glint* foi aquele capaz de aproximar a zero os valores de reflectância entre as duas áreas analisadas. Para fins de simplificação da análise extraiu-se de cada comprimento de onda a média dos valores da ROI contaminada por *sun glint* (maior sinal) a qual foi subtraída da média dos valores da ROI livre da influência de *sun glint*.

3.6. Análise da geometria de aquisição dos dados na ocorrência de *sun glint*

Para avaliar a influência da geometria de aquisição dos dados na ocorrência do *sun glint* nas imagens SpecTIR, utilizaram-se as imagens antes e depois da correção de *sun glint* (método de Goodman et al., 2008) e os valores de ângulos zenitais e azimutais de cada cena. Foram geradas as *imagens resíduos*, oriundas da subtração entre a imagem original e a imagem *deglint*. Essas imagens representam a distribuição espacial do *sun glint*. Foi realizado o fatiamento dessas imagens em intervalos de reflectância, representando diferentes classes de intensidades do *sun glint* na cena. Os limiares utilizados

para a definição de cada classe foram baseados na análise dos histogramas das imagens resíduos, associando esses valores com a avaliação visual da intensidade do *sunlint* (brilho) nas cenas. Para todas as cenas foram utilizados os mesmos limiares.

Para a interpretação dos resultados, cada imagem fatiada foi avaliada em relação ao seu respectivo AZS (θ) e ângulo azimutal relativo (AAR) normalizado (ω). Os AZR foram calculados a partir da diferença entre o ângulo azimutal de voo e o ângulo azimutal solar (AAS), representando a direção relativa de voo em relação à posição do sol. Este ângulo foi então normalizado entre 0° e 90° , uma vez que para cada ângulo relativo existem quatro direções de voo que podem resultar nesse mesmo ângulo (Figura 3.7).

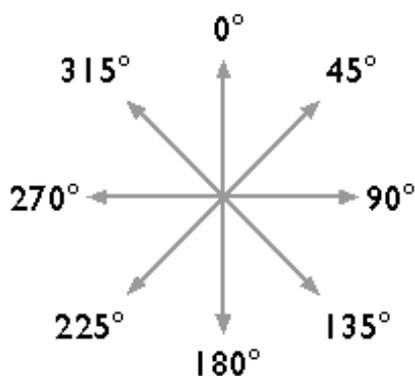


Figura 3.7 - Equivalência entre os ângulos azimutais. Por exemplo, a direção de 45° é equivalente à direção de 225° e nesse caso, acarreta os mesmos efeitos na avaliação de *sunlint*.

3.7. Análise dos efeitos de *sunlint* sobre a estimativa dos COAs, considerando a geometria de aquisição dos dados

Para avaliar os efeitos de *sunlint* sobre a estimativa dos COAs, considerando a geometria de aquisição de dados, foram obtidas correlações entre estes dados e os valores de reflectância da imagem, em regiões do espectro eletromagnético sensíveis a essas substâncias. Foram utilizados os valores de concentrações dos COAS obtidas nas 14 estações amostradas em campo. Como uma das estações sobrepõe duas imagens, o mesmo valor de COA foi relacionado com dois valores distintos de reflectância, obtendo-se um amostral de 15 casos. Os COAs foram agrupados de acordo com os AZS

associados aos valores de reflectância de cada estação amostral. Após, foram divididos em dois grupos: $AZS > 40^\circ$ e $AZS < 40^\circ$. O limiar de 40° foi determinado com base nas observações das relações dos dados e na literatura (MOBLEY, 1999). As correlações foram geradas para os dados antes e depois da remoção de *sunlint*, para que seus efeitos pudessem ser caracterizados.

O coeficiente de *Spearman* foi calculado para as variáveis utilizadas e correlações e testes de significância foram gerados no software R. Os resultados foram plotados em diagramas de dispersão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Identificação e caracterização do *sunlint* nas imagens do Sensor SpecTIR

As regiões afetadas por *sunlint* nas imagens do sensor SpecTIR apresentam-se como áreas esbranquiçadas nas composições cor verdadeira (R – 638 nm; G – 548 nm; B – 460 nm), dificultando a interpretação visual das feições aquáticas nestes locais. Estas áreas ocorrem predominantemente nas bordas leste em todas as imagens com direção de voo menor que 270°, como mostrado em dois exemplos na Figura 4.1A e B, e nas margens norte das duas cenas imageadas nas direções de voo de 296° e 300°, como apresentado no exemplo da Figura 4.1C. O Sol estava posicionado a leste do sensor em todas as cenas adquiridas.

Esse padrão de aumento do brilho em direção as bordas das imagens é característico de cenas contaminadas pelo chamado *cross-track glint* e também foi observado por Mustard et al. (2001) e Goodman et al. (2008) em imagens AVIRIS e por Burt (2012) e Miller (2012) em imagens SpecTIR. De acordo com Miller (2012), o *cross-track sunlint* ocorre quando o ângulo do sol é tal que o *sunlint* se manifesta de maneira perpendicular ao movimento do sensor, comumente ocasionando alta intensidade de brilho em metade da imagem a partir do nadir em direção a uma das bordas da cena, ao passo que a metade restante é muito pouco ou nada afetada pelo *sunlint*. Isso ocorre porque ao realizar a varredura ao longo do FOV, a variação na direção de visada do sensor apresenta diferentes AZVIs em relação à superfície. Além do mais, a reflectância de alvos não Lambertianos apresenta, geralmente, valores maiores quando o ângulo de iluminação se aproxima do ângulo de visada do sensor. Portanto, é comum a ocorrência de situações onde os alvos apareçam mais brilhantes nas bordas do que no centro. Isso é particularmente importante ao se avaliar o padrão espacial do *sunlint*, pois os pixels das bordas tendem a saturar e inviabilizar a aquisição das feições subaquáticas de interesse nestas áreas. Três maneiras de minimizar os efeitos de iluminação e visada seriam voar nas primeiras horas da manhã, pois o sol está baixo e o ângulo de

reflexão (para uma superfície lisa) é maior que o ângulo zenital de visada do sensor (KAY et al, 2009), ou trabalhar com sensores que possuam campos de visada estreitos ou capacidade de imagear fora do nadir. Apesar do sensor SpecTIR possuir um FOV relativamente estreito (24°), os efeitos de *cross-track sunglint* são aparentes (Figura 4.1).

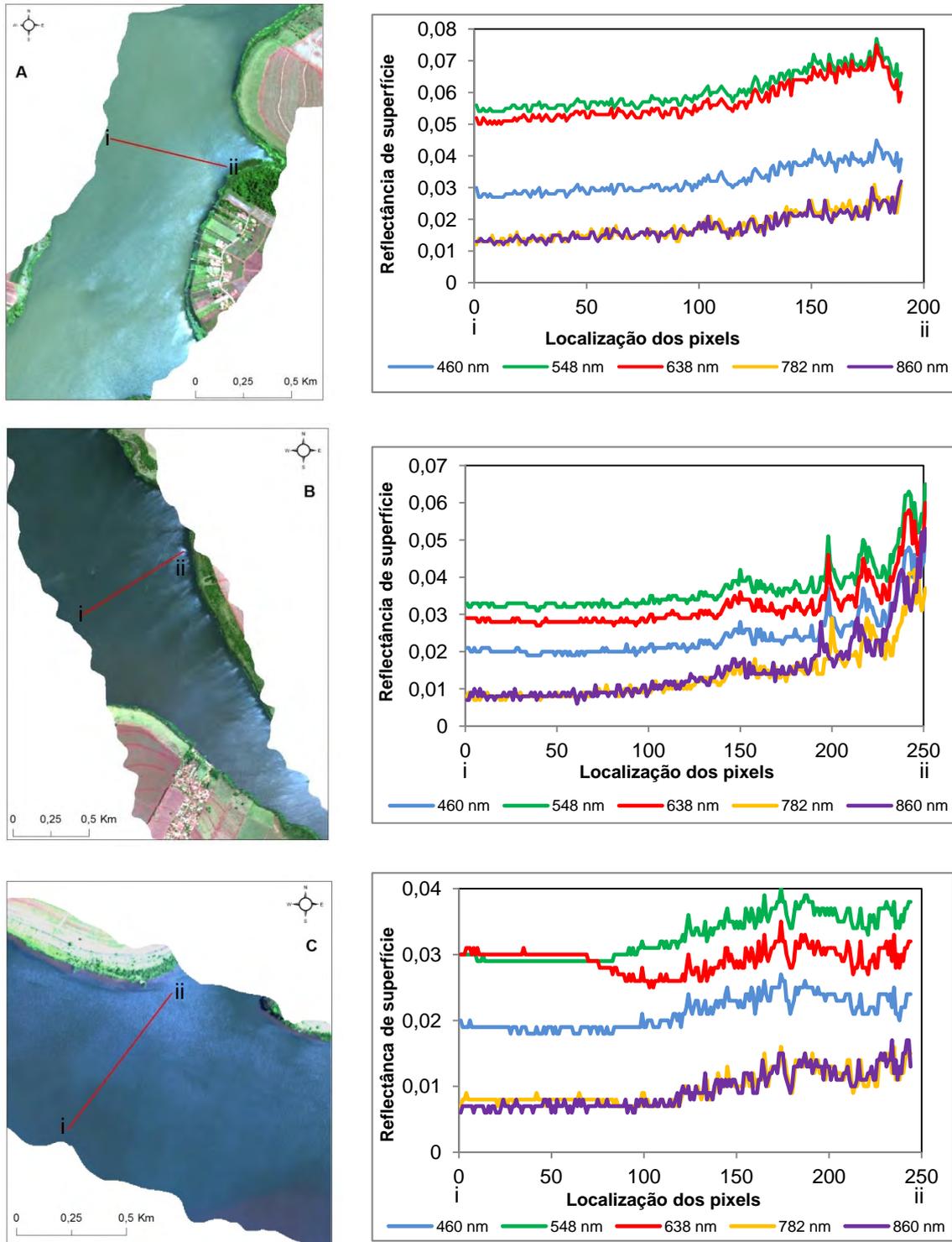


Figura 4.1 - Exemplos de imagens do sensor SpecTIR, adquiridas no reservatório de Ibitinga, afetadas por *sunlint*. A) Recorte de uma área da imagem G (direção de voo $< 209,4^\circ$) com massa de água homogênea afetada por *sunlint* no lado direito da cena e consequente aumento da reflectância ao longo do transecto. B) Recorte de uma área da imagem D (direção de voo $< 153,7^\circ$) afetada por *sunlint* no lado direito da cena e aumento da reflectância resultante. C) Recorte de uma área da imagem C (direção de voo $< 296,8^\circ$) afetada por *sunlint* ao norte da cena e o aumento da reflectância da esquerda para direita do transecto. Os transectos iniciam na região "i" e terminam na região "ii".

Portanto, a variação da reflectância na cena para uma massa de água considerada homogênea e afetada por *sunlint* também evidencia o aumento da reflectância de superfície nas áreas atingidas, quando comparadas aos locais livres desses efeitos (transectos da Figura 4.1). Uma vez que as propriedades ópticas da água são homogêneas, a diferença na reflectância observada só pode ser ocasionada por fontes de radiância externas ao corpo de água (MUSTARD et al. 2001; KAY et al., 2009; MILLER, 2012). Os valores dos perfis transversais indicam um aumento de cerca de até 3% na reflectância da massa de água ocasionada por *sunlint* (Tabela 4.1). Os resultados encontrados corroboram os valores encontrados na literatura. Kay et al. (2009) sugerem que o *sunlint* aumenta os valores de reflectância por um fator de 2 ou mais. Para dados simulados do sensor HypIRI, Park et al. (2010) afirmam que os efeitos de *sunlint* na borda leste do campo de visada do sensor são consideravelmente maiores (cerca de 2%) que na borda oeste da imagem.

Tabela 4.1 - Estatística descritiva dos perfis espaciais de reflectância de massas de água homogêneas utilizadas na identificação e caracterização de *sunlint* nas imagens de Ibitinga, onde *n* é o número de pixels de cada transecto; **CO** é o comprimento de onda e **DP** é o desvio padrão.

Imagem	CO	n	Média	DP	Mínimo	Máximo	Diferença (%)
G	460 nm	190	0,0326	0,0045	0,027	0,045	1,8
	548 nm	190	0,0607	0,0057	0,054	0,077	2,3
	638 nm	190	0,0573	0,0061	0,05	0,075	2,5
	782 nm	190	0,0179	0,0043	0,012	0,031	1,9
	860 nm	190	0,0175	0,0041	0,012	0,032	2,0
D	460 nm	251	0,0242	0,0063	0,019	0,052	3,3
	548 nm	251	0,0371	0,0066	0,031	0,065	3,4
	638 nm	251	0,0322	0,0063	0,027	0,06	3,3
	782 nm	251	0,0139	0,0073	0,007	0,042	3,5
	860 nm	251	0,0150	0,0087	0,006	0,053	4,7
C	460 nm	244	0,0211	0,0024	0,018	0,027	0,9
	548 nm	244	0,0327	0,0033	0,029	0,04	1,1
	638 nm	244	0,0292	0,0019	0,025	0,035	1,0
	782 nm	244	0,0098	0,0024	0,007	0,016	0,9
	860 nm	244	0,0094	0,0028	0,006	0,017	1,1

O padrão de distribuição de *sunlint* também é afetado pela direção e força do vento (GATEBE et al., 2005). Os dados de vento obtidos junto à estação meteorológica de Ibitinga mostraram que a direção do vento variou entre 120° (sudeste), no início do imageamento, até 105° (leste) (INMET, 2012). A velocidade do vento registrada no período de imageamento foi inferior a 3,2m/s (Figura 4.2). De acordo com a escala de Beaufort, a qual classifica a intensidade dos ventos, levando em consideração a sua velocidade e os efeitos resultantes, o vento registrado em Ibitinga pode ser classificado como “Brisa leve”, resultando em uma superfície da água com ligeiras ondulações. A direção predominante de sudeste mostra que o *sunlint* observado nas imagens orientadas para o norte, não está concentrado na região de máximo

efeito do *fetch*¹, onde estariam ocorrendo às maiores ondulações na água. Este padrão também é observado nas cenas imageadas na direção leste-oeste, como a imagem C do exemplo (Figura 4.1), onde o *sunlint* está concentrado nas bordas norte das imagens. Nesse sentido, entende-se que o padrão de distribuição de *sunlint* não pode ter sido provocado majoritariamente pela influência do vento. De acordo com Hochberg et al. (2011), o padrão de distribuição do *sunlint* é sensível à velocidade do vento quando a intensidade do *sunlint* é moderada ou baixa e é pouco sensível quando o *sunlint* é intenso. Portanto, pode-se assumir que os padrões de *sunlint* observados nas imagens SpecTIR são mais influenciados pela geometria de aquisição das imagens do que pelas ondas acarretadas pela direção e velocidade de vento.

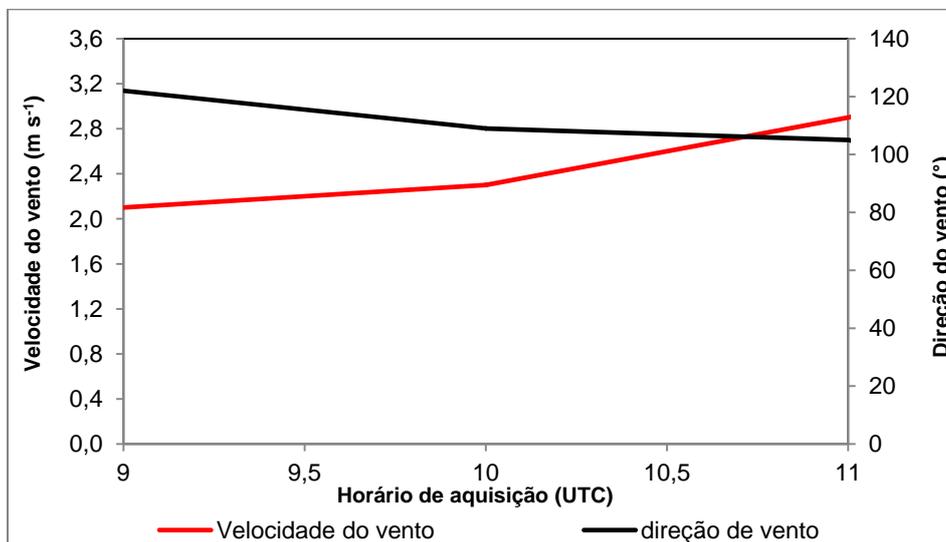


Figura 4.2 - Direção e velocidade do vento na estação meteorológica de Ibitinga – SP, durante a aquisição das imagens hiperespectrais SpecTIR.

