



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/06.24.12.02-TDI

ESTUDO DA SENSIBILIDADE DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO HIPERESPECTRAIS AOS EFEITOS TOPOGRÁFICOS USANDO A CORREÇÃO-C

Lucas Maia de Oliveira

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Lênio Soares Galvão,
e Flávio Jorge Ponzoni, aprovada
em 25 de junho de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TH3D3E>>

INPE
São José dos Campos
2019

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

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

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/06.24.12.02-TDI

ESTUDO DA SENSIBILIDADE DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO HIPERESPECTRAIS AOS EFEITOS TOPOGRÁFICOS USANDO A CORREÇÃO-C

Lucas Maia de Oliveira

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Lênio Soares Galvão,
e Flávio Jorge Ponzoni, aprovada
em 25 de junho de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TH3D3E>>

INPE
São José dos Campos
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Oliveira, Lucas Maia de.
Ol4e Estudo da sensibilidade de índices de vegetação hiperespectrais aos efeitos topográficos usando a correção-C / Lucas Maia de Oliveira. – São José dos Campos : INPE, 2019.
xxiv + 89 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/06.24.12.02-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

Orientadores : Drs. Lênio Soares Galvão, e Flávio Jorge Ponzoni.

1. Índices de Vegetação Hiperespectrais. 2. Correção topográfica. 3. Hyperion/EO-1. I.Título.

CDU 528.931



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

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

Aluno (a): **Lucas Mala de Oliveira**

Título: "ESTUDO DA SENSIBILIDADE DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO HIPERESPECTRAIS AOS EFEITOS TOPOGRÁFICOS USANDO A CORREÇÃO-C"

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

Dra. Ieda Del' Arco Sanches

Ieda Del' Arco Sanches

Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Lênio Soares Galvão

L-SG

Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Flávio Jorge Ponzoni

Flávio J. Ponzoni

Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Camilo Daleles Rennó

Camilo Daleles Rennó

Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Eder Paulo Moreira

Eder Paulo Moreira

Convidado(a) / VISIONA / São José dos Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

Aprovado () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 25 de junho de 2019

*“Metafísica? Que metafísica têm aquelas árvores
A de serem verdes e copadas e de terem ramos
E a de dar fruto na sua hora, o que não nos faz pensar,
A nós, que não sabemos dar por elas.
Mas que melhor metafísica que a delas,
Que é a de não saber para que vivem
Nem saber que o não sabem?”*

Há metafísica bastante em não pensar em nada. Alberto Caeiro.

À minha mãe Aparecida, ao meu pai Cassio, às minhas irmãs e meus sobrinhos, e à
minha namorada Maria Priscila.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus orientadores, Prof. Dr. Lênio Soares Galvão e Prof. Dr. Flávio Jorge Ponzoni, por toda a dedicação, carinho e ensinamentos prestados durante todo o mestrado, os quais foram fundamentais ao meu desenvolvimento pessoal e acadêmico.

Aos meus familiares, em especial aos meus pais, por sempre apoiarem minhas decisões e por acreditarem na educação como principal meio de transformação pessoal e social.

Agradeço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, em especial, ao Dr. Eder Paulo Moreira e ao Dr. Egídio Arai pela solidariedade, atenção e disposição em me ensinar e ajudar a solucionar problemas relacionados à programação, sem os quais este trabalho não seria possível.

A todos os professores do curso de Sensoriamento Remoto, pelos ensinamentos e pela disposição em compartilhar seus conhecimentos com os demais alunos, em especial aos professores Camilo Dalele Rennó e Ieda Del'Arco Sanches, pela atenção e sugestões prestadas durante meu trabalho.

À minha namorada Maria Priscila pelo companheirismo, apoio e carinho em todos os momentos.

A todos amigos, pelos momentos de estudo e de diversão que passamos juntos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pela concessão da bolsa de estudos.

E a todos que contribuíram na minha trajetória pessoal e acadêmica até o momento.

RESUMO

Nas últimas décadas, estudos de sensoriamento remoto sobre a vegetação têm se beneficiado da melhoria na disponibilidade de dados hiperespectrais. Estes dados possibilitam a determinação de dezenas de índices de vegetação hiperespectrais (IVHs), ou de bandas estreitas, que podem ser utilizados para obter informações sobre a estrutura da vegetação, a fisiologia das plantas e a bioquímica do dossel. Todavia, em áreas de relevo acidentado, variações nas condições locais de iluminação do terreno podem afetar a determinação destes IVHs, mas praticamente não há estudos sobre suas sensibilidades aos efeitos topográficos. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi estudar a sensibilidade de 15 IVHs aos efeitos topográficos, em função de diferentes condições de iluminação do terreno, expressas pela declividade, orientação das vertentes e pelo relevo sombreado (fator cosseno). Os IVHs foram calculados a partir de uma imagem hiperespectral, obtida pelo sensor Hyperion/EO-1, em uma área de estudo composta por floresta ombrófila densa no Parque Estadual Intervales (PEI), localizado no Estado de São Paulo. Para a correção dos efeitos topográficos e comparação de IVHs corrigidos e não corrigidos, aplicou-se o método de correção-C. Em seguida, segmentou-se a área em classes topográficas, definidas pelas condições de orientação e declividade do terreno. A partir do teste estatístico de Wilcoxon, foi possível identificar quais IVHs apresentaram mudanças significativas nas diferentes condições de iluminação local do terreno. Para tal finalidade, também se determinou a taxa de mudança relativa entre dados corrigidos e não topograficamente corrigidos e a magnitude do tamanho do efeito da correção topográfica (métrica r de Cohen) sobre a determinação dos IVHs. Os resultados mostraram que os IVHs possuem sensibilidades diferentes aos efeitos da topografia, com a magnitude dos efeitos sendo dependente das regiões espectrais de operação dos índices e das condições de declividade e orientação do terreno. De forma mais específica, observou-se que: (a) a correção-C foi um método efetivo para compensar os efeitos topográficos sobre a resposta espectral da vegetação, reduzindo, em terrenos iluminados e sombreados vistos pelo sensor, o desvio-padrão da reflectância em todas as faixas espectrais do Hyperion/EO-1, assim como a correlação pré-existente da reflectância com o fator cosseno; (b) as mudanças resultantes nos valores da maioria dos IVHs, após a correção topográfica, foram estatisticamente significativas, conforme indicado pelo teste estatístico de Wilcoxon (5% de significância); e (c) os IVHs mais sensíveis aos efeitos topográficos foram *Enhanced Vegetation Index* (EVI), *Anthocyanin Reflectance Index* (ARI), *Carotenoid Reflectance Index* (CRI1) e *Photochemical Reflectance Index* (PRI), especialmente para terrenos com declividade superior a 30° e com orientação de vertentes voltadas para sul e oeste (sombreadas). *Volgemann Red Edge Index* (VOg) e *Structure Insensitive Pigment Index* (SIPI) foram os IVHs menos sensíveis aos efeitos topográficos, conforme indicado pela análise da taxa de mudança relativa entre dados corrigidos e não corrigidos e da magnitude de tamanho do efeito da correção topográfica.

Palavras-chave: Índices de Vegetação Hiperespectrais. Correção Topográfica. Hyperion/EO-1.