Fonte: INMET (2012).

4.2. Aplicação e avaliação dos métodos de remoção de *sunlint*

A análise visual das imagens *deglint* demonstrou a habilidade dos métodos testados em remover o *sunlint*, melhorando a interpretação visual das imagens e ressaltando feições antes encobertas. Na porção sul da imagem G

¹ O *fetch* é a distância que o vento atua sobre a superfície da água sem mudança de direção (WETZEL, 2001).

(Figura 4.3 e Apêndice A) observou-se uma pluma de sedimentos que estava ocultada pelo *sunlint* e foi identificada após a aplicação dos três métodos de *deglint* (métodos de Goodman et al., 2008; Kutser et al., 2009; e Kutser et al. modificado). Dentre as técnicas testadas, o método de Goodman et al. (2008) eliminou mais feições esbranquiçadas do que os demais métodos testados (Figura 4.3B e Figura 4.4B), melhorando assim o aspecto visual das imagens. Observou-se na imagem G (Figura 4.3B) que o referido método ressalta uma massa de água dominada por clorofila, enquanto nos outros procedimentos aplicados o *sunlint* não foi totalmente removido nesta área, e a feição permaneceu oculta.

As imagens corrigidas pelo algoritmo original de Kutser et al. (2009) apresentaram *sunlint* residual, principalmente nas regiões mais contaminadas, nas bordas leste das cenas (Figuras 4.3C e 4.4C). O método de Kutser et al. modificado apresentou resultados similares ao original na imagem G (Figura 4.3D), mas adicionou ruído à imagem D (Figura 4.4D), inviabilizando a sua interpretação visual. Também se observou nas imagens G e D que o algoritmo de Goodman et al. (2008) acarretou distorções nas composições cor verdadeira das imagens, exigindo bastante cuidado com o contraste das mesmas. Tanto o método de Kutser et al. (2009), quanto a versão modificada dessa técnica, exigiram um trabalhoso refinamento da máscara de terra, necessitando também eliminar todos os bancos de macrófitas flutuantes presentes nas imagens. Esta etapa foi importante, pois as macrófitas apresentam um sinal muito maior do que as áreas de água. Uma vez que a imagem D_{norm} gerada pelo algoritmo é normalizada pelo valor máximo da imagem, os demais valores acabam sendo comprimidos dentro da escala de 12 bits. Para a aplicação do método de Goodman esse procedimento não se fez necessário.

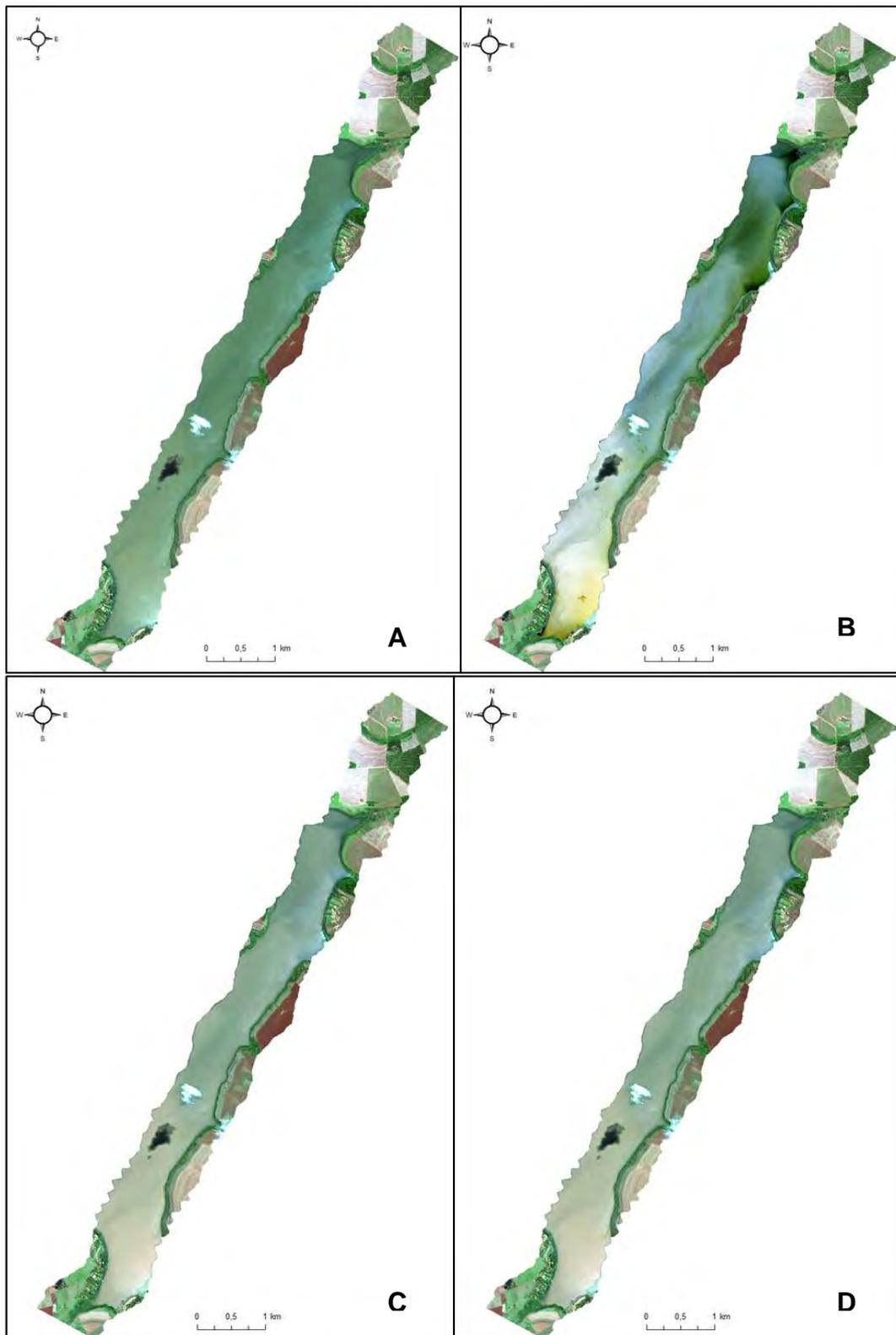


Figura 4.3 Imagem G composição cor verdadeira (R - 638nm; G - 548nm; B - 460nm).
A) Imagem original; B) Imagem *deglint* obtida pelo método de Goodman et al. (2008); C) Imagem *deglint* obtida pelo método de Kutser et al. (2009); D) Imagem *deglint* obtida pelo método de Kutser et al. modificado.

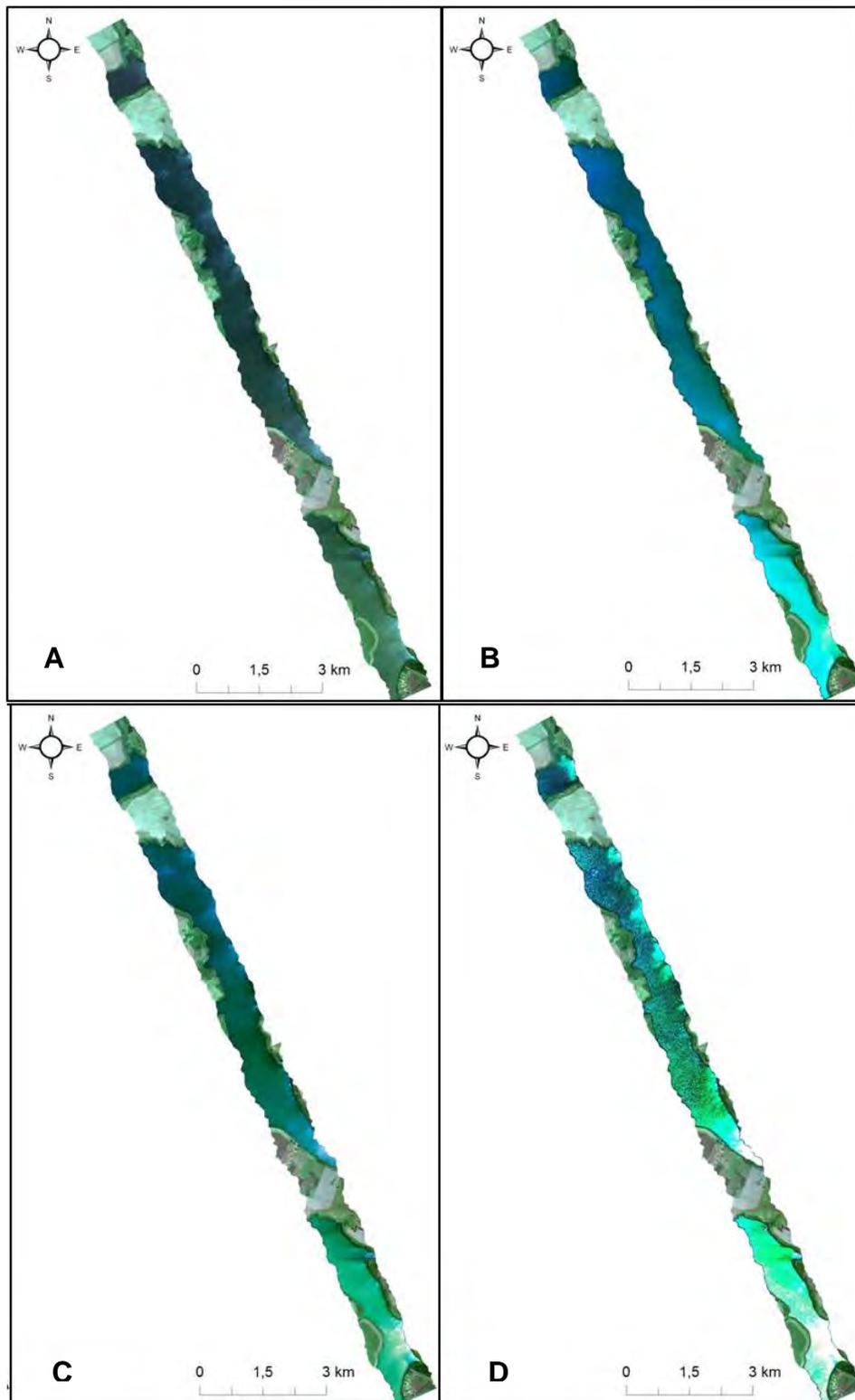
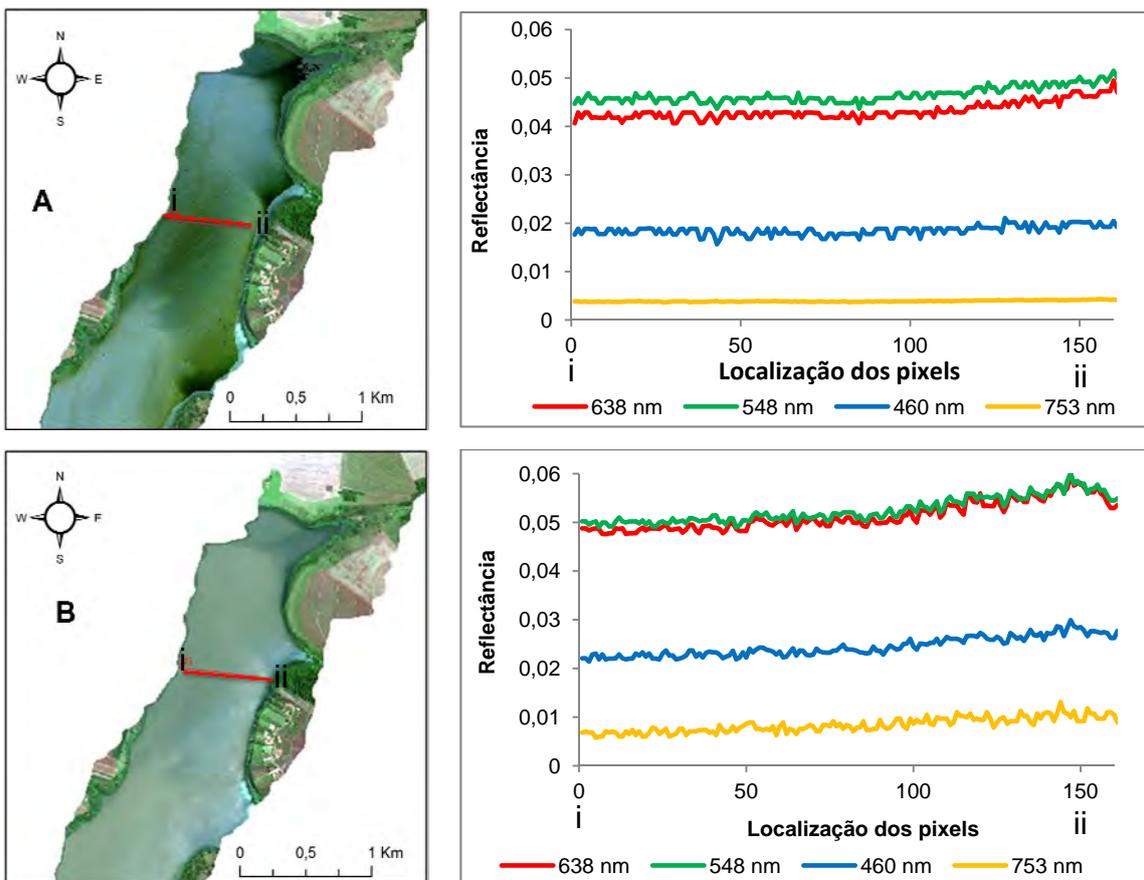


Figura 4.4 – Imagem D composição cor verdadeira (R 638nm; G 548nm; B 460nm).
 A) Imagem original; B) Imagem *deglint* obtida pelo método de Goodman et al. (2008); C) Imagem *deglint* obtida pelo método de Kutser et al. (2009); D) Imagem *deglint* obtida pelo método de Kutser et al. modificado .

As variações de reflectância ao longo de um transecto arbitrário que se inicia em uma área homogênea não contaminada por *sunlint* e termina em uma área afetada nas imagens G e D também mostraram a suavização do *sunlint* pelos métodos aplicados (Figura 4.5). O bom resultado do método de Goodman et al. (2008) é evidenciado pela redução na amplitude dos valores de reflectância ao longo destes transectos, com perfis mais horizontais, removendo o sinal indesejado nas áreas que estavam sob maior influência do *sunlint* (Figura 4.5A). O gráfico de reflectância do método de Kutser et al. (2009) e Kutser modificado (Figura 4.5B e 4.5C) evidenciaram o resíduo de *sunlint* na borda leste da cena, região onde a imagem se encontra mais contaminada, conforme foi observado na interpretação visual da imagem. Estes resultados corroboram os resultados de Miller (2012), que ao utilizar o método de Kutser et al. (2009) também encontrou *sunlint* residual nas porções mais afetadas da imagem.