STUDY OF THE SENSITIVITY OF HYPERESPECTRAL VEGETATION INDICES TO TOPOGRAPHIC EFFECTS USING THE C-CORRECTION

ABSTRACT

In the last decades, remote sensing studies on vegetation have benefited from the increased availability of hyperspectral data. Such data allow the determination of dozens of hyperspectral vegetation indices (HVIs), or narrowband VIs, which can be used to obtain information on vegetation structure, plant physiology and canopy biochemistry. However, although variations in terrain illumination conditions can affect the determination of these HVIs over mountains, there are no studies on their sensitivity to topographic effects. Therefore, the objective of this work is to study the sensitivity of 15 HVIs to topographic effects, as a function of different terrain illumination conditions expressed by slope, aspect and shaded relief (cosine factor). The HVIs were calculated from a hyperspectral Hyperion/EO-1 image obtained over dense ombrophilous forest from the *Intervales* State Park, located in southeastern Brazil. The *C*-correction method was applied to reduce topographic effects and to allow comparison between corrected and non-corrected HVIs. Topographic classes of terrain illumination were defined based on slope and aspect cross-comparison. Using the Wilcoxon statistical test, we detected the most sensitive HVIs to variable terrain illumination conditions. In addition to this test, we calculated the relative changes between HVIs corrected and non-corrected for topographic effects as well as the magnitude of the effect size (Cohen's *r* metric) over the determination of the HVIs. The results showed that the HVIs had different sensitivity to topographic effects, depending on the bands used in their calculation and on the terrain slope and aspect. More specifically, it was observed that: (a) the *C*-correction compensated adequately the topographic effects on the vegetation spectral response, by reducing the standard deviation of reflectance, in shaded and sunlit surfaces and in all Hyperion bands. It also decreased the correlation between the reflectance and cosine factor on a per-band basis; (b) the resultant changes in most HVIs after topographic correction were statistically significant, as indicated by the Wilcoxon test (5% significance level); and (c) the most sensitive HVIs to topographic effects were the Enhanced Vegetation Index (EVI), Anthocyanin Reflectance Index (ARI), Carotenoid Reflectance Index (CRI1) and Photochemical Reflectance Index (PRI), especially for terrains with slope greater than 30° and aspect oriented to south and west (shaded surfaces). The Volgemann Red Edge Index (VOg) and Structure Insensitive Pigment Index (SIPI) were the less sensitive HVIs, as indicated by the small relative changes calculated between topographically corrected and non-corrected data, and by the analysis of the magnitude of the effect size of the topographic correction.

Keywords: Hyperspectral Vegetation Indexes. Topographic Correction. Hyperion/EO-1.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 3.1. Localização da área de estudo no sudeste do Estado de São Paulo, abrangendo parte do Parque Estadual Intervales (PEI). A composição colorida cor verdadeira usou as bandas do Hyperion/EO-1 posicionadas em 671 nm (R), 569 nm (G) e 487nm (B).	25
Figura 3.2. Precipitação média mensal (1990 a 2004) e variação média mensal da temperatura do ar (1996 a 2005) do Parque Estadual Intervales (PEI).	27
Figura 3.3. Altitude da área de estudo.	29
Figura 3.4. Classificação da vegetação predominante na área de estudo.	30
Figura 4.1. Metodologia de trabalho adotada para processamento e análise dos dados.	33
Figura 5.1. Imagem Hyperion/EO-1 em composição colorida cor-verdadeira, usando as bandas posicionadas em 671 nm (R), 569 nm (G) e 487 nm (B), antes (a) e após (b) a correção-C.	44
Figura 5.2. Distribuição dos valores de reflectância das bandas espectrais do Hyperion/EO-1 do (a) azul (487 nm), (b) verde (569 nm) e (c) vermelho (671 nm), antes (NC) e após (C) a correção topográfica. SD é o desvio padrão e N é o tamanho da amostra.	46
Figura 5.3. Distribuição dos valores de fator de reflectância das bandas espectrais do Hyperion/EO-1 da (a) borda vermelha (721 nm) e (b) do infravermelho próximo (864 nm), antes (NC) e após (C) a correção topográfica. SD é o desvio padrão e N é o tamanho da amostra.	47
Figura 5.4. Distribuição dos valores de fator de reflectância das bandas espectrais do Hyperion/EO-1 do infravermelho de ondas curtas 1 (1648 nm) e do infravermelho de ondas curtas 2 (2203 nm), antes (NC) e após (C) a correção topográfica. SD é o desvio padrão e N é o tamanho da amostra.	48
Figura 5.5. Relações entre o fator cosseno e a reflectância das bandas espectrais do Hyperion/EO-1 do azul (487 nm), verde (569 nm) e vermelho (671 nm)	

para dados não corrigidos (A, C, E) e corrigidos (B, D, F) dos efeitos topográficos. n é o tamanho da amostra e Valor- p se refere ao valor do teste-t a 5% de significância.....	50
Figura 5.6. Relações entre o fator cosseno e a reflectância das bandas espectrais do Hyperion/EO-1 do infravermelho próximo (864 nm) e da borda vermelha (721 nm) para dados não corrigidos (A, C) e corrigidos (B, D) dos efeitos topográficos. n é o tamanho da amostra e Valor- p se refere ao valor do teste-t a 5% de significância.....	51
Figura 5.7. Relações entre o fator cosseno e a reflectância das bandas espectrais do Hyperion/EO-1 do infravermelho de ondas curtas 1 (1648 nm) e 2 (2203 nm) para dados não corrigidos (A, C) e corrigidos (B, D) dos efeitos topográficos. n é o tamanho da amostra e Valor- p se refere ao valor do teste-t a 5% de significância.....	52
Figura 5.8. Espectros de reflectância de pixels de floresta ombrófila densa, vistos pelo Hyperion/EO-1 sob diferentes condições de iluminação do terreno. Os resultados antes (linhas em azul) e após (linhas em laranja) a correção-C são apresentados.....	54
Figura 5.9. Efeito da correção-C sobre espectros de reflectância de floresta ombrófila densa de pixels vistos pelo Hyperion/EO-1 em diferentes condições de iluminação do terreno.....	54
Figura 5.10. Variações de iluminação local do terreno no momento da aquisição da imagem Hyperion/EO1, representadas pela imagem do fator cosseno. Pixels escuros e claros indicam superfícies sombreadas e iluminadas, respectivamente.....	56
Figura 5.11. Espacialização do EVI, ARI, NDVI e LWVI2 antes (a esquerda) e após (a direita) a correção-C.....	58
Figura 5.12. Classificação da área de estudo por orientação e declividade (classes topográficas).	60
Figura 5.13. Taxa de mudança relativa dos IVHs após a correção topográfica. Os resultados são apresentados por classes de declividade e orientação de vertentes.	62

Figura 5.14. Espacialização da taxa de mudança relativa (TMR) dos IVHs EVI, ARI, LWVI2 e NDVI na área de estudo, decorrente da correção topográfica C.....	64
Figura 5.15. Magnitude de tamanho do efeito da correção topográfica sobre a determinação dos IVHs, em função das classes de iluminação local do terreno.....	68
Figura 6.1. Representação esquemática do posicionamento das principais bandas utilizadas no cálculo dos IVHs relacionados com (A) estrutura da vegetação, (B) bioquímica e (C) fisiologia das plantas.....	70

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1. Índices de vegetação hiperespectrais (IVHs) analisados neste trabalho, com suas respectivas fórmulas e referências.....	12
Tabela 4.1. Faixas de magnitude de tamanho do efeito.....	41
Tabela 5.1. Valor-p dos IVHs nas diferentes condições topográficas.	66

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ALI	<i>Advanced Land Imager</i>
APA	Área de Proteção Ambiental
ARI	<i>Anthocyanin Reflectance Index</i>
CBH-RB	Comitê da Bacia Hidrográfica do Ribeira de Iguape e Litoral Sul
CRI1	<i>Carotenoid Reflectance Index 1</i>
DF	Distrito Federal
dNBR	Índice de Taxa de Queima Diferenciada
EnMap	<i>Environmental Mapping and Analysis Program</i>
ENVI	<i>Environment for Visualizing Images</i>
EO-1	<i>Earth Observing-1</i>
ETM	<i>Enhanced Thematic Mapper</i>
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
FLAASH	<i>Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes</i>
HyspIRI	<i>Hyperspectral Infrared Imager</i>
IAF	Índice de Área Foliar
IV	Índice de Vegetação
IVH	Índice de Vegetação Hiperespectral
km	Quilômetros
LAC	<i>Linear Etalon Imaging Spectrometer Array Atmospheric Corrector</i>
Landsat	<i>Land Remote Sensing Satellite</i>
LWVI2	<i>Leaf Water Vegetation Index 2</i>
m	Metros
MDE	Modelo Digital de Elevação

MODTRAN-4	<i>Moderate Resolution Transmittance Code</i>
MSI	<i>Moisture Stress Index</i>
NDII	<i>Normalized Difference Infrared Index</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
nm	Nanometros
NPP	Rede de Produção Primária
PEI	Parque Estadual Intervales
PETAR	Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira
RENDVI	<i>Red Edge Normalized Difference Vegetation Index</i>
RS	Rio Grande do Sul
SIPI	<i>Structure Insensitive Pigment Index</i>
SP	São Paulo
SRTM	Missão Topográfica Radar Shuttle
TM	<i>Thematic Mapper</i>
USGS	Serviço Geológico Norte Americano
VARI	<i>Visible Atmospherically Resistant Index</i>
Vlg	<i>Visible Index Green</i>
VOG	<i>Volgemann Red Edge Index</i>
WGS 1984	<i>World Geodetic System</i>
PRI	<i>Photochemical Reflectance Index</i>
PRISMA	<i>PRecursores IperSpettrale della Missione Applicativa</i>
PSRI	<i>Plant Senescence Reflectance Index</i>
PSSR	<i>Pigment Specific Simple Ratio</i>

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Hipótese de trabalho.....	4
1.2 Objetivos.....	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1 A missão Earth Observing-1 e o sensor Hyperion/EO-1.....	7
2.2 Atuais e futuras missões hiperespectrais.....	9
2.3 Índices de vegetação hiperespectrais (IVHs)	11
2.3.1 <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (NDVI).....	14
2.3.2 <i>Enhanced Vegetation Index</i> (EVI)	14
2.3.3 <i>Visible Index Green</i> (Vig)	14
2.3.4 <i>Visible Atmospherically Resistant Index</i> (VARI).....	15
2.3.5 <i>Anthocyanin Reflectance Index</i> (ARI)	15
2.3.6 <i>Carotenoid Reflectance Index 1</i> (CRI1).....	15
2.3.7 <i>Leaf Water Vegetation Index 2</i> (LWVI2).....	15
2.3.8 <i>Moisture Stress Index</i> (MSI).....	16
2.3.9 <i>Normalized Difference Infrared Index</i> (NDII).....	16
2.3.10 <i>Plant Senescence Reflectance Index</i> (PSRI)	16
2.3.11 <i>Pigment Specific Simple Ratio</i> (PSSR).....	16
2.3.12 <i>Structure Insensitive Pigment Index</i> (SIPI).....	17
2.3.13 <i>Photochemical Reflectance Index</i> (PRI)	17
2.3.14 <i>Red Edge Normalized Difference Vegetation Index</i> (RENDVI).....	17
2.3.15 <i>Volgemann Red Edge Index</i> (VOG).....	18
2.4 Efeitos da topografia	18
2.5 Correção-C.....	20
2.6 Estudos e aplicações usando correção topográfica	22
3 ÁREA DE ESTUDO	25
4 METODOLOGIA	33
4.1 Seleção da área de estudo e obtenção da imagem Hyperion/EO-1	34

4.2	Pré-processamento da imagem hiperespectral	34
4.3	Correção-C	35
4.4	Análise do desempenho da correção-C	36
4.5	Seleção dos IVHs	37
4.6	Avaliação dos efeitos topográficos sobre a determinação de IVHs	38
5	RESULTADOS	43
5.1	Análise do desempenho da correção-C	43
5.1.1	Análise visual	43
5.1.2	Análise da variação da reflectância espectral com a correção-C	45
5.1.3	Análise da relação entre a reflectância espectral e o fator cosseno	49
5.1.4	Análise das mudanças das curvas espectrais da vegetação sob diferentes condições de iluminação local devido a correção-C	53
5.2	Análise da sensibilidade dos IVHs à correção topográfica em diferentes condições de iluminação do terreno	55
5.2.1	Análise visual de alguns IVHs antes e após a correção topográfica	55
5.2.2	Classes topográficas	59
5.2.3	Taxa de mudança relativa	61
5.2.4	Teste de Wilcoxon	65
5.2.5	Magnitudes de tamanho do efeito	67
6	DISCUSSÃO	69
7	CONCLUSÕES	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

1 INTRODUÇÃO

Grande parte dos estudos de sensoriamento remoto para o monitoramento da vegetação tem utilizado índices de vegetação (IVs) na análise e interpretação dos resultados. Os IVs são transformações adimensionais, calculadas a partir de relações algébricas entre dados provenientes de bandas espectrais distintas. Os IVs servem para realçar a aparência da cobertura vegetal nas imagens e para obter relações empíricas com parâmetros biofísicos ou bioquímicos da vegetação (HUETE et al., 1999). Eles são fundamentais em estudos de fenologia da vegetação a partir de técnicas de sensoriamento remoto (HMIMINA et al., 2013). Além disso, a análise do comportamento sazonal e interanual dos IVs fornece indicadores de mudanças em coberturas florestais em resposta às variações climáticas (LIANG et al., 2011; LAMBERT et al., 2013; DU et al., 2014).

Nas últimas décadas, o surgimento e o desenvolvimento de sensores hiperespectrais aerotransportados e orbitais, capazes de adquirir imagens em centenas de bandas espectrais estreitas e contíguas ao longo do espectro eletromagnético, têm possibilitado a caracterização detalhada da resposta espectral dos objetos terrestres (PLAZA et al., 2012; LIU et al., 2014; JIA et al., 2016). Com o advento da tecnologia hiperespectral, dezenas de índices de vegetação hiperespectrais (IVHs), ou de bandas estreitas, têm sido propostos (ROBERTS et al., 2012). Contudo, quando comparados com IVs tradicionais, como o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (ROUSE et al., 1973) e o *Enhanced Vegetation Index* (EVI) (HUETE, 1997), calculados a partir de dados gerados por sensores multiespectrais, poucos trabalhos estudaram a sensibilidade dos IVHs para a geometria de iluminação e de visada durante a aquisição das imagens (VERRELST et al., 2008; GALVÃO et al., 2012). Nenhum trabalho abordou os efeitos topográficos na determinação dos IVHs a partir de dados hiperespectrais orbitais.

Estudos multiespectrais têm demonstrado que a precisão dos mapeamentos temáticos em áreas serranas ou montanhosas melhora com o uso de correções

topográficas (DORREN et al., 2003; CUO et al., 2010; MOREIRA et al., 2016). Além de mapeamentos, os efeitos topográficos também afetam a estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação, como demonstrado por Chen e Cao (2012), ao usarem IVs para prever o índice de área foliar (IAF) de formações florestais e de pastagens em uma área de relevo acidentado na China.