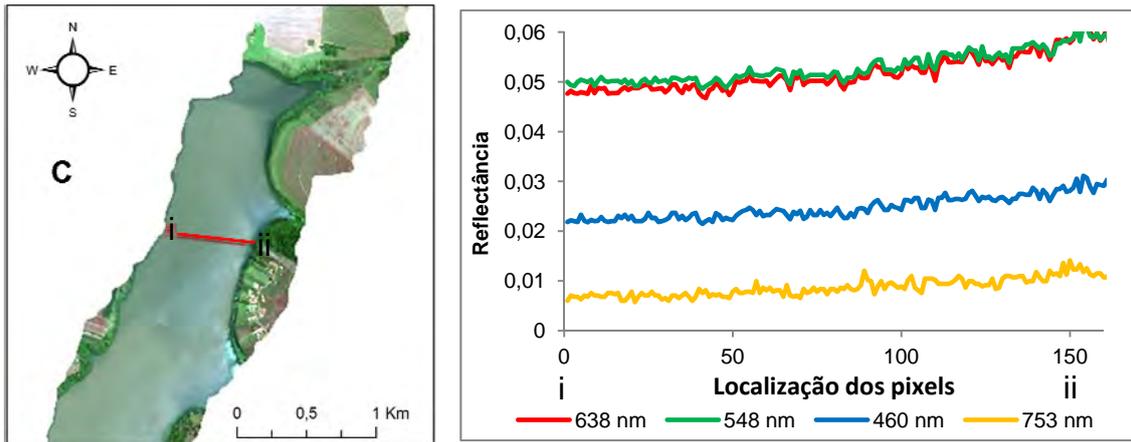


Figura 4.5 – Transecto arbitrário traçado em um recorte da imagem G (R - 638nm; G – 548 nm; B - 460nm) para a caracterização da variação espacial da reflectância após a correção do *sunlint*. As imagem *deglint* e as variações de reflectância após a correção pelos métodos de Goodman et al. (2008), Kutser et al. (2009) e Kutser et al. modificado são mostradas em A, B e C, respectivamente. O símbolo "i" indica o início do transecto traçado e "ii" o final.

Apesar do bom resultado na imagem G, o método de Kutser modificado apresentou uma piora significativa quando aplicado a imagem D, não só no aspecto visual, mas também no perfil espacial da reflectância (Figura 4.6C). O espectro resultante do procedimento é altamente ruidoso, não permitindo a extração de informações desta imagem. O método de profundidade de banda está relacionado à qualidade e precisão dos dados radiométricos da imagem (relação sinal-ruído do sensor) e aos procedimentos de correção atmosférica (BREUNIG et al., 2007). Estes dois fatores podem ter sido fundamentais para o baixo desempenho da técnica de profundidade de banda na correção de *sunlint* nesta cena. Por outro lado, o método de Goodman et al. (2008) apresentou perfis horizontais, com amplitudes próximas a zero (Figura 4.6A), elucidando o seu bom desempenho. O método de Kutser et al. (2009) por sua vez, removeu o sinal de *sunlint* parcialmente, permanecendo ainda resíduos de *sunlint* na região onde a imagem encontra-se mais contaminada (Figura 4.6B).

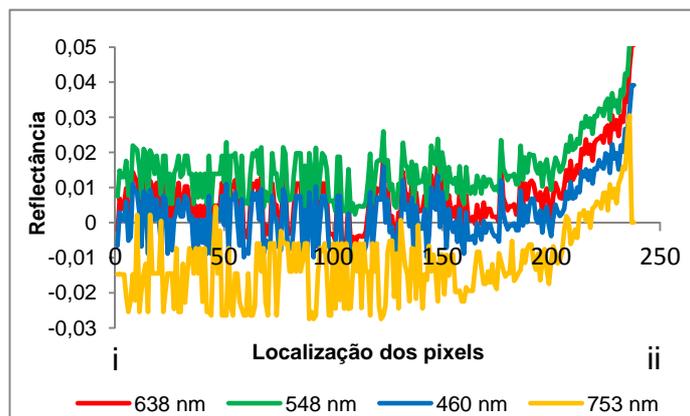
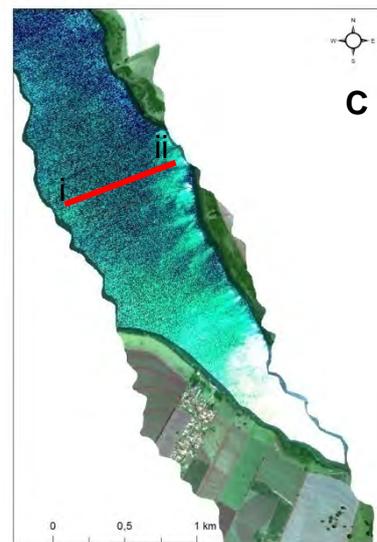
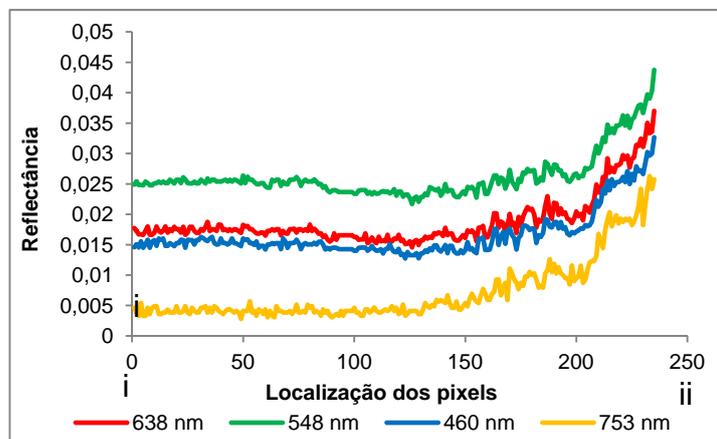
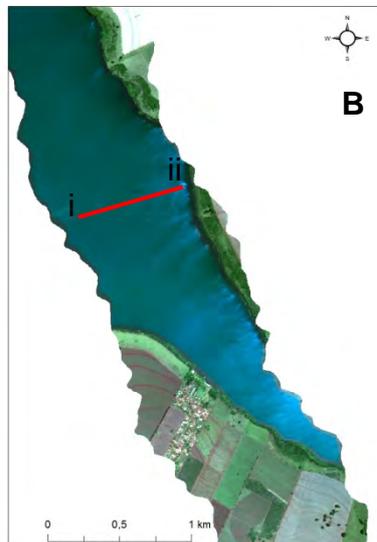
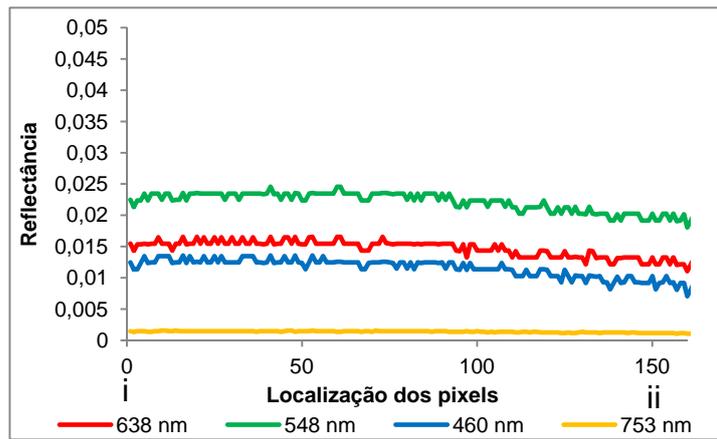
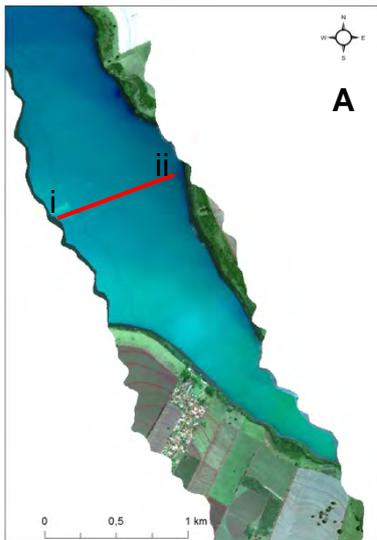


Figura 4.6 – Transecto arbitrário traçado em um recorte da imagem D (R - 638nm; G - 548nm; B - 460nm), para caracterização da variação espacial da

reflectância após a correção do *sunlint*. As imagem *deglint* e as variações de reflectância após a correção pelos métodos de Goodman et al. (2008), Kutser et al. (2009) e Kutser et al. modificado são mostradas em A, B e C, respectivamente. "i" indica o início do transecto traçado e "ii" o final.

Na Tabela 4.2, observa-se a diferença das médias de reflectância entre 10 ROIs avaliadas, cinco em áreas livres e cinco em áreas contaminadas por *sunlint* nas imagens D (áreas d1, d2 e d3) e G (áreas g1 e g3). Conforme apresentado, a menor amplitude de reflectância ao longo dos transectos caracteriza o melhor desempenho do método de Goodman et al. (2008) frente aos outros métodos testados. Este algoritmo mostrou os perfis mais horizontais e apresentou as diferenças entre as médias mais próximas a zero, homogeneizando assim os valores de reflectância das áreas contaminadas com as áreas livres de *sunlint*. Os valores médios negativos significam que este método removeu mais sinal das áreas contaminadas do que das áreas livres de *sunlint*. Tanto o método de Kutser et al. (2009) quanto o método de Kutser et al. modificado apresentaram maiores diferenças entre as médias das áreas avaliadas em todos os comprimentos de onda, não sendo capazes de uniformizar os valores de reflectância entre as áreas avaliadas. Na área g1 observa-se que o método de Kutser et al. (2009) sobrecorrigiu o efeito do *sunlint*, evidenciado pelos valores negativos distantes de zero. Os valores negativos encontrados para o método de Kutser et al. modificado foram ocasionados por valores de reflectância negativos acarretados por ruídos na imagem D. Com base nessa análise, foi possível afirmar que o método de Goodman et al. (2008) foi mais eficiente que os demais métodos testados na remoção do *sunlint* das imagens hiperespectrais.

Tabela 4.2 - Diferença entre as médias dos valores de reflectância entres duas áreas, uma livre e outra contaminada por *sunlint*, ambas representando massas de água homogêneas para 5 comprimentos de onda (λ), onde n é o número de pixels de cada ROI avaliada.

Área	λ	n	Diferença entre as médias			
			Original	Goodman	Kutser	Kutser mod.
d1	460 nm	30	0,0293	-0,0072	0,0137	0,0198
	548 nm	30	0,0328	-0,0036	0,0133	0,0242
	638 nm	30	0,0342	-0,0022	0,0161	0,0231
	753 nm	30	0,0362	-0,0002	0,0194	0,0230
	860 nm	30	0,0347	-0,0018	0,0190	0,0222
d2	460 nm	30	0,0236	-0,0052	0,0267	0,0193
	548 nm	30	0,0253	-0,0042	0,0084	0,0243
	638 nm	30	0,0273	-0,0022	0,0124	0,0286
	753 nm	30	0,0295	-0,0002	0,0144	0,0290
	860 nm	30	0,0275	-0,0022	0,0122	0,0259
d3	460 nm	30	0,0152	-0,0072	0,0054	-0,0122*
	548 nm	30	0,0173	-0,0051	0,0055	-0,1248*
	638 nm	30	0,0181	-0,0042	0,0078	-0,1154*
	753 nm	30	0,0220	-0,0003	0,0114	0,1251
	860 nm	30	0,0215	-0,0009	0,0113	0,1338
g1	460 nm	30	0,0147	-0,0049	-0,2303	0,0076
	548 nm	30	0,0109	-0,0088	-0,5544	0,0006
	638 nm	30	0,0058	-0,0138	-0,3918	0,0026
	753 nm	30	0,0184	-0,0012	-0,0498	0,0097
	860 nm	30	0,0182	-0,0014	-0,0513	0,0086
g3	460 nm	30	0,0123	-0,0020	0,0073	0,0524
	548 nm	30	0,0145	0,0002	0,0102	0,0492
	638 nm	30	0,0170	0,0028	0,0131	0,0626
	753 nm	30	0,0145	0,0002	0,0078	0,0619
	860 nm	30	0,0136	-0,0007	0,0073	0,0587

* Valores médios negativos devido a valores de reflectância negativos, ocasionados por ruídos encontrados na imagem.

Outro fator que pode ter contribuído para o melhor desempenho do método de Goodman et al. (2008) é o fato de que o *sunlint* apresenta forte variação espacial, causada pela rugosidade da água (CAVALLI, 2006). A habilidade em realizar esta correção de maneira “pixel - a - pixel” pode ter sido fundamental para que o algoritmo de Goodman et al. (2008) apresentasse uma melhor performance quando comparado aos métodos de Kutser et al. (2009) e Kutser

et al. modificado, os quais corrigem as imagens baseados em espectros de reflectância extraídos de apenas duas regiões de referência.

4.3. Avaliação da geometria de aquisição das imagens na ocorrência de *sunlint*

A geração das imagens-resíduo permitiu a avaliação da distribuição espacial do *sunlint* em cada cena (Figura 4.7). Por representarem os maiores valores de número digital, as áreas contaminadas por *sunlint* apresentam-se esbranquiçadas nas imagens, enquanto que os pixels mais escuros representam as áreas livres de *sunlint*. Observou-se na distribuição das linhas de voo que as imagens A e B, adquiridas com os maiores AZS, são as que menos sofrem os efeitos do *sunlint*. As áreas mais claras na imagem B são oriundas de ruídos e na imagem, devido a baixa relação sinal/ruído e não devido aos efeitos de *sunlint*. Nas demais linhas de voo, esse efeito ocorre predominantemente nas bordas, a leste das imagens com direção de voo norte (imagens D, E e G) e nas margens ao norte das cenas orientadas a noroeste (imagens C e F).

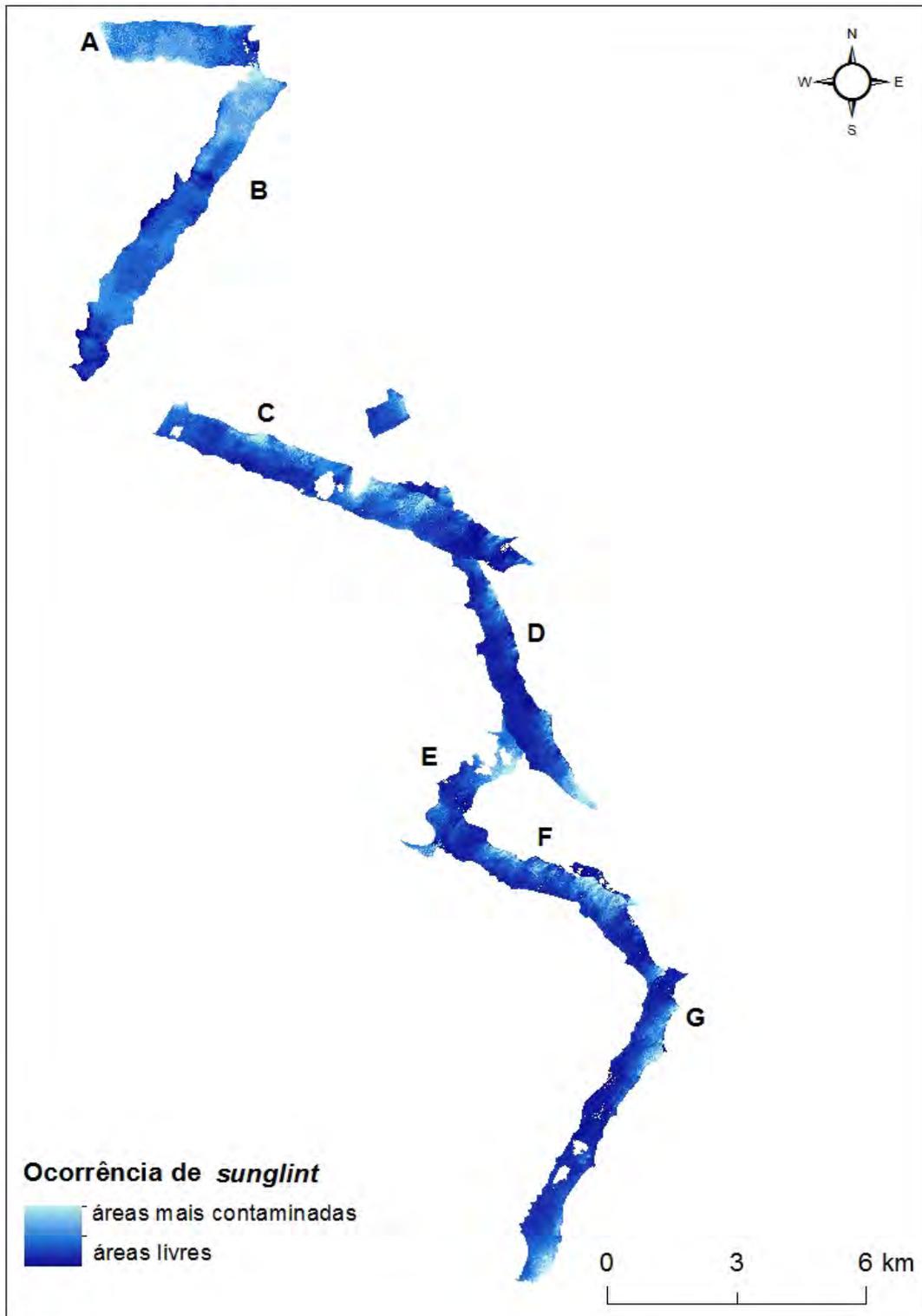


Figura 4.7 – Imagens-resíduos resultantes da aplicação do método de Goodman et al. (2008), evidenciando a ocorrência e a distribuição espacial do *sunlint*, nas imagens SpectTIR, no reservatório de Ibatinga, SP.