Para IVs tradicionais de bandas largas, alguns estudos consideram *a priori* que os efeitos topográficos são reduzidos quando os índices são calculados com razões de bandas. Por exemplo, Matsushita et al. (2007) concluíram que o NDVI é menos sensível aos efeitos topográficos do que o EVI, tendo como objeto de estudo plantações de cipreste em áreas montanhosas do Japão. Outras pesquisas mostraram que esses efeitos ainda são muito significantes mesmo para o NDVI (SONG; WOODCOCK, 2003; VERBYLA et al., 2008; VERAVERBEKE et al., 2010).

No Brasil, poucos foram os trabalhos que abordaram efeitos topográficos em estudos de sensoriamento remoto (p. ex: MOREIRA; VALERIANO, 2014; PONZONI et al., 2014; GALVÃO et al., 2016; MOREIRA et al., 2016; PONZONI, 2016). Nenhum destes trabalhos foi realizado com dados hiperespectrais. A maioria dos estudos discutiu a eficiência dos métodos de correção topográfica para o mapeamento de classes de cobertura do terreno ou os efeitos de iluminação do terreno sobre a resposta espectral dos alvos em superfície usando dados Landsat. Outras investigações utilizaram imagens RapidEye para tal finalidade.

Em florestas tropicais e subtropicais brasileiras, posicionadas em médias latitudes e em áreas de relevo acidentado, os efeitos causados pela geometria de aquisição de dados e aqueles causados pelas características da topografia estão fortemente relacionados. Assim, pode-se tratar como iluminação local a soma destes efeitos (PONZONI et al., 2014).

Em florestas semi-decíduais ou decíduais das regiões sul e sudeste do Brasil, do bioma Mata Atlântica, as diferenças sazonais no ângulo zenital solar (AZS) e no ângulo azimutal solar (AAS) podem ser superiores a 30° (GALVÃO et al., 2016). A diferença nestes ângulos durante o ano faz com que a quantidade de

sombras projetadas pela topografia sobre a vegetação varie sazonalmente. Conseqüentemente, efeitos topográficos são geralmente observados em imagens de satélites nestas áreas (PONZONI et al., 2014). Além disso, mesmo em áreas em que a declividade do terreno não seja tão acentuada, fortes variações na orientação das vertentes afetam a quantidade de energia refletida em direção aos sensores remotos.

No Brasil, como em outros países, a sensibilidade dos IVHs para estes fatores ainda não foi abordada na literatura. Parte deste problema ocorre devido à escassez de dados hiperespectrais, já que os sensores orbitais existentes geralmente obtêm dados sob demanda e em faixas de imageamento bastante estreitas.

Dentre os sensores hiperespectrais orbitais que podem ser utilizados para estudar a sensibilidade dos IVHs para efeitos topográficos pode-se destacar o Hyperion, que operou entre os anos 2000 e 2017, projetado pela missão *Earth Observing-1* (EO-1). Esta missão era parte do Programa Novo Milênio da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), e tinha como objetivo testar novas tecnologias de modo a possibilitar o aumento da capacidade de geração de dados sobre a superfície da Terra e a redução dos custos operacionais. O Hyperion/EO-1 apresentava resolução espacial semelhante às dos sensores das missões Landsat (30 m), resolução espectral de 10 nm, faixa de imageamento de 7,5 x 42 km, e era capaz de gerar imagens em 242 bandas espectrais contíguas entre 400 e 2500 nm (LANDIS et al., 2016).

Apesar das limitações na relação sinal-ruído, especialmente no infravermelho de ondas curtas (SWIR), e na largura estreita da faixa de imageamento, o sensor Hyperion/EO-1 tem contribuído para as mais variadas aplicações, conforme reportado na literatura pelas centenas de artigos científicos. Mesmo sendo desativado em 2017, as imagens Hyperion/EO-1 ainda constituem uma excelente base de dados para dar suporte às aplicações potenciais das futuras missões hiperespectrais. De fato, os resultados obtidos com o Hyperion/EO-1 impulsionaram o planejamento de outras missões voltadas ao sensoriamento remoto hiperespectral. Este é o caso das missões *PRecursore IperSpettrale*

della Missione Applicativa (PRISMA), Environmental Mapping and Analysis Program (EnMap) e Hyperspectral Infrared Imager (HyspIRI). Os dados do Hyperion/EO-1 são, portanto, úteis para estudar a sensibilidade dos IVHs aos efeitos topográficos. Isso antecipará desafios e soluções para o uso adequado de séries temporais de IVHs geradas pelas futuras missões hiperespectrais na forma de produtos de satélites.

Em vista disso, fatores como o aumento da oferta de dados hiperespectrais orbitais, expresso também pelo lançamento recente (março de 2019) do satélite PRISMA, da Agência Espacial Italiana; a possível disponibilidade de produtos de satélites, compostos por dezenas de IVs hiperespectrais; e sua possível sensibilidade aos efeitos topográficos em áreas de relevo acidentado, motivaram a execução deste trabalho.

Na literatura, diferentes métodos de correção topográfica foram propostos, não havendo consenso sobre aquele de melhor desempenho. No entanto, métodos não-Lambertianos normalmente têm melhor desempenho do que métodos Lambertianos, especialmente porque eles possuem abordagens específicas por bandas espectrais (GOSLEE, 2012). Este é o caso da correção-C, que é um dos métodos apropriados para a análise de dados hiperespectrais, especialmente quando as classes de cobertura no terreno não são diversificadas.

1.1 Hipótese de trabalho

Testou-se a hipótese de que os IVHs apresentavam sensibilidades diferentes aos efeitos da topografia, com a magnitude dos efeitos sendo dependente das regiões espectrais de operação dos IVHs e das condições de declividade e orientação do terreno.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi analisar a sensibilidade de 15 IVHs aos efeitos topográficos em uma área de floresta ombrófila densa do Parque

Estadual Intervalos (PEI), localizada no Estado de São Paulo, utilizando dados do sensor Hyperion/EO-1. IVHs corrigidos e não corrigidos para os efeitos da topografia pela correção-C foram analisados e comparados em função de diferentes classes de iluminação local, as quais foram determinadas pela declividade e orientação do terreno.

Os objetivos específicos foram:

- Avaliar se o resultado da correção-C foi satisfatório, especialmente com base na estatística básica da cena e nas relações entre reflectância e fator cosseno, antes e após a correção topográfica;
- Analisar se as mudanças nos valores de IVHs devido a correção topográfica diferem significativamente a partir do teste de Wilcoxon;
- Mensurar a intensidade das mudanças, calculando-se a taxa de mudança relativa e a magnitude do tamanho do efeito (métrica r de Cohen) entre dados corrigidos e não-corrigidos para os efeitos topográficos;
- Identificar os IVHs mais sensíveis aos efeitos topográficos, considerando as diferentes classes de iluminação local do terreno.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, foram abordadas as principais temáticas envolvidas neste trabalho. Inicialmente, foram apresentadas as características da missão Earth Observing-1 e trabalhos possibilitados por esta missão. A seguir, apresentou-se o conceito de IVH, citou-se alguns trabalhos que fizeram o uso de IVHs, e discorreu-se sobre os IVHs utilizados neste trabalho. Posteriormente, tratou-se sobre os efeitos da topografia nas estimativas de reflectância e na determinação dos IVHs. Adiante, abordou-se a correção-C, método utilizado para correção topográfica, a fim de amenizar os efeitos da iluminação local sobre as estimativas de reflectância de superfície, e conseqüentemente, dos IVHs. Por último, apresentou-se alguns trabalhos que fizeram uso de correção topográfica.

2.1 A missão Earth Observing-1 e o sensor Hyperion/EO-1

A Missão *Earth Observing-1* (EO-1), proposta pela NASA dentro do programa Novo Milênio, visou dar continuidade ao monitoramento do planeta Terra a partir de imagens multiespectrais semelhantes às geradas nas missões Landsat. Entretanto, um outro objetivo também era avaliar o potencial de sensores hiperespectrais orbitais, visando redução de custos mediante a adoção de novas tecnologias. Como resultado, no final do ano 2000, três sensores foram lançados em órbita terrestre no satélite EO-1: o sensor *Advanced Land Imager* (ALI), o *Linear Etalon Imaging Spectrometer Array* (LEISA) *Atmospheric Corrector* (LAC) e o sensor Hyperion. A missão, inicialmente planejada para durar um ano, se estendeu por mais de uma década, uma vez que os instrumentos ALI e Hyperion conseguiram gerar dados de forma satisfatória além do tempo previsto e que os dados obtidos eram de grande interesse para a comunidade científica (LANDIS et al., 2016).

O sensor Hyperion operava em 242 bandas espectrais. Era dotado de resolução espectral de 10 nm (largura de banda) e de resolução espacial de 30 m, gerando imagens com 7,5 km de largura de faixa (PEARLMAN et al., 2003;

LANDIS et al., 2016). Tal sensor se destacou ao demonstrar as possibilidades de uso de sensores hiperespectrais em órbita, gerando dados suficientes para a caracterização espectral de alvos localizados na superfície terrestre. Os dados serviram de base para pesquisas voltadas ao mapeamento e à identificação de espécies vegetais, de minerais, de solos e de queimadas (KRUSE et al., 2003; VERAVERBEKE et al., 2010; FRIEDEL et al., 2018).

Dentre os trabalhos que fizeram uso de IVHs, elaborados a partir de dados obtidos pelo sensor Hyperion/EO-1, pode-se destacar o de Gong et al. (2003). Os autores fizeram uso de um espectraloradiômetro para mensurar o índice de área foliar (IAF) em campo no mesmo dia da passagem do sensor Hyperion/EO1 sobre área de estudo localizada na região da Patagônia argentina. A partir dos dados Hyperion/EO1 foram calculados 12 IVHs e avaliado a correlação entre os valores destes IVHs e o IAF estimado em campo. Notou-se que IVHs calculados a partir de bandas da região do infravermelho próximo e da região do infravermelho de ondas curtas apresentavam maiores correlações com o IAF. Outro exemplo é o trabalho de Apan et al. (2004), em que os autores avaliaram a capacidade de 40 IVHs em discriminar áreas cobertas com cana-de-açúcar afetadas pela doença “ferrugem alaranjada” (*Puccinia kuehni*), tendo como área de estudo parte do município de Mackay, Austrália. Notou-se que IVHs elaborados a partir da combinação de bandas da região espectral do visível ou infravermelho próximo e da banda sensível a umidade (1660 nm) apresentaram melhores resultados.

Dentre os trabalhos mais recentes com o uso de imagens Hyperion/EO-1 sobre o território nacional, pode-se citar os de Westphalen et al. (2017), Jacón et al. (2017) e Leitão et al. (2018). No trabalho de Westphalen et al. (2017), os autores obtiveram resultados satisfatórios ao mapear os minerais de titânio (ilmenita e rutilo) em uma faixa do litoral gaúcho no município de São José do Norte (RS). Jacón et al. (2017) avaliaram as influências das variações sazonais climáticas na caracterização espectral de diferentes tipos de vegetação do cerrado, testando a discriminação de fitofisionomias desse ecossistema entre as estações chuvosa e seca em uma estação ecológica próxima ao município de Brasília/DF. Finalmente, no estudo de Leitão et al. (2018), os autores foram

capazes de mapear diferentes espécies de árvores lenhosas no Parque Estadual da Serra Azul no estado do Mato Grosso e no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros no estado de Goiás, ambos localizados no cerrado brasileiro.

Os estudos realizados com o uso dos dados hiperespectrais gerados pela missão *Earth Observing-1* apontaram a importância do sensoriamento remoto hiperespectral orbital. Desta forma, outras instituições governamentais e empresas propuseram novas missões, algumas das quais serão abordadas a seguir.

2.2 Atuais e futuras missões hiperespectrais

Entre as atuais e futuras missões hiperespectrais orbitais destacam-se a missão PRISMA (*PRecursore IperSpettrale della Missione Applicativa*), a missão HISUI (*Hyperspectral Imager Suite*), o programa Enmap (*Environmental Mapping and Analysis Program*) e a missão HypSIIRI (*Hyperspectral Infrared Imager*).

A missão PRISMA foi organizada pela agência espacial italiana (ASI) e tem como objetivo fornecer imagens hiperespectrais e pancromáticas. Essas imagens serão geradas sob demanda dos usuários finais, e possibilitarão estudos e trabalhos relacionados à análise florestal (distúrbios florestais, incêndios florestais, classificação florestal, análise de biomassa etc.); à agricultura de precisão (mapeamento de culturas, fertilização etc.), à qualidade da água (monitoramento de clorofila, presença de algas, etc.); às mudanças climáticas e à pesquisa ambiental (desertificação, desmatamento, estresse da vegetação etc.) (LOIZZO et al., 2018). O sensor hiperespectral lançado pela missão PRISMA, em março de 2019, possui resolução espectral inferior a 12 nm, resolução espacial de 30 m, resolução temporal de 29 dias e é capaz de gerar imagens com faixas de imageamentos de 30 x 30 km, entre 400 e 2500 nm (LOIZZO et al., 2018).

Atualmente, a agência espacial italiana (ASI), em parceria com a agência espacial israelense (ISA), desenvolvem a missão SHALOM (*Space-borne*

Hyperspectral Applicative Land and Ocean Mission). Esta missão ainda está em fases de estudos, e se realizada, se destacará por apresentar um sensor com tempo de revisita inferior a 4 dias (NATALE et al., 2017).

A missão HISUI, desenvolvida pelo Ministério da Economia, Comércio e Indústria (METI) do Japão, teve como objetivo lançar e acoplar um sensor hiperespectral na estação espacial internacional. Esta é uma missão piloto, que visa obter dados para auxiliar o desenvolvimento de novas missões hiperespectrais orbitais capazes de gerar dados em maior escala. As experiências adquiridas pela missão HISUI, referentes ao planejamento da missão, à calibração dos sensores, à aquisição e à análise dos dados hiperespectrais, e à possibilidade de verificar o uso desses dados para exploração de recursos naturais, servirão de apoio para futuras missões japonesas. O lançamento do sensor hiperespectral da missão HISUI está previsto para 2019. O instrumento apresentará resolução espectral entre 10 e 12,5 nm, resolução espacial de 20 m, sendo capaz de gerar imagens entre 400 e 2500 nm (MATSUNAGA et al., 2018).

O programa EnMap está sendo elaborado principalmente pelas instituições alemãs de pesquisa e de observação da Terra, com apoio de empresas ligadas à indústria aeroespacial. Seu objetivo principal é suprir a necessidade atual de dados hiperespectrais orbitais de alta qualidade, capazes de gerar informação para o monitoramento e para a caracterização do ambiente terrestre em escala global. Para isso, está previsto o lançamento de um sensor orbital hiperespectral em 2021. Tal sensor será capaz de gerar imagens em bandas espectrais posicionadas entre 420 e 2450 nm, com largura de bandas entre 5 e 12 nm, resolução espacial de 30 m e largura de faixa de imageamento de 30 km (GUANTER et al., 2015).