A análise dos *boxplots* das imagens-resíduo possibilitou a interpretação de tendências quanto à distribuição do *sunlint* em relação aos AZS (θ) e AZR (ω)

(Figura 4.8). Foi plotado o logaritmo natural das imagens-resíduos, destacando-se a tendência de aumento da mediana e da ocorrência de *outliers* com a diminuição do AZS (Figura 4.8A). Isso indica que, para os ângulos zenitais maiores, os efeitos do *sunlint* na imagem são menos evidentes, resultado que corrobora a literatura existente para sensores com visada no nadir (KAY et al., 2009; MILLER et al.; 2012). Quando o AZS é elevado, o ângulo de reflexão da luz é maior do que o ângulo de visada (MOUNT, 2005), e a radiação refletida de forma especular não atinge diretamente o FOV do sensor. As cenas com AZS entre 30° e 39° foram mais contaminadas por essas feições, principalmente nas bordas das imagens na região de retroespalhamento da radiação, onde o valor do ângulo zenital instantâneo de visada (próximo a -24°) estava mais próximo ao AZS.

Essa mesma avaliação também foi feita em relação aos AZR de cada cena (Figura 4.8B), normalizados entre 0° e 180°, evitando assim o efeito causado pela equivalência dos ângulos. Mustard et al. (2001) e Dekker et al. (2001) elucidam que, para evitar a ocorrência de *sunlint*, o sensor deve apresentar AZR próximos a 180° ou 0° (na direção contrária ou na direção do Sol). A imagem obtida com o $\omega = 6,7^\circ$ foi a que apresentou menor efeito de *sunlint*, seguida pela imagem com o ângulo $\omega = 53,4^\circ$. Contudo, as imagens mencionadas foram adquiridas com os ângulos zenitais maiores, podendo ser atribuído a esse fato, e não ao ângulo azimutal, a menor ocorrência de *sunlint* nas cenas. Embora os resultados obtidos tenham mostrado que as imagens adquiridas próximas aos ângulos azimutais relativos sugeridos pela literatura são realmente menos afetadas pelo *sunlint*, nesse caso mais próxima a 0°, não foi possível observar nesse estudo uma relação entre a ocorrência do *sunlint* e os ângulos referentes à direção de voo do sensor.

Através da análise dos *boxplots* fica clara a maior importância do ângulo zenital solar na presença do *sunlint* em imagens de alta resolução espacial adquiridas por sensores aerotransportados, quando comparado com a influência do ângulo azimutal relativo. Neste sentido, cabe também ressaltar que a ocorrência do *sunlint* é função ainda da intensidade e direção do vento, mesmo estando essa análise fora do escopo do presente estudo.

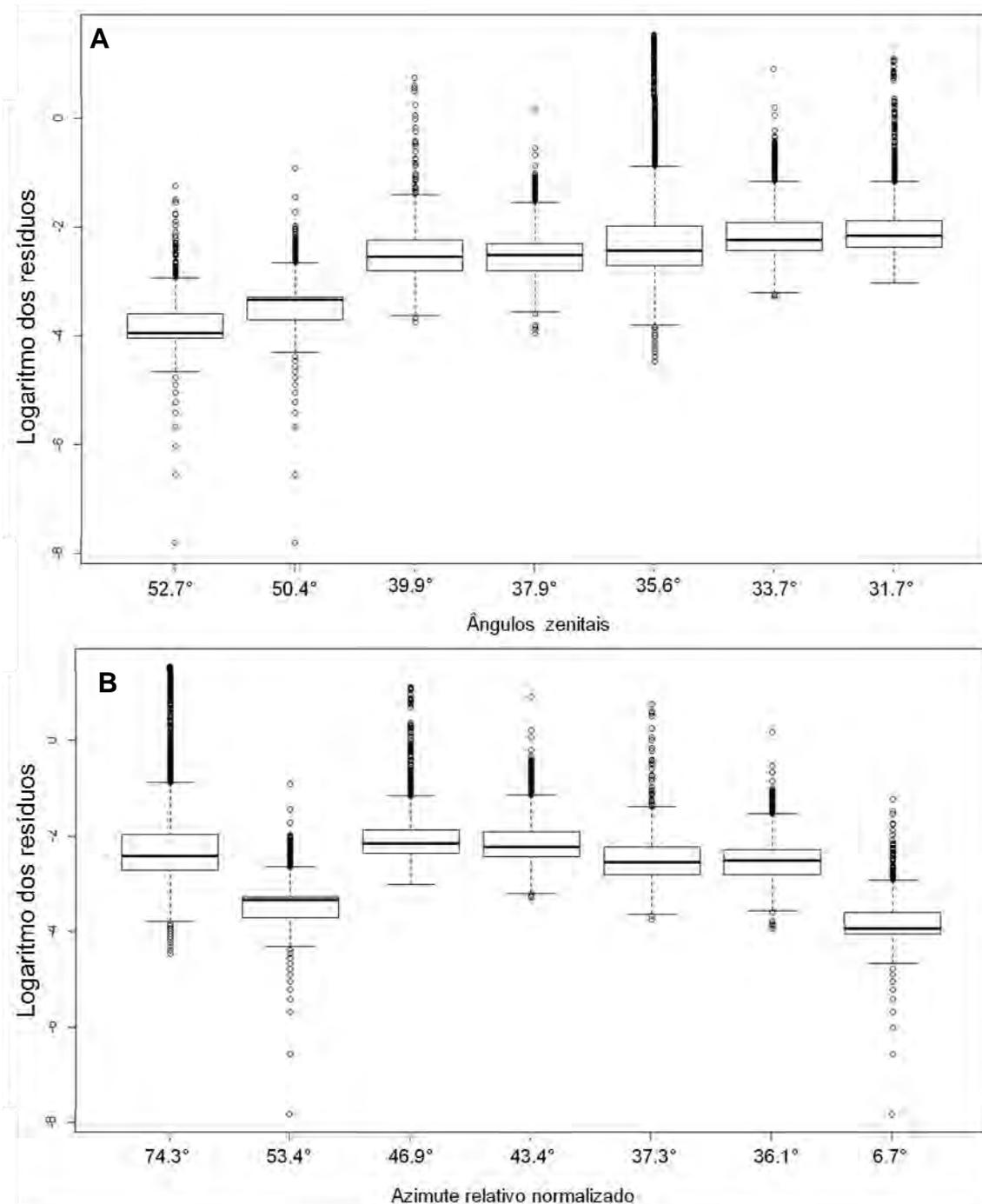


Figura 4.8 - Boxplot com o logaritmo natural dos resíduos (método de Goodman et al., 2008) das imagens do sensor aerotransportado SpecTIR. **A)** Ocorrência de *sunlint* em relação aos ângulos zenitais solares e **B)** Ocorrência de *sunlint* em relação aos ângulos azimutais relativos.

O fatiamento das imagens-resíduo, realizado com base nos valores de pixels, mostra claramente a ocorrência e a intensidade do *sunlint* em cada cena adquirida (Figura 4.9).

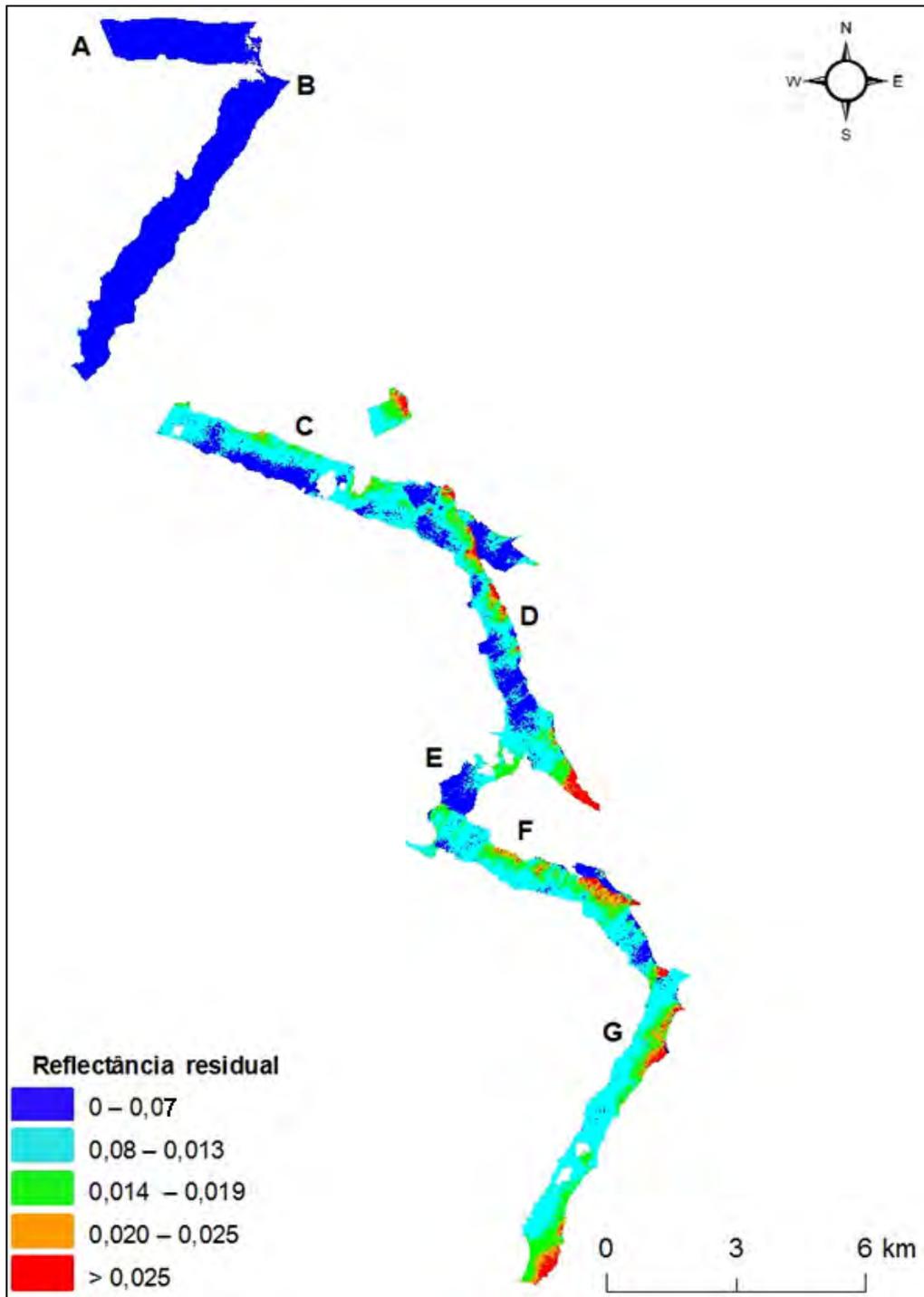


Figura 4.9 – Fatiamento das imagens-resíduo evidenciando a distribuição espacial e a intensidade do *sunlint*, nas imagens SpecTIR.

Por meio da análise das imagens fatiadas, foi possível quantificar quanto cada cena foi afetada pelo *sunlint* e em qual grau de intensidade (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). As imagens A e B foram dominadas pela classe azul, ou seja, não foram afetadas por *sunlint*. A contribuição das demais classes nessas duas cenas deve-se principalmente a ruídos, bem como a

possível presença de macrófitas nas bordas das áreas de água, visto que são nessas áreas que ocorrem os pixels com maior número digital. A cena mais contaminada por *sunlint* foi a imagem F, seguida pelas imagens D e C. As imagens F e C possuem a mesma orientação. Apesar de estarem bastante contaminadas, os efeitos do *sunlint* são na sua maior parte oriundos da classe verde, ou seja, apresentam uma intensidade moderada. Por outro lado, a imagem G não apresenta uma área relativamente grande contaminada por *sunlint*, mas cerca de 62% da área afetada é composta pelo *sunlint* com maior grau de intensidade. Para tais áreas, conforme mostrado no item 4.2, os efeitos de *sunlint* podem não ser totalmente removido pelos métodos usuais de correção disponíveis.

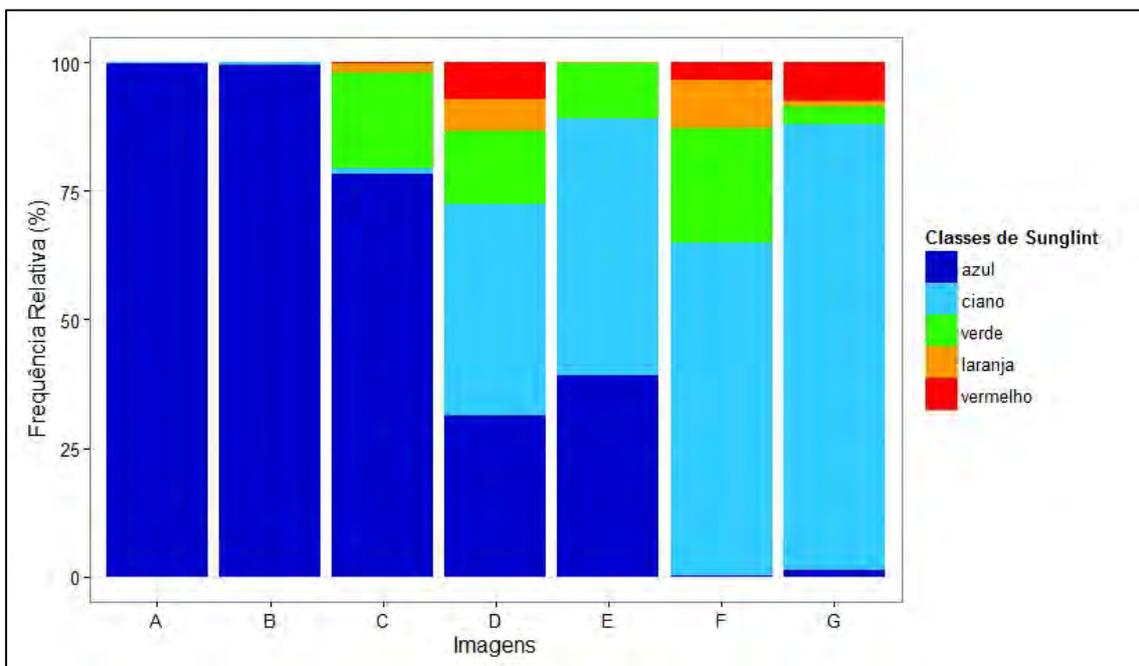


Figura 4.10 - Frequência relativa (%) das classes de intensidade de *sunlint* em cada uma das cenas. O *sunlint* total foi contabilizado pelo somatório das classes verde, laranja e vermelho.

Apesar de o AAR receber uma menor importância quanto à ocorrência de reflexão especular nas imagens, sabe-se que esta variável está relacionada com a distribuição espacial do *sunlint* (MOUNT, 2005). A sobreposição entre as cenas, que apresentem AZS e AAS próximos, permite a avaliação da influência da direção de voo (AAR) na distribuição de *sunlint*. Nas imagens D e G sobrepostas observa-se a diferença na distribuição espacial da intensidade

do *sunlint* nas cenas (Figura 4.10). As imagens D e G possuem AZS ($35,6^\circ$ e $31,7^\circ$ respectivamente) e AAS ($79,4^\circ$ e $76,3^\circ$ respectivamente) muito similares, porém AAR diferentes ($74,3^\circ$ e $133,1^\circ$, respectivamente). As porcentagens de área afetadas por *sunlint* são muito próximas entre as cenas D e G, sendo que a imagem G apresenta uma porcentagem um pouco maior. Entretanto, as áreas do recorte da imagem D são afetadas com maior intensidade (Tabela 4.3). Como os AZS e AAS são bastante próximos, essa diferença pode ser devida ao AAR, sendo que o menor AAR acarreta em contaminações por *sunlint* mais severas.