A missão HypsIRI, por sua vez, é liderada por agências norte-americanas de pesquisa e de observação da Terra, mas ainda não tem recursos financeiros assegurados para sua execução. Ela visa obter dados em toda a região espectral compreendida entre 380 e 2500 nm, com bandas espectrais contíguas, e com um sensor caracterizado por resolução espectral de 10 nm.

Os dados gerados serão aplicados em estudos voltados à compreensão das mudanças ambientais climáticas e de fenômenos biofísicos e bioquímicos da vegetação. Os dados serão também utilizados para melhor compreender a biodiversidade terrestre e para desenvolver estudos voltados a ecossistemas aquáticos (HOCHBERG et al., 2015). Diferente da missão EnMAP, a HypSPRI operará na fronteira do conhecimento ao propor, de forma inédita, a aquisição de imagens hiperespectrais em faixas de imageamento de 145 km, sendo assim, mais próxima daquela adotada em missões do tipo Landsat.

2.3 Índices de vegetação hiperespectrais (IVHs)

A Tabela 2.1 apresenta os 15 IVHs analisados neste trabalho, onde “pnúmero” representa a reflectância e o centro da banda espectral (em nm) do sensor Hyperion/EO-1.

Tendo como característica a simplicidade matemática, a maior parte dos IVHs são calculados a partir de razões simples ou razões normalizadas entre valores de reflectância, obtidos em bandas espectrais nas diferentes regiões espectrais. O avanço do sensoriamento remoto hiperespectral nas últimas décadas possibilitou a proposição de novos índices, que quando calculados a partir de bandas estreitas passaram a ser denominados de IVHs. De acordo com sua aplicação, segundo Roberts et al. (2012), os IVHs podem ser divididos em três grandes grupos: (1) aqueles relacionados à estrutura da vegetação, como o NDVI e o EVI de bandas estreitas, voltados para estimativas de biomassa verde ou biomassa seca, do índice de área foliar, etc.; (2) aqueles relacionados à bioquímica da vegetação, como o ARI e o CRI1, propostos para estimativas de concentrações de pigmentos, de umidade foliar, de lignina e de celulose; e (3) aqueles relacionados à fisiologia vegetal, como o PRI, voltado à estimativa de estresse e da eficiência do uso da luz para atividade fotossintética.

Tabela 2.1. Índices de vegetação hiperespectrais (IVHs) com suas respectivas fórmulas e referências, onde “pnúmero” representa o centro da banda espectral (em nm) do sensor Hyperion/EO-1.

IVHs	Fórmulas	Referências
Estrutura		
NDVI	$(\rho_{864} - \rho_{660}) / (\rho_{864} + \rho_{660})$	Rouse et al. (1973)
EVI	$2,5 \times ((\rho_{864} - \rho_{660}) / (\rho_{864} + 6 \times \rho_{660} - 7,5 \times \rho_{487} + L))$	Huete et al. (2002)
VIG	$(\rho_{559} - \rho_{660}) / (\rho_{559} + \rho_{660})$	Gitelson et al. (2002)
VARI	$(\rho_{559} - \rho_{660}) / (\rho_{559} + \rho_{660} - \rho_{487})$	Gitelson et al. (2002)
Bioquímica		
ARI	$(1 / \rho_{559}) - (1 / \rho_{721})$	Gitelson et al. (2001)
CRI	$(1 / \rho_{510 \text{ nm}}) - (1 / \rho_{550})$	Gitelson et al. (2002b)
LWVI	$(\rho_{1094} - \rho_{1205}) / (\rho_{1094} + \rho_{1205})$	Galvão et al. (2005)
MSI	$(\rho_{1598}) / (\rho_{823})$	Hunt and Rock (1989)
NDII	$(\rho_{823} - \rho_{1649}) / (\rho_{823} + \rho_{1649})$	Hunt and Rock (1989)
PSRI	$(\rho_{681} - \rho_{498}) / \rho_{752}$	Merzlyak et al. (1999)
PSSR	ρ_{803} / ρ_{671}	Blackburn (1998)
SIPI	$(\rho_{803} - \rho_{467}) / (\rho_{803} + \rho_{681})$	Penuelas et al. (1995)
Fisiologia		
PRI	$(\rho_{529} - \rho_{569}) / (\rho_{529} + \rho_{569})$	Gamon et al. (1997)
RENDVI	$(\rho_{752} - \rho_{701}) / (\rho_{752} + \rho_{701})$	Gitelson et al. (1996)
VOG	ρ_{742} / ρ_{722}	Vogelmann et al. (1993)

Fonte: Adaptado de Roberts et al. (2012) e Jacon (2016).

De forma geral, a maioria dos índices de estrutura da vegetação foi proposta a partir de imagens multiespectrais e, posteriormente, foi adaptada às imagens

hiperespectrais. Por outro lado, índices relacionados à bioquímica e à fisiologia da vegetação são estritamente hiperespectrais. Normalmente as bandas espectrais exploradas em suas formulações são selecionadas a partir de estudos de espectroscopia feitos em laboratório, que podem ser modificadas em posicionamento espectral em estudos alternativos (ROBERTS et al., 2012). Destaca-se que, apesar da classificação proposta por Roberts et al. (2012), os IVHs não têm suas aplicações exclusivas às três classes mencionadas (estrutura, bioquímica e fisiologia), podendo ter múltiplos propósitos de aplicações. Por exemplo, é possível o uso de IVHs como o RENDVI, tanto para estudos de fisiologia, como para estimativas de parâmetros bioquímicos da vegetação.

Os IVHs são fundamentais em estudos de fenologia da vegetação a partir de técnicas de sensoriamento remoto. No trabalho de Hmimina et al. (2013), os autores mostraram a relação entre as estimativas de IVs, calculados a partir de imagens de sensores orbitais, com mudanças fenológicas observadas *in situ* em diferentes biomas. Além disso, a análise do comportamento sazonal e interanual dos IVs fornece indicadores de mudanças em coberturas florestais em resposta às variações climáticas. Por exemplo, Lambert et al. (2013) usaram IVs para identificar o declínio de florestas causado pelas altas temperaturas e baixa umidade dos verões entre 2000 e 2011 na Europa, especialmente o de 2003. Por sua vez, Du et al. (2014) notaram que o padrão sazonal do NDVI está diretamente relacionado com a dinâmica dos efeitos fenológicos e climáticos, tendo como base uma área coberta por florestas coníferas do norte da China.

Dentre os trabalhos mais recentes com IVHs a partir de dados orbitais, pode-se citar o de Silva e Baptista (2015) e o de Arfa et al. (2018). No primeiro caso, os autores estimaram a eficiência do processo de sequestro de carbono pela vegetação a partir do CO₂FLUX. O índice é resultante da integração entre dois IVHs (NDVI e PRI), produzindo resultados semelhantes aos obtidos por sensores de fluxo posicionados em torres meteorológicas. No estudo de Arfa et al. (2018), os autores foram capazes de elaborar um mapa sobre o estresse hídrico da cobertura vegetal em um oásis do sudeste da Tunísia.

2.3.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

O NDVI foi proposto por Rouse et al. (1973) a partir de uma razão normalizada entre a diferença e a soma de bandas espectrais posicionadas na região espectral do vermelho e do infravermelho próximo. É o IV mais difundido, comumente utilizado em estimativas de biomassa verde e seca, índice de área foliar e fração de radiação absorvida por vegetação fotossinteticamente ativa (ROBERTS et al., 2012). Por serem capazes de gerar dados em várias bandas contíguas, os sensores hiperespectrais possibilitam a formulação do NDVI a partir de diferentes bandas. Versões hiperespectrais do NDVI foram propostas por Galvão et al. (1999).

2.3.2 Enhanced Vegetation Index (EVI)

O EVI foi proposto por Huete (1997). É comumente utilizado em estudos voltados à estrutura da vegetação, uma vez que apresenta menores evidências de saturação em vegetação com alto IAF do que o NDVI. Além das bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, sua formulação inclui um parâmetro “L”, para minimizar os impactos do substrato, e uma banda do azul, para amenizar os impactos da atmosfera nos estudos da vegetação (ROBERTS et al., 2012). Neste trabalho adotou-se o valor 1 para o parâmetro L, seguindo a formulação dos produtos MODIS. Apesar disso, o EVI apresenta alta sensibilidade aos efeitos da topografia (MATSUSHITA et al., 2007).

2.3.3 Visible Index Green (VIg)

O VIg, proposto por Gitelson et al. (2002), apresenta formulação semelhante à do NDVI, porém, faz uso de uma banda na região espectral do verde no lugar da do infravermelho próximo. Os autores afirmaram que, apesar do contraste entre as estimativas de reflectância das bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo serem superiores às das bandas espectrais do vermelho e do verde, o VIg apresenta melhores estimativas de fração de vegetação do que o NDVI e outros IVs.

2.3.4 *Visible Atmospherically Resistant Index (VARI)*

O VARI também foi proposto por Gitelson et al. (2002). É semelhante ao VIg, porém, com a implementação de uma banda espectral do azul ao denominador. Os autores assumem que os efeitos atmosféricos sobre as estimativas de reflectância na faixa do azul são semelhantes ao dobro dos efeitos atmosféricos sobre as bandas espectrais do vermelho e do verde. Além de apresentar boa relação com estimativas de fração de vegetação, pode ser utilizado em estudos relacionados com o IAF e o estresse hídrico (ROBERTS et al., 2012).

2.3.5 *Anthocyanin Reflectance Index (ARI)*

O ARI foi proposto por Gitelson et al. (2001) a partir da diferença entre o inverso da reflectância na região espectral do verde e na região espectral da borda vermelha. O objetivo foi estimar a concentração de antocianina, pigmento que pode aumentar com o estresse da vegetação, reduzindo os efeitos da fotoinibição (ROBERTS et al., 2012).

2.3.6 *Carotenoid Reflectance Index 1 (CRI1)*

O CRI1 foi proposto por Gitelson et al. (2002b). Assim como o ARI, este IVH é formulado a partir da diferença entre os inversos da reflectância, porém, exclusivamente de bandas espectrais na região espectral do verde. Os carotenoides são pigmentos que auxiliam no processo de absorção da luz para fotossíntese. Além disso, estes pigmentos podem apresentar relação com o processo de senescência da vegetação, uma vez que durante este processo, os carotenoides decompõem-se de forma mais lenta que as clorofilas.

2.3.7 *Leaf Water Vegetation Index 2 (LWVI2)*

O LWVI2 foi proposto por Galvão et al. (2005) com a finalidade de discriminar diferentes variedades de cana de açúcar a partir de imagens Hyperion/EO-1. É

formulado a partir de uma razão normalizada, tendo como base uma banda espectral posicionada na borda da feição de água foliar (1094 nm) e outra no comprimento de onda da absorção máxima promovida pela água foliar (1205 nm).

2.3.8 *Moisture Stress Index (MSI)*

O MSI foi proposto por Rock et al. (1986) a partir da razão entre a reflectância espectral de uma banda na região espectral do infravermelho curto (1598 nm) e a reflectância de outra na região espectral do infravermelho próximo (823 nm). É um IVH que pode ser utilizado para trabalhos voltados às estimativas de umidade do dossel, assim como para estudos de estresse da vegetação (ROBERTS et al., 2012).

2.3.9 *Normalized Difference Infrared Index (NDII)*

O NDII foi proposto por Hunt e rock (1989). Possui as mesmas aplicações que o MSI, podendo ser considerado a versão “normalizada” dele.

2.3.10 *Plant Senescence Reflectance Index (PSRI)*

O PSRI foi proposto por Merzlyak et al. (1999) a fim de estimar a relação entre a concentração de carotenoides e a clorofila para estudos de senescência da vegetação e estimativas de amadurecimento de frutos. Com a senescência da vegetação, a reflectância espectral em 681 nm (relacionada a clorofila) tende a diminuir, enquanto a reflectância espectral em 498 nm (relacionada a carotenoides) fica constante.

2.3.11 *Pigment Specific Simple Ratio (PSSR)*

O PSSR foi proposto por Blackburn (1998) a partir da razão simples entre as estimativas de reflectância das bandas espectrais em 800 e 671 nm, para estimar a concentração de clorofila. O autor justifica a seleção da banda

espectral em 800 nm para minimizar os efeitos de interações de radiação na superfície da folha e estruturas internas no mesófilo. Segundo eles, as bandas próximas a 670 nm são bons indicadores de concentração de clorofila b.

2.3.12 *Structure Insensitive Pigment Index (SIPI)*

O SIPI foi proposto por Peñuelas et al. (1995). Além da banda em 800 nm, este IVH leva em consideração uma banda espectral em 681 nm relacionada à concentração de clorofilas, e outra em 464 nm relacionada à concentração de carotenoides. Os autores propuseram este IVH para estudos de fenologia e fisiologia da vegetação.

2.3.13 *Photochemical Reflectance Index (PRI)*

O PRI foi proposto por Gamon et al. (1997) como indicador de eficiência do uso da luz para fotossíntese. Além disso, os autores notaram que o PRI é significativamente relacionado à absorção de CO₂ e eficiência de uso de radiação medida por troca de gás. A formulação do PRI tem como base a diferença normalizada entre duas bandas espectrais, a centralizada em 531 nm, relacionada a xantofilas, e a posicionada em 570 nm (ROBERTS et al., 2012).

2.3.14 *Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RENDVI)*

O RENDVI foi proposto por Gitelson et al. (1996). Os autores notaram que a razão entre as reflectancias em bandas espectrais posicionadas no final e no início da região espectral da borda vermelha apresenta alta correlação com a concentração de clorofila. Desta forma, o RENDVI pode ser calculado como uma razão normalizada das bandas posicionadas em 752 e 701 nm.

2.3.15 Volgemann Red Edge Index (VOG)

O VOG foi proposto por Vogelman et al. (1993). Os autores notaram que este IVH está correlacionado com a concentração de clorofilas nas folhas. Segundo eles, o VOG é melhor para estimar a concentração de clorofila nas folhas do que outros IVs, como o NDVI. O VOG é resultado da razão entre duas bandas posicionadas na região espectral da borda vermelha, em 742 e 722 nm.

2.4 Efeitos da topografia

Em áreas montanhosas ou de topografia acidentada, a declividade e orientação de vertentes influenciam a quantidade de energia eletromagnética refletida pelos alvos na direção dos sensores (PONZONI et al., 2014). Desta forma, alvos localizados em áreas sombreadas imageadas pelos sensores refletem menores quantidades de energia radiante do que alvos localizados em área muito iluminadas (RIAÑO et al., 2003). Ao mesmo tempo, a geometria de aquisição de dados (ou seja, a posição relativa do Sol, do sensor e dos alvos em superfície) também influencia a quantidade de energia refletida pelos alvos e capturada pelos sensores (GALVÃO et al., 2009).