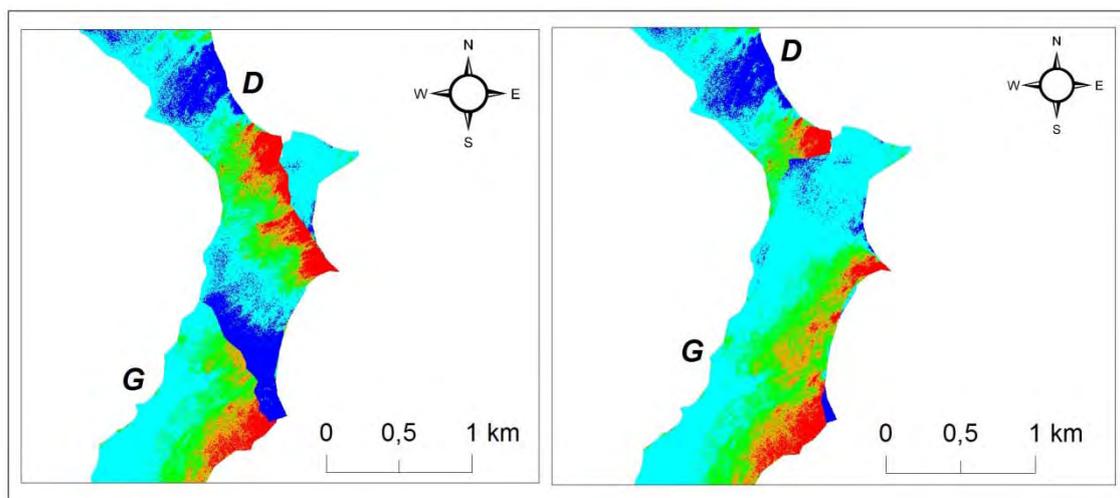


Figura 4.11 – Recorte da área em comum entre as imagens D e G. À direita a imagem D sobreposta a imagem G; À esquerda a imagem G sobreposta a imagem D.

Tabela 4.3 - Frequência relativa (%) das classes de intensidade de *sunlint* em um recorte das imagens D ($\theta = 35,6^\circ$ e $\omega=79,4^\circ$) e G ($\theta = 31,7^\circ$ e $\omega=79,4^\circ$).

Imagem/ Classe	D	G
azul	22,4850	1,9645
ciano	38,5243	58,1242
verde	19,6830	24,6190
laranja	9,03287	12,5188
vermelho	10,2746	2,7732
<i>Sunlint</i> total	38,9905	39,9111

As imagens C e D possuem AZS ($37,9^\circ$ e $35,6^\circ$, respectivamente) e AAS ($80,7^\circ$ e $79,4^\circ$, respectivamente) muito similares, porém, AAR diferentes ($216,1^\circ$ e $74,3^\circ$, respectivamente). Na região de sobreposição entre essas duas imagens

fica evidente a influência geometria de aquisição dos dados no sinal que chega até o sensor (Figura 4.11). No recorte avaliado, observa-se que a imagem C sofre menores influências do *sunlint*, sendo que cerca de 95% do recorte analisado está livre de *sunlint* e que, quando presente, exibe uma intensidade moderada (Tabela 4.4). A imagem D por sua vez, apresenta cerca de 37% do recorte afetado, com áreas de intensa contaminações por *sunlint*.

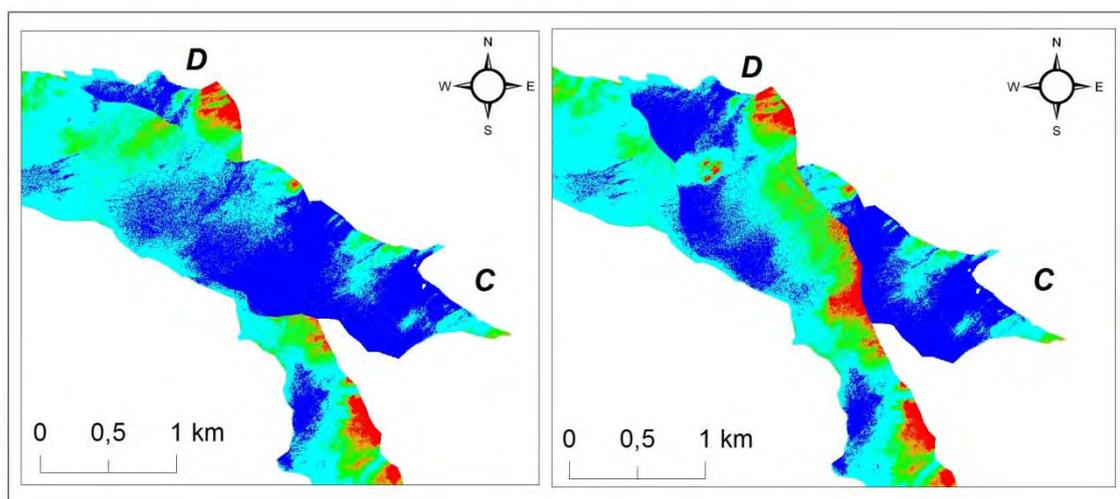


Figura 4.12 – Recorte da área em comum entre as imagens D e C. À direita a imagem C sobreposta a imagem D; À esquerda a imagem D sobreposta a imagem C.

Tabela 4.4 - Frequência relativa (%) das classes de intensidade de *sunlint* em um recorte das imagens D ($\theta = 35,6^\circ$ e $\omega=79,4^\circ$) e C ($\theta = 37,9^\circ$ e $\omega=83,7^\circ$).

Imagem/ Classe	D	C
azul	20,2070	60,3645
ciano	42,1294	35,7987
verde	21,1947	3,1586
laranja	9,5	0,5793
vermelho	6,9687	0,0987
<i>Sunlint</i> total	37,6634	3,8367

As imagens F e D possuem AZS ($31,6^\circ$ e $35,6^\circ$, respectivamente) , AAS ($77,9^\circ$ e $79,4^\circ$, respectivamente) e AZR ($223,4^\circ$ e $74,3^\circ$, respectivamente). Nessa área avaliada, a imagem F está bem mais contaminada por *sunlint* que a imagem D, tanto em porcentagem total de área afetada quanto em intensidade de *sunlint* na imagem (Figura 4.12 e Tabela 4.5).

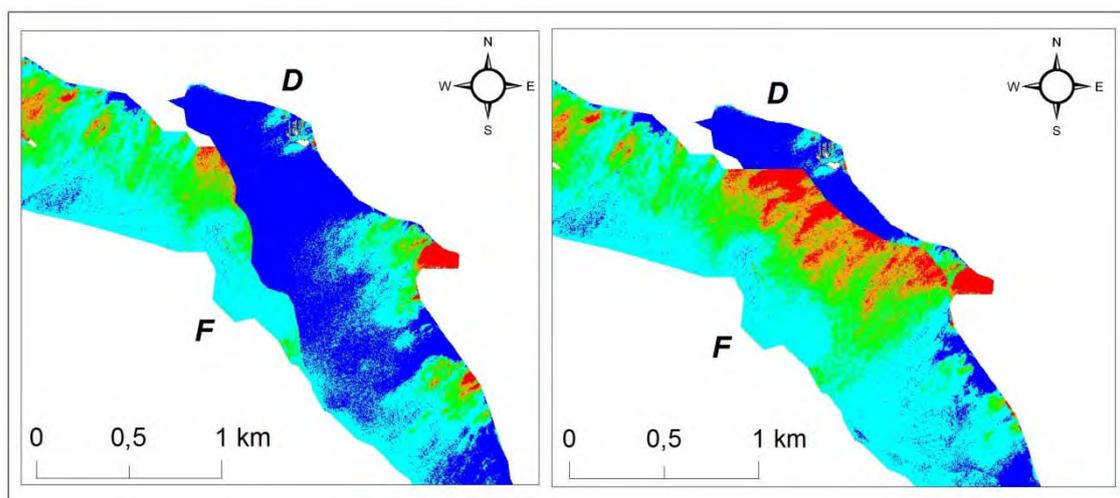


Figura 4.13 – Recorte da área em comum entre as imagens F e D. À direita à imagem D sobreposta a imagem F; À esquerda a imagem D sobreposta a imagem F.

Tabela 4.5 - Frequência relativa (%) das classes de intensidade de *sunlint* em um recorte das imagens F ($\theta = 31,6^\circ$ e $\omega=77,9^\circ$) e C ($\theta = 37,9^\circ$ e $\omega=83,7^\circ$).

Imagem/ Classe	F	D
azul	1,0864	69,6628
ciano	34,7111	24,3777
verde	28,4942	5,0385
laranja	23,8279	0,6312
vermelho	11,8802	0,2894
<i>Sunlint</i> total	64,2024	5,9593

Dentre os recortes das imagens D/G e C/D avaliadas, observou-se uma tendência na qual o menor AAR acarretou em feições mais severas de *sunlint* nas imagens. No entanto, quando analisada a sobreposição das imagens F/D, essa tendência não pode ser comprovada, pois a imagem F, a qual possui um AAR maior que a imagem D, apresenta não só mais áreas afetadas, como intensidades maiores de *sunlint*, contradizendo os resultados anteriores. Mount (2005) observou que para fotografias aéreas oriundas de câmeras aerotransportadas, obtidas com ângulos zenitais solares maiores que 30° , o *sunlint* se distribuiu na direção do azimute solar. Os resultados encontrados nesse estudo não revelam essa tendência para imagens hiperspectrais de alta resolução espacial, assim como não foi possível avaliar precisamente a influência do AAR na distribuição espacial do *sunlint*.

4.4. Análise dos efeitos do *sunlint* na caracterização dos COAs

As imagens adquiridas no início da manhã (ângulos zenitais maiores) são menos propensas aos efeitos do *sunlint*, conforme demonstrado na seção anterior. O aumento no AZS se traduz em um caminho óptico mais longo através da atmosfera, elevando a atenuação e reduzindo a quantidade total de radiação incidente. Além disso, ângulos de incidência maiores aumentam a reflexão na superfície da água, reduzindo a penetração e interação do feixe de luz com a coluna de água (KIRK, 2011). Estes efeitos podem resultar em uma quantidade final de radiação menor do que a necessária para a sensibilização adequada do sistema sensor utilizado (determinada pela relação sinal/ruído). Isso dificulta a obtenção de uma resposta radiométrica clara do objeto de estudo (MOUNT, 2005; KIRK 2011). Este efeito pôde ser observado no presente estudo, ao se avaliarem as relações entre os COAs medidos em campo e a resposta radiométrica nas regiões mais sensíveis à presença destas substâncias no espectro eletromagnético. Imagens adquiridas em AZS acima de 40° apresentaram relações diferentes com os COAs do que as imagens adquiridas com AZS menores que 40° (Figuras 4.13 e 4.14).

Os valores de reflectância em 662 nm, associados aos teores de clorofila, formam dois grupos distintos de amostras quando classificadas de acordo com o AZS, definidos por AZS maiores e menores do que 40° (Figura 4.13A). Este resultado pode ser explicado pela maior incidência de radiação durante o período de aquisição das cenas com ângulos zenitais menores, bem como ao fato dessas imagens sofrerem efeitos mais acentuados de *sunlint*. Mount (2005) ressalta que câmeras com FOV de até 60°, com visada no nadir, sofrem os efeitos do *sunlint* em AZS situados entre 32 e 39°. O mesmo comportamento de dispersão dos dados pôde ser observado para os sedimentos inorgânicos em suspensão, na região de 600 nm (Figura 4.14A). As concentrações de clorofila e sedimentos inorgânicos em suspensão encontram-se no ANEXO A.

A diferença na geometria de iluminação é observada também no sinal medido é evidenciada ao se compararem os valores de reflectância associados às concentrações medidas em campo, antes e depois da aplicação da correção de

Goodman et al. (2008). Nesse caso, o algoritmo corrige os efeitos de *sunlint* minimizando também os efeitos dos diferentes ângulos de iluminação em cada cena. Nos dados originais, a relação entre reflectância e concentração dos COAs não se evidencia para dados não corrigidos medidos com mais de 40° de AZS (Figuras 4.14A e 4.15A). Após a correção do *sunlint*, os dois grupos de amostras originalmente presentes tornam-se menos definidos, tanto para clorofila-a quanto para os sedimentos inorgânicos em suspensão (Figura 4.14B e Figura 4.15B).

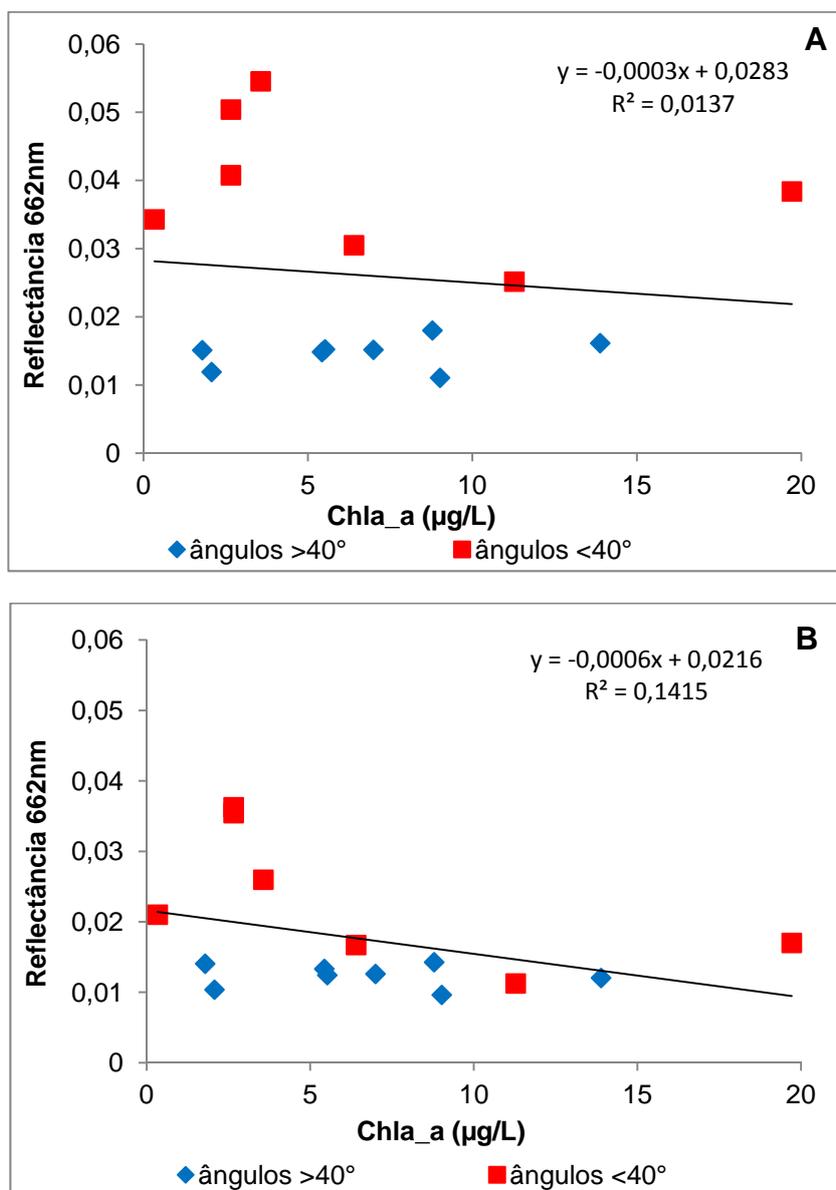


Figura 4.14 – Diagramas de dispersão dos dados de reflectância e concentração de clorofila-a (Chla_a). **A)** antes da correção para os efeitos de *sunlint* e **B)** após a correção do *sunlint* pelo método de Goodman et al (2008).

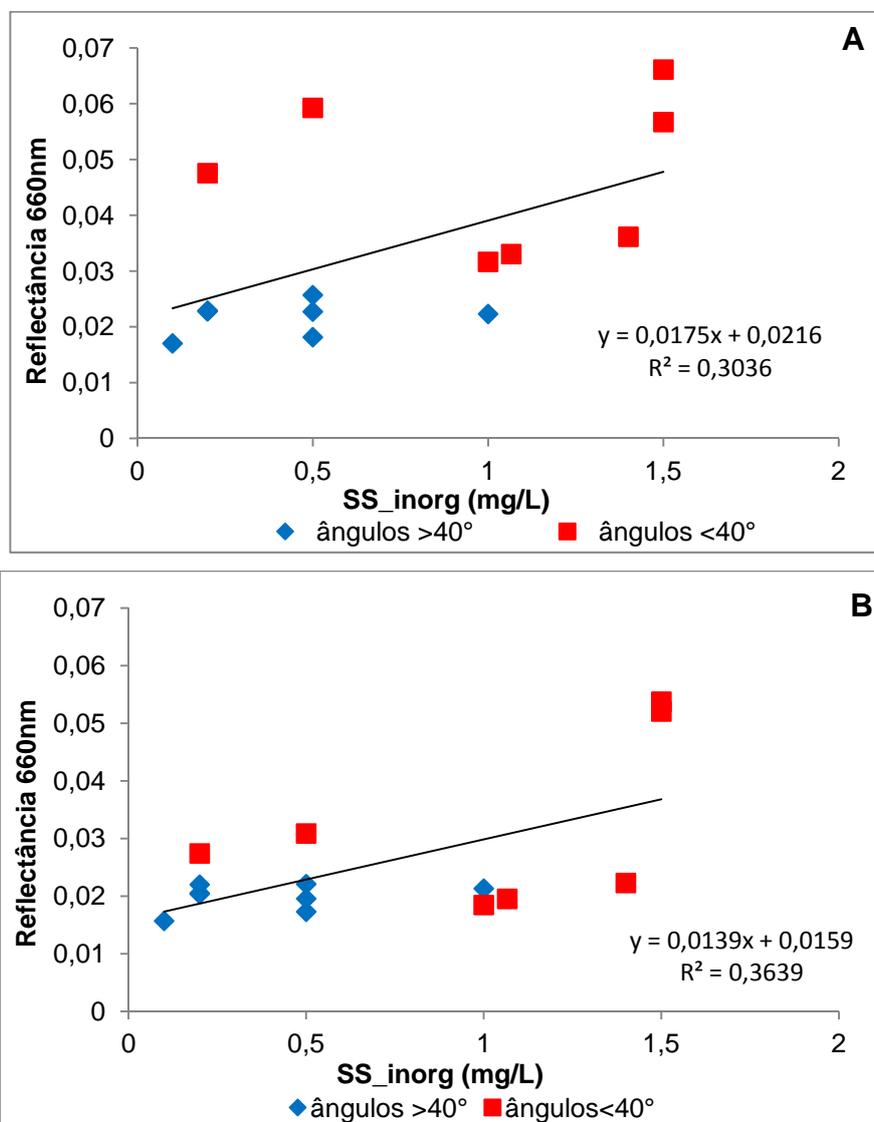


Figura 4.15 – Diagramas de dispersão dos dados de reflectância e concentração de Sedimentos inorgânicos em suspensão (SS_inorg). **A)** antes da correção para os efeitos de *sunlint* e **B)** após a correção do *sunlint* pelo método de Goodman et al (2008).

Para os ângulos acima de 40°, o coeficiente de correlação de *Spearman* entre a concentração de clorofila-a e a reflectância em 662 nm foi de $r = +0,31$ ($p = 0,457$), enquanto que para os dados oriundos de ângulos zenitais menores de 40° o coeficiente de correlação foi $r = -0,33$ ($p = 0,468$) (Tabela 4.6). Após a aplicação do algoritmo de correção de *sunlint*, o coeficiente de correlação entre os valores de reflectância e clorofila para os ângulos maiores que 40°,

tornou-se negativo ($r = -0,19$, $p = 0,163$) e foi maximizada para os ângulos menores que 40° ($r = -0,59$, $p = 0,163$). Nas correlações entre clorofila e reflectância utilizando todo o conjunto de dados, a remoção do *sunlint* também causou um aumento no valor do coeficiente de correlação, passando de $r = -0,18$ ($p = 0,530$) para $r = -0,38$ ($p = 0,167$). Apesar de elevar o valor dos coeficientes, a remoção do *sunlint* não se traduziu em relações estatisticamente significativas, dado o baixo número de amostras coletadas. Ainda assim, a dispersão dos dados na Figura 4.14B sugere a existência de correlação negativa entre os dados, onde os valores de reflectância em 662 nm tendem a diminuir com o aumento da concentração de clorofila-a. Esse fato é devido aos processos de absorção da radiação por parte desse pigmento nessa região do espectro (KIRK, 2011).

Para os sedimentos inorgânicos em suspensão, os coeficientes de correlação obtidos entre as concentrações adquiridas em campo e os dados espectrais também aumentaram após a remoção dos efeitos de *sunlint* (Tabela 4.6). Os dados espectrais adquiridos com AZS menores que 40° não apresentaram relação estatisticamente significativa nos dados originais ($r = +0,06$, $p = 0,897$). Após o *sunlint* ser removido, os coeficientes de correlação aumentaram ($r = +0,47$, $p = 0,289$). Quando o conjunto de dados completo foi analisado, o coeficiente de correlação após a remoção de *sunlint* também aumentou, passando de $r = +0,58$ ($p = 0,024$) para $r = +0,61$ ($p = 0,015$), mostrando a existência de uma relação entre a concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão e a reflectância em 600 nm. De acordo com Kirk (2011), a região entre 600 e 700 nm é sensível a baixas concentrações de sedimentos em suspensão na coluna de água.

A falta de significância estatística nos casos analisados se deve ao número amostral reduzido, disponível para o presente trabalho, especialmente quando as avaliações são feitas separadamente para cada ângulo zenital (oito pontos para os AZS maiores de 40° e sete para os ângulos menores do que 40°).

Tabela 4.6 - Coeficiente de correlação de Spearman (r) entre alguns COAs e a reflectância de superfície originária das imagens SpectTIR, nos diferentes AZS avaliados. Chla_a: Clorofila; SS_inorg: Sedimentos inorgânicos em suspensão; p -valor: valor de significância da correlação.

Condição	Variáveis	AZS >40°		AZS <40°		Todos os pontos	
		r	p -valor	r	p -valor	r	p -valor
<i>sunlint</i>	Chla_a x 662nm	0,31	0,457	-0,33	0,468	-0,18	0,530
<i>deglint</i>	Chla_a x 662nm	-0,19	0,797	-0,59	0,163	-0,38	0,167
<i>sunlint</i>	SS_inorg x 600nm	0,22	0,613	0,06	0,897	0,58	0,024
<i>deglint</i>	SS_inorg x 600nm	0,30	0,473	0,47	0,289	0,61	0,015

Relações empíricas, baseadas em modelos lineares, são muito utilizadas para a estimativa da concentração de COAs a partir de imagens de sensoriamento remoto. Os resultados acima evidenciam que o *sunlint* pode obscurecer a relação entre a concentração dos COAs e a informação espectral. Sua correção permite a obtenção de melhores coeficientes de correlação, e por consequência, um melhor ajuste dos modelos. Resultados similares foram observados por Goodman et al. (2008), não para a estimativa de concentrações de COA, mas para a estimativa de profundidade de corpo d'água, a partir de dados de sensores LiDAR (*Light Detection And Ranging*). Também neste caso, os dados sem correção de *sunlint* apresentaram coeficientes de correlação menores (entre 0,13 e 0,89) do que os coeficientes obtidos a partir dos dados corrigidos (0,79 a 0,91).

Apesar da falta de significância estatística, os resultados encontrados sugerem que a escolha do melhor AZS para a aquisição de imagens de ambientes aquáticos representa um *trade-off* entre sensibilidade à ocorrência de *sunlint* e a maximização do sinal radiométrico. As imagens adquiridas com ângulos zenitais maiores mostraram-se menos suscetíveis aos efeitos do *sunlint*, porém foram mais afetadas pela redução no sinal e na relação sinal/ruído, dificultando a caracterização da variabilidade dos COAs da água. Uma vez que os efeitos da geometria de iluminação puderam ser corrigidos satisfatoriamente, como demonstrado pelo presente estudo, mas não existem

maneiras para se compensar a redução na relação sinal/ruído, a aquisição de imagens com ângulos zenitais baixos (até 40°) é recomendada.

5 CONCLUSÕES

A partir do presente estudo foi possível caracterizar a influência da geometria de aquisição de dados obtidos por sensores remotos aerotransportados na ocorrência e distribuição espacial do *sun glint* em imagens hiperespectrais de alta resolução espacial. Os dados oriundos do sensor SpecTIR permitiram avaliar a influência do *sun glint* nas relações empíricas entre reflectância e os COAs amostrados no reservatório de Ibitinga. Com isso, foi possível elucidar os efeitos indesejáveis deste componente espúrio da radiação em estudos voltados a qualidade da água.

Com relação à ocorrência, tipo e magnitude do *sun glint* nas imagens SpecTIR, pôde-se concluir que:

(1) O *sun glint* afeta não só os aspectos visuais das imagens, mas também sua qualidade radiométrica, elevando os valores de reflectância em até 3% do que o esperado para alvos aquáticos.

(2) Nas imagens adquiridas no reservatório de Ibitinga, o *cross-track glint* foi dominante, ocorrendo na direção principal de retroespalhamento do campo de visada do sensor.

Na avaliação do desempenho dos métodos testados para remoção dos efeitos de *sun glint* nas imagens SpecTIR, as conclusões obtidas foram:

(1) O algoritmo proposto por Goodman et al. (2008) produziu bons resultados quando aplicado a imagens hiperespectrais de alta resolução espacial, uma vez que aproximou a zero a amplitude dos valores de reflectância entre regiões com águas homogêneas livres e contaminadas por *sun glint*, após a correção. Com isso, o algoritmo permitiu uma melhor interpretação visual das cenas e melhorou a qualidade da informação espectral.

(2) O método de Kutser et al. (2009) reduziu os efeitos do *sun glint* como esperado, mas uma grande quantidade de *sun glint* residual restou nas áreas mais contaminadas das cenas avaliadas.

(3) O método de Kutser modificado apresentou bom resultado em apenas uma das imagens testadas. Apesar da fácil implementação, sua forte dependência da relação sinal-ruído do sensor, e sua sensibilidade ao processo de correção atmosférica, não tornam a sua aplicação adequada a muitos tipos de imagem.

(4) A abordagem dinâmica e correções independentes adotadas pelo método de Goodman et al. (2008) se apresentou como a melhor solução para mitigar os efeitos de *sunglint* em imagens hiperespectrais de alta resolução espacial, em águas opticamente complexas.

No estudo da influência da geometria de aquisição dos dados (iluminação e visada) na ocorrência e distribuição espacial do *sunglint* nas imagens SpectTIR, observou-se que:

(1) O AZS mostrou-se o fator mais importante para a ocorrência de *sunglint* nas imagens estudadas. Imagens adquiridas com AZS maiores (próximos a 50°) são menos suscetíveis a ocorrência dessas feições, enquanto que cenas com AZS entre 30° e 40° foram claramente contaminadas, principalmente nas bordas das imagens, onde o valor do ângulo zenital instantâneo de visada (próximo a 24°) se aproxima do AZS.

(2) Não foi possível realizar a caracterização e quantificação adequadas dos efeitos dos AAR na ocorrência de *sunglint* no presente estudo, uma vez que este parâmetro variou pouco entre as imagens utilizadas. No entanto, os resultados obtidos sugerem que este parâmetro não possui influência tão marcante quanto o AZS solar na ocorrência do *sunglint*.

Na avaliação dos efeitos de *sunglint* na estimativa dos COAs da água do reservatório de Ibatinga, considerando a geometria de aquisição dos dados hiperespectrais do SpectTIR, concluiu-se que:

(1) Apesar das imagens com AZS maiores terem sido menos afetadas pelo *sunglint*, a atenuação do sinal associada a estes ângulos impediu a caracterização adequada da concentração de COAs da água por meio de relações empíricas com dados espectrais. Os resultados mostram claramente

uma segregação dos dados em dois conjuntos distintos, formados por AZS acima e abaixo de 40°.

(2) Apesar da falta de significância estatística nas análises de correlação, os resultados sugerem que a correção dos dados para os efeitos do *sunlint* removeu parte desta segregação, permitindo assim o uso de um único modelo e a consequente melhora nas relações observadas entre a concentração dos COAs e os valores de reflectância. Para estudos futuros, sugere-se um aumento do n amostral, a fim de validar as relações observadas neste trabalho.

Nesse sentido, a principal contribuição do presente estudo foi ressaltar que a escolha do melhor AZS para a aquisição de imagens em ambientes aquáticos representa um *trade-off* entre sensibilidade à ocorrência do *sunlint* e maximização do sinal radiométrico referente a presença dos COAs. Se o objetivo do estudo for a caracterização e mapeamento da qualidade da água, imagens com AZS maiores de 40° devem ser evitadas, pois a pouca quantidade de radiação incidente sobre a água não permite que os dados de reflectância sejam utilizados para avaliações quantitativas destas variáveis. Embora as imagens com AZS menores tenham uma maior tendência a serem contaminadas por *sunlint*, esta contaminação pode ser minimizada de maneira adequada através do uso de métodos de remoção e correção deste efeito. Saliencia-se também que o limiar de 40° resulta em parte da densidade de radiação observada para o presente estudo, realizado em uma latitude subtropical, durante o início da primavera. É possível que, para estudos realizados sob condições de maior densidade de fluxo de radiação, este ângulo crítico possa ser maior.

Apesar da influência da direção de voo não ter sido completamente quantificada no presente estudo, pode-se observar que sua influência na ocorrência de *sunlint* não é expressiva, quando comparada aos efeitos ocasionados pelas mudanças no AZS. Estudos anteriores sugerem que o voo seja realizado na direção direta ou reversa ao sol, e desta maneira, recomenda-se que esta diretriz seja respeitada, na medida do possível. No entanto, caso haja necessidade de direções de voo alternativas, espera-se que o impacto sobre a qualidade do imageamento seja tolerável. Também se

recomenda a utilização de sensores com FOV menor que $\pm 24^\circ$, ou que tenham a capacidade de apontamento, evitando assim o efeito de *sun glint* na região de retroespalhamento da radiação, nos locais da imagem onde os ângulos zenitais instantâneos de visada ficam muito próximos ao AZS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica de circulação da água do sistema planície de Curai/Rio Amazonas**. 2005. 286 p. (INPE- 14614-TDI/1193). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/02.22.15.03>>. Acesso em: 07 jan 2011.
- BERTELS, L.; VANDERSTRAETE, T.; VAN COILLIE, S.; KNAEPS, E.; STERCKX, S.; GOOSSENS, R.; DERONDE, B. Mapping of Coral Reefs Using Hyperspectral CASI Data; a Case Study: Fordata, Tanimbar, Indonesia. **International Journal of Remote Sensing**, 29, 2359-2391, 2008.
- BREUNIG, F. M.; WACHHOLZ, F.; PEREIRA FILHO, W.; RUDORFF, C. M.. Análise das propriedades ópticas da água do reservatório Rodolfo Costa e Silva - Itaara, RS, Brasil, usando dados espectrais de campo e imagens orbitais multiespectrais. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 2, p. 88-102, 2007.
- BURT, C. **Detection of spatially unresolved (nominally sub - pixel) submerged and surface targets using hyperspectral data**. 2012. Master of science in remote sensing intelligence - Naval Postgraduate School < <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA567072> > Acesso em: 02 jan 2013
- CASAL G.; KUTSER T.; DOMINGUES-GOMEZ J. A.; SANCHES-CARNERO N. AND FREIRE J., Mapping benthic macroalgal communities in the coastal zone using CHRIS-PROBA mode 2 images. **Estuarine Coastal Shelf Science**. 94, 281–90, 2011.
- CAVALLI, R. M., PIGNATTI, S., ZAPPITELLI, E. Correction of sun glint effect on MIVIS data of the Sicily campaign in July 2000, **Annals of Geophysics**, 49(1), 277-286, 2006.
- CEPAGRI - CENTRO DE PESQUISAS CLIMÁTICAS E METEOROLÓGICAS APLICADAS A AGRICULTURA. A classificação climática de Koeppen para o estado de São Paulo. **Disponível em:** <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>. Acesso em 10 nov. 2011.
- CESP – COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO. Disponível em: < <http://www.cesp.com.br/portalCesp/portal.nsf/V03.02/Empresa-Historia?OpenDocument>>. Acesso em: 14 mar. 2012.
- CHEN, Z., LI, Y., & PAN, J. Distributions of colored dissolved organic matter and dissolved organic carbon in the Pearl River Estuary, China. **Continental Shelf Research**, 24(16), 2004.
- CLARK, R.N.; ROUSH, T.L. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. **Journal of Geophysical Research**. v. 89, n. B7, p. 6329-6340, July 10, 1984.
- COX, C., MUNK, W. Statistics of the sea surface derived from sun glitter. **Journal of Marine Research**, 13(2):198–227, 1954.

DEKKER AG; PETERS SWM. The use of the Thematic Mapper for the analysis of eutrophic lakes: a case study in the Netherlands. **International Journal of Remote Sensing**.14(5):799–821. 1993.

DEKKER, A. G.; BRANDO, V. E.; ANSTEE, J. M.; PINNELL, N.; KUTSER, T.; HOGENBOOM, H. J.; ASTERKAMP, R.; PETERS, S. W. M.; C. OLBERT, R. J. VOS.; MALTHUS, T. J. **Imaging spectrometry of water, Imaging Spectrometry: Basic principles and prospective applications**, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 307-359.

DEKKER, A.G.; MALTHUS, T. J.; HOOGENBOOM, H. J. The Remote Sensing of Inland Water Quality. In: Danson, F. M., Plummer, S. E. **Advances in Environmental Remote Sensing**. England: John Wiley & Sons. p.123-142, 1995.

FERREIRA, R. D.; ARNESSEN, A. S.; BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M. Avaliação do sensor hiperespectral SpecTIR na discriminação de diferentes concentrações de clorofila-a no Reservatório de Ibitinga-SP. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** Curitiba, 2011.

FRISTON, K. Ten ironic rules for non-statistical reviewers. **NeuroImage**, 61(4), 1300–10, 2012.

GALVÃO, L.S. Métodos para Análise de Espectros de Reflectância. In: Paulo Roberto Meneses; José da Silva Madeira Netto. (Org.). **Sensoriamento Remoto: Reflectância de Alvos Naturais**. 1ed.Brasília: Editora Universidade de Brasília/Embrapa Cerrados, 2001, v. , p. 225-247.

GATEBE, C., KING, M., LYAPUSTIN, A., ARNOLD, G., AND REDEMANN, J. Airborne spectral measurements of ocean directional reflectance. **Journal of the Atmospheric Sciences**, 62(4):1072–1092, April 2005.

GIARDINO, C., BRESCIANI, M., PILKAITYTE, R., BARTOLI, M., & RAZINKOVAS, A. In situ measurements and satellite remote sensing of case 2 waters: First results from the Curonian Lagoon. **Oceanologia**, 52(2), 197–210. 2010.

GLEASON, A. C. R., VOSS, K. J., GORDON, H. R., TWARDOWSKI, M., SULLIVAN, J., TREES, C., WEIDEMANN, A., et al. Detailed validation of the bidirectional effect in various Case I and Case II waters. **Optics express**, 20(7), 7630–45, 2012.

GOETZ, A. F. H.. Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view, . **Remote Sensing of Environment**., vol. 113, pp. 5–16, Sep. 2009.

GOODIN, D. G. et al. Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative spectra. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 59, n.4, p. 505-510, 1993.

GOODMAN, J.A.; LEE, Z.; USTIN, S.L. Influence of Atmospheric and Sea-Surface Corrections on Retrieval of Bottom Depth and Reflectance Using a Semi-Analytical Model: A Case Study in Kaneohe Bay, Hawaii. **Applied Optics**., 47, F1-F11, 2008.

HEDLEY, J.; HARBORNE, A.; MUMBY, P. Simple and Robust Removal of Sun Glint for Mapping Shallow-Water Benthos. **Int. J. Remote Sens.**, 26, 2107-2112, 2005.

HEEDGE, T., HAUSKNECHT, P., & KOBRYN, H. Hyperspectral seafloor mapping and direct bathymetry calculation using Hymap data from the Ningaloo reef and rotnnest

island areas in western Australia. **Proceedings 5th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy**, 1–8, 2007.

HOCHBERG, E.; ANDREFOUET, S.; TYLER, M. Sea Surface Correction of High Spatial Resolution Ikonos Images to Improve Bottom Mapping in Near-Shore Environments. **IEEE Transactions Geosciences of Remote Sensing.**, 41, 1724-1729, 2003.

HOCHBERG, E.J.; MOBLEY, C. D.; , YOUNGJE P.; GOODMAN, J.; KEVIN R. T.; GAO, BO-CAI, BRUCE C. F.; GREEN, R. O.; KNOX ROBERT G.; MULLER-KARGER, F. E.; MIDDLETON E. M.; MINNET, P. J.; GENTEMANN, C.; OAIDA, B. V.; ZIMMERMAN, R. C. **Glint Characterization, Determination of Impacts on Science, and Potential Mitigation Approaches**. HysplRI *Sunglint* Report, JPL Publication 11-4, 2011.

HUNTER, P. D. et al. Hyperspectral remote sensing of cyanobacterial pigments as indicators for cell populations and toxins in eutrophic lakes. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 11, p. 2705-2718, 2010.

HUNTER, P. D., A. N. TYLER, M. PRE´ SING, A. W. KOVA´ CS, AND T. PRESTON. Spectral discrimination of phytoplankton colour groups: The effect of suspended particulate matter and sensor spectral resolution. **Remote Sensing of Environment**. 112:1527–1544. 2008.

IOCCG. Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex Waters. In: SATHYENDRANATH, S. (Ed.) **Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group**, Dartmouth, IOCCG, 2000.

JACKSON, R. D.; REGINATO, R. J.; PINTER JR., P. J.; IDSO, S. B. Plant canopy information extraction from composite scene reflectance of row crops. **Appl. Opt.**, v. 18, n. 22, p. 3775-3782, 1979.

JUPP, D. L. B., J. T. O. KIRK, and G. P. HARRIS. Detection, identification and mapping of cyanobacteria—using remote sensing to measure the optical quality of turbid inland waters. **Aust. J. Mar. Freshw. Res.** 45: 801–828. 1994.

KAY, S. **Radiative transfer modelling for sun glint correction in marine satellite imagery**. 2011. Doctor of Philosophy in Biological Sciences University of Exeter <<https://eric.exeter.ac.uk/repository/handle/10036/3523>> Acesso em 02 jan 2013.

KAY, S., HEDLEY, J.D., LAVENDER, S.. Sun glint correction of high and low spatial resolution images of aquatic scenes: a review of methods for visible and nearinfrared wavelengths. **Remote Sensing**, v. 1, 697e730, 2009.

KEITH, D. J., DRUEKE, C., SZYKMAN, J., WUSK, M., KAGEY, L., & HOWELL, C. Trophic status , ecological condition , and cyanobacteria risk of New England lakes and ponds based on aircraft remote sensing aircraft remote sensing. **Journal of Applied Remote Sensing**, 6, 1–22, 2012.

KIRK, J. T. O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**. 3.ed. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2011. 528 p.

KUTSER, T., DEKKER, A.G., SKIRVING, W. Modeling spectral discrimination of Great Barrier Reef benthic communities by remote sensing instruments. *Limnology and Oceanography* 48, 497e510, 2003.

- KUTSER, T., METSAMAA, L., STROMBECK, N., & VAHTMAE, E. Monitoring cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 67, 303–312. 2006.
- KUTSER, T., PIERSON, D.C., KALLIO, K.Y., REINART, A.; SOBEK, S. Mapping lake CDOM by satellite remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v 94, n4, p. 535-540, 2005.
- KUTSER, T.; VAHTMÄE, E.; PRAKS, J.A. Sun Glint Correction Method for Hyperspectral Imagery Containing Areas with Non-Negligible Water Leaving NIR Signal. **Remote Sensing of Environment**,. 113, 2267-2274, 2009.
- LEE Z., CARDER, K. MOBLEY, C. D., STEWARD, R. AND PATCH J.. Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization. **Applied Optics**. 38, 3831-3843,1999.
- LEE, K. R.; OLSEN R. C. AND KRUSE FRED A. Using multi-angle WorldView-2 imagery to determine ocean depth near the island of Oahu, Hawaii, , Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XVIII... **Proc. SPIE 8390**, 2012.
- LIESENBERG, V. **Análise multi-angular de fitofisionomias do bioma cerrado com dados MISR/Terra**. 2005. 120 p. (INPE-13727-TDI/1049). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1913/2005/08.03.19.56>>. Acesso em: 19 nov. 2010.
- LIU, Y.; ISLAM, M. A.; GAO, J. Quantification of shallow water quality parameters by means of remote sensing. **Progress in Physical Geography**, v. 27, n. 1, p. 24-43, 2003.
- LODHI, M.; RUNDQUIST, D.; HAN, L. The potential for remote sensing of loess soils suspended in surface waters. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 33, n. 1, p. 111-117, 1997.
- LONDE, L, R. **Comportamento espectral do fitoplâncton de um reservatório brasileiro eutrofizado – Ibitinga (SP)**. 2008. 223p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008. Disponível em:<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/08.18.12.14>>. Acesso em: 24 jun. 2011.
- LYZENGA, D.; MALINAS, N.; TANIS, F. Multispectral Bathymetry Using a Simple Physically Based Algorithm. **IEEE Transactions Geosciences of Remote Sensing**. 44, 2251-2259, 2006.
- MANTOVANI, J. E.; NOVO, E. M. L. M. Comportamento espectral da matéria orgânica dissolvida. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8. (SBSR), 1996, Salvador. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996. p. 917-924. CD-ROM. ISBN 85-17-00014-5. (INPE-6164-PRE/2253). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/1999/02.01.09.35>>. Acesso em: 09 abr. 2012.
- METSAMAA L, KUTSER T, STRÖMBECK N. Recognising cyanobacterial blooms based on their optical signature: a modelling study. **Boreal Environ Res** 11:493–506. 2006.

MILLER, C. **Evaluation of Sun Glint Correction Algorithms for High-Spatial Resolution Hyperspectral Imagery**. 2012. Master of science in remote sensing intelligence - Naval Postgraduate School < <http://hdl.handle.net/10945/17421>> Acesso em: 02 jan 2013

MOBLEY, C.D. **The optical properties of water**. New York: McGraw-Hill Book, 1994, 592p.

MOBLEY, C. D.. Estimation of remote sensing reflectance from above-surface measurements. **Applied Optics**, 38, 7442–7455. 1999.

MOREIRA, R. C. **Estudo espectral de alvos urbanos com imagens do sensor HSS (Hyperspectral Scanner System)**. 2008. 238 p. (INPE-15339-TDI/1375). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/33DFE6L>>. Acesso em: 02 jan. 2013.

MOREL, A. AND GENTILI, B.: The dissolved yellow substance and the shades of blue in the Mediterranean Sea, **Biogeosciences**, 6, 2625–2636, doi:10.5194/bg-6-2625-2009.

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

MOSES, W. J., A.A. GITELSON, R. L. PERK, D. GURLIN, D. C. RUNDQUIST, B. C. LEAVITT, T. M. BARROW, AND P. BRAKHAGE. Estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters using airborne hyperspectral data, **Water Research**, 46: 993-1004, 2012.

MOUNT, R. Acquisition of Through-water Aerial Survey Images : Surface Effects and the Prediction of Sun Glitter and Subsurface Illumination. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 71(12), 1407–1415, 2005.

MOURA, Y. M. **Influência da geometria de aquisição de dados sobre o EVI na estação seca em floresta tropical utilizando dados MISR/TERRA**. 2012. 115 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/03.09.13.23-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BG57SE>>. Acesso em: 02 jan. 2013.

MUSTARD, J.; STAID, M.; FRIPP, W. A Semianalytical Approach to the Calibration of AVIRIS Data to Reflectance Over Water Application in a Temperate Estuary. **Remote Sensing of Environment**, 75, 335-349, 2001.

MYERS J.S., MILLER R.L. Optical airborne remote sensing. In: **Remote Sensing of Coastal Aquatic Environments**, Springer. pp. 51-67. 2005.

NUSH, E. A. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. Stuttgart: **Arch. Hydrobiol.** Beih. n. 14, p. 14-39, 1980.

O'NEILL, J.D.; COSTA, T. M.; SHARMA. Remote Sensing of Shallow Coastal Benthic Substrates: In situ Spectra and Mapping of Eelgrass (*Zostera marina*) in the Gulf Islands National Park Reserve of Canada. **Remote Sensing**, 3, pp. 975–1005, 2011.

- PARK, Y., DEKKER, A., & HOCHBERG, E. Glint-aerosol discrimination using NIR-SWIR wavelengths. **HyspIRI Science Workshop**. 24-26 Aug, 2010
- PHILPOT, W. Estimating Atmospheric Transmission and Surface Reflectance From a Glint-Contaminated Spectral Image. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 45(2), 448–457, 2007.
- REVENGA, C. & Y. KURA. **Status and Trends of Biodiversity of Inland Water Ecosystems**. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, Technical Series 11 , 2003
- REYNOLDS, C.S. **Ecology of phytoplankton**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 535p.
- SU, W., T. P. CHARLOCK, AND K. RUTLEDGE: Observations of reflectance distribution around *sun glint* from a coastal ocean platform. **Appl. Opt.**, 41, 7369–7383, 2002.
- TORRECILLA, E; STRAMSKI, D.; REYNOLDS, R.A; MILLÁN-NÚÑEZ, E.; PIERA, J. Cluster analysis of hyperspectral optical data for discriminating phytoplankton pigment assemblages in the open ocean. **Remote Sensing of Environment**, v.115, p. 2578–2593, 2011.
- VAHTMÄE, E., KUTSER, T., MARTIN, G., AND KOTTA, J., Feasibility of hyperspectral remote sensing for mapping benthic macroalgal cover in turbid coastal waters – a Baltic Sea case study. **Remote Sensing of Environment**, 101: 342-351. 2006.
- VAHTMÄE, E., & KUTSER, T.. Sun glint correction of airborne AISA images for mapping shallow-water benthos. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 2008.
- VIEIRA, M. S.; FERREIRA, J. R.; CASTRO, P. M. G.; ROCHA, A.A. Aspectos da química da água e do sedimento do Reservatório de Ibitinga (São Paulo – Brasil – 21°45'S e 48° 50'W*). **Boletim do Instituto da Pesca**, São Paulo, 28 (1): 77-91, 2002.
- WANG, M. Remote sensing of the ocean contributions from ultraviolet to near-infrared using the shortwave infrared bands: simulations. **Applied optics**, 46(9), 1535–47. 2007.
- WANG, M.; BAILEY, S. Correction of Sun Glint Contamination on the SeaWiFS Ocean and Atmosphere Products. **Appl. Opt.**, 40, 4790-4798. 2001.
- WEAVER, E. C.; WRIGLEY, R. **Factors affecting the identification of phytoplankton groups by means of remote sensing**. Moffet Field: NASA, 1994. 124p.
- WETZEL, R. G., and G. E. LIKENS. 1991. **Limnological analysis**. Springer, 429p.
- WOODRUFF, D.L., STUMPF, R.P., SCOPE, J.A. AND PAERL, H.W. 1999: Remote estimation of water clarity in optically complex estuarine waters. **Remote Sensing of Environment**, 68, 41–52.
- ZHAO, J. Z.; Cao, W.; Wang, G.; Yang, D.; Yang, Y.; Sun, Z.; Zhou, W.; Liang, S. The variations in optical properties of CDOM throughout an algal bloom event. **Est. Coast. Shelf Sci.** 88: 225-232, 2009.

APÊNDICE A

Imagens das Figuras 4.3 e 4.4 em tamanho maior.



Figura A.1 - Imagem G original composição cor verdadeira (R 638 nm; G 548 nm; B 460 nm).



Figura A.2 Imagem G *deglint* obtida pelo método de Goodman et al. (2008) composição cor verdadeira (R 638 nm; G 548 nm; B 460 nm).

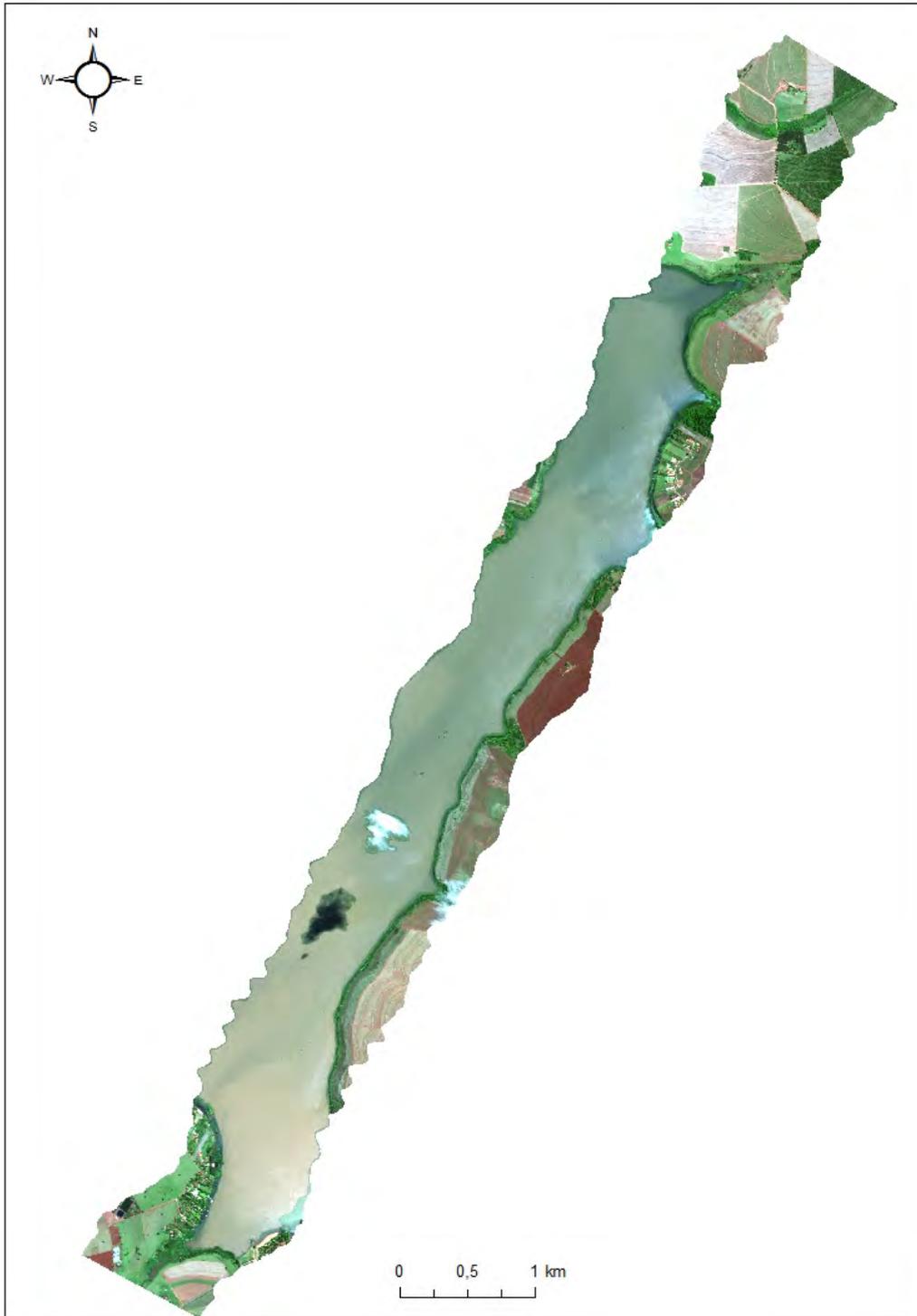


Figura A.3 - Imagem G *deglint* obtida pelo método de Kutser et al. (2009) composição cor verdadeira (R 638 nm; G 548 nm; B 460 nm).

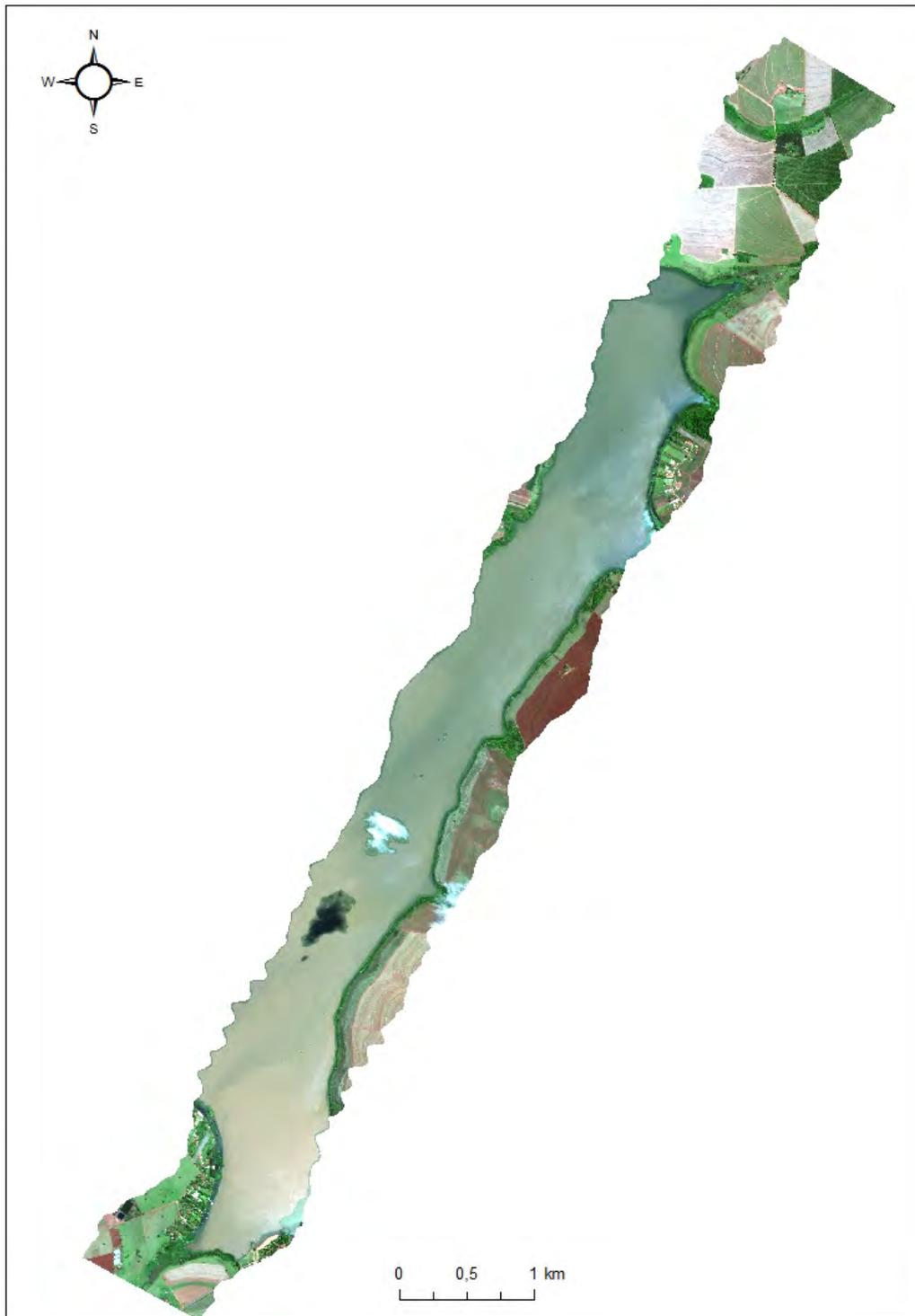


Figura A.4 - Imagem G *deglint* obtida pelo método de Kutser et al. modificado composição cor verdadeira (R 638 nm; G 548 nm; B 460 nm).



Figura A.5 - Imagem D original composição cor verdadeira (R 638 nm; G 548 nm; B 460 nm).

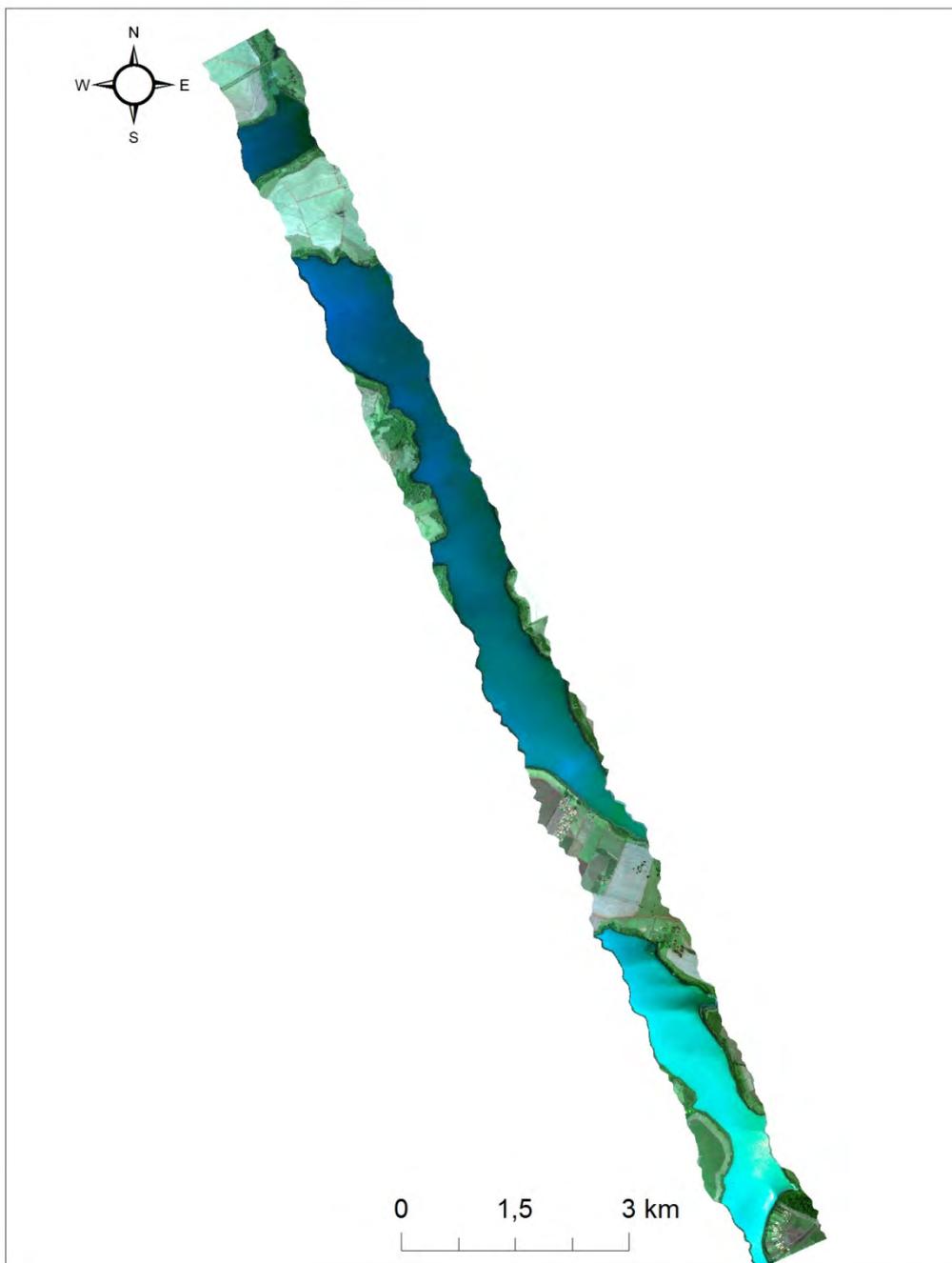


Figura A.6 - Imagem D *deglint* obtida pelo método de Goodman et al. (2008) composição cor verdadeira (R 638 nm; G 548 nm; B 460 nm).



Figura A.7 - Imagem D *deglint* obtida pelo método de Kutser et al. (2009) modificado composição cor verdadeira (R 638 nm; G 548 nm; B 460 nm).



Figura A.8 - Imagem D *deglint* obtida pelo método de Kutser et al. (2009) modificado composição cor verdadeira (R 638 nm; G 548 nm; B 460 nm).

ANEXO A

Resultados limnológicos. PT: Fósforo total; Chl_a: Clorofila-a (μL); Feof: Feoftina (mg/L); Feof/Chla : razão feoftina - clorofila-a; TSS: Sólidos totais em suspensão (mg/L); TSI: Sólidos Inorgânicos em suspensão (mg/L); TSO: Sólidos Orgânicos em suspensão (mg/L); Secchi: profundidade do Disco de Secchi (m); DTC: Carbono total dissolvido (mg/L); DIC: Carbono Inorgânico dissolvido (mg/L); DIC: Carbono Orgânico dissolvido (mg/L).

	PT	Chl_a	Feof	Feof/Chl	TSS	MSInor	MSOrg	Secchi	DTC	DIC	DOC
pt_0	0,065481	6,266	0,001656	0,264365	3,9	1	2,9	2,2	15,61	11,2	4,41
pt_1	0,095259	5,54	0,001845	0,332997	1,1	0,4	0,7	4,5	16,6	12,86	3,74
pt_2	0,096556	9,016	0,001832	0,203181	0,8	0,1	0,7	2,5	15,56	11,28	4,28
pt_3	0,058667	5,428	0,000906	0,166967	3,2	1	2,2	2,9	15,05	10,95	4,1
pt_4	0,107296	1,786	0,000588	0,328906	1,4	0,2	1,2	2,9	15,52	11,05	4,47
pt_5	0,05963	5,519	0,001548	0,280531	1,5	0,2	1,3	2,45	16,48	12,74	3,74
pt_6	0,064333	6,991	0,00244	0,349002	1,9	0,2	1,7	2,14	15,27	11,76	3,51
pt_7	0,104926	8,785	0,002771	0,315488	2,5	0,5	2	2	14,53	11,28	3,25
pt_8	0,058111	6,119	0,001412	0,230787	3,3	1	2,3	2,4	NAN	NAN	NAN
pt_9	0,137444	0,335	0,000277	0,827778	1,6	1,066	0,533	1,1	19,52	10,84	8,68
pt_10	0,119111	6,398	0,002066	0,322901	4,2	1,4	2,8	2	17	11,74	5,26
pt_11	0,10763	11,276	0,00347	0,307735	3,1	1	2,1	2,1	15,91	12,81	3,1
pt_12	0,087074	3,566	0,000977	0,273973	2,2	0,5	1,7	1,7	10,79	7,813	2,977
pt_13	0,087296	13,885	0,002775	0,199849	2,5	0,5	2	2,2	15,35	12,04	3,31
pt_14	0,133593	19,711	0,00024	0,012176	1,4	0,2	1,2	2,9	16,78	13,1	3,68
pt_15	0,094259	2,658	0,000785	0,295276	2,8	1,5	1,3	2,8	16,45	13,24	3,21
pt_21	0,041593	2,903	0,000707	0,24351	2	0,8	1,2	2,75	14,48	11,36	3,12
pt_22	0,100481	2,072	0,000888	0,428283	1,8	0,5	1,3	2,7	14,7	11,51	3,19
pt_23	0,086815	4,173	0,001269	0,304013	1,1	0,1	1	2,6	15,03	11,46	3,57
pt_24	0,076852	12,05	0,002695	0,223683	4,8	1,6	3,2	2,6	16,17	11,19	4,98