A soma dos efeitos causados pela geometria de aquisição de dados e pela topografia resulta na iluminação local do terreno (PONZONI et al., 2014). Porém, em áreas onde se conhece os efeitos causados pela variação da geometria de iluminação de visada ou em situações onde a geometria de iluminação e visada é fixa, é possível estimar os efeitos da topografia sobre as estimativas de reflectância, como no presente trabalho.

Na literatura, poucos foram os trabalhos que investigaram a sensibilidade dos IVs para efeitos topográficos usando dados multiespectrais. Nenhum trabalho discutiu a influência dos efeitos topográficos sobre os IVs utilizando dados hiperespectrais orbitais. Usando imagens do sensor aerotransportado AISA (*Airborne Imaging Spectrometer for Applications*), Matsushita et al. (2007) estudaram a sensibilidade do EVI e do NDVI aos efeitos da topografia em uma área de estudo coberta por florestas de ciprestes de alta densidade no Japão. Estes IVs servem como base para produtos de missões espaciais em todo

globo (p. ex. produtos gerados a partir do sensor MODIS), podendo apresentar distorções causadas pela topografia em áreas de relevo muito acidentado. Os autores relataram que o EVI apresentou maior sensibilidade que o NDVI aos efeitos da topografia. Eles concluíram que isto ocorre devido a formulação matemática dos IVs, de forma que IVs baseados em razões normalizadas (semelhantes à do NDVI), tendem a ser menos sensíveis aos efeitos da topografia do que IVs baseados em razões não normalizadas.

No Brasil, Ponzoni et al. (2014) estudaram a influência da iluminação local sobre IVs a partir de uma imagem do sensor Resourcesat/LISS-3 que cobria uma área de florestas ombrófilas em diferentes estágios sucessionais. Os autores mostraram a variação das curvas espectrais da vegetação em dosséis com diferentes perfis verticais ao longo de um ano, causadas principalmente pela variação das condições de iluminação local. A variação das estimativas de reflectância influenciou os valores do NDVI e NDMI (*Normalized Difference Moisture Index*), assim como a relação dos IVs com o PAI (*plant area index*).

Usando imagens geradas pelo sensor RapidEye e dados obtidos a partir de imagens produzidas pelo sensor MODIS, Galvão et al. (2016) estudaram o impacto dos efeitos do terreno em séries temporais de três IVs e 11 métricas fenológicas. Os autores notaram que todos os IVs e métricas fenológicas variaram conforme as mudanças na topografia, sendo o EVI o IV mais sensível. Além disso, os autores notaram que em áreas localizadas em altas latitudes, a topografia exerce uma influência ainda maior sobre as estimativas de reflectância e conseqüentemente sobre os IVs. Isto por que a variação do ângulo zenital solar e do ângulo azimutal solar durante o ano impacta de forma direta na quantidade de áreas sombreadas e áreas iluminadas pelas diferentes formas de relevo, podendo influenciar estudos fenológicos da vegetação.

A fim de reduzir o impacto da iluminação local sobre as estimativas de reflectância, e conseqüentemente, dos IVs, diferentes métodos foram propostos. Não faz parte do escopo deste trabalho discutir todos os métodos. Todavia, mais detalhes sobre os diferentes métodos de correção topográfica foram apresentados nos trabalhos de Hantson e Chuvieco (2011), Lima e

Ribeiro (2014) e Wu et al. (2016). Apenas o método utilizado no presente trabalho será apresentado (correção-C).

2.5 Correção-C

A reflectância de superfície de um mesmo tipo de material pode variar de acordo com as condições de iluminação local do terreno. Esta variação afeta os estudos voltados à classificação temática e à estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação (HOLBEN; JUSTICE, 1980). A topografia pode produzir sombras ou penumbras bloqueando a incidência direta de luz solar sobre algumas áreas. Ela afeta a reflectância estimada por sensores ópticos orbitais (GILES, 2001). Os efeitos são dependentes do comprimento de onda. Para sua correção, métodos de correção topográfica que não levam em conta a dependência espectral são pouco precisos (YAMAZAKI et al., 2009).

Dentre os diferentes métodos de correção topográfica, o método “Correção-C” tem sido bastante utilizado. Ele foi proposto por Teillet et al. (1982) (Equação 2.1):

$$\rho_h = \rho_t \left(\frac{\cos \theta_z + C}{\cos i + C} \right) \quad (2.1)$$

Em que ρ_h representa a reflectância em uma superfície horizontal e ρ_t representa a reflectância em uma superfície inclinada.

A iluminação local pode ser quantificada a partir do cosseno do ângulo local de incidência solar em relação à normal de cada superfície ($\cos i$ ou fator cosseno), cujo valor varia entre 0 (áreas sem iluminação) e 1 (áreas extremamente iluminadas). O fator cosseno é definido pela Equação 2.2:

$$\cos i = (\cos \phi_s \cdot \cos \theta_z) + [\sin \phi_s \cdot \sin \theta_z \cdot \cos(\theta_n - \phi_n)] \quad (2.2)$$

Em ambas as equações (2.1 e 2.2), ϕ_s representa o ângulo de declividade e ϕ_n representa o ângulo de orientação do terreno. Por sua vez, θ_z representa o ângulo zenital solar e θ_n o ângulo azimutal solar.

O parâmetro C é calculado para cada banda espectral a partir da divisão entre o intercepto b e o coeficiente angular m da relação linear entre os valores de fator de reflectância e o cosseno do ângulo de incidência solar (Equações 2.3 e 2.4):

$$\rho_t = m \cdot \cos i + b \quad (2.3)$$

$$C = \frac{b}{m} \quad (2.4)$$

Reese e Olsson (2011) concluíram que a melhor forma de estimar o parâmetro C é a partir da seleção de pontos que representem todas as condições da iluminação local da área de estudo. Para estes autores, a seleção exclusiva de pontos em áreas sombreadas tende a levar a sobrecorreção topográfica da cena, enquanto a seleção de pontos em áreas muito iluminadas produz uma subcorreção.

Da literatura, há três formas distintas de avaliar se o resultado de uma correção topográfica é satisfatório. A primeira forma é a análise visual, pois as imagens corrigidas tendem a apresentar aspecto “aplainado”, onde não é possível perceber áreas iluminadas e sombreadas, conforme as características da topografia. A segunda forma é analisar o desvio padrão dos valores de fator de reflectância de um conjunto de pontos da imagem. Espera-se que o desvio padrão diminua. Espera-se também que os valores dos fatores de reflectância de superfícies iluminadas e sombreadas convirjam para valores próximos aos de superfícies em condições de iluminação local média. Por último, testa-se a correlação entre o fator de reflectância e o fator cosseno da imagem. Espera-se que após a correção topográfica, a correlação entre o fator de reflectância e de iluminação local seja nula ou inexistente (RIAÑO et al., 2003; HANTSON; CHUVIECO, 2011; MOREIRA, 2014). Além destas formas de avaliação do desempenho da correção topográfica, é possível analisar as curvas de reflectância de diferentes tipos de materiais (p.ex. vegetação, solo etc.), antes e depois da correção topográfica.

2.6 Estudos e aplicações usando correção topográfica

As correções topográficas são empregadas normalmente em estudos voltados ao mapeamento de uso da terra em áreas de relevo acentuado. Exemplos são os estudos de Moreira e Valeriano (2014) e o de Moreira et al. (2016). No primeiro, a correção-C apresentou melhor performance que outros métodos de correção topográfica para melhorar o mapeamento do uso da terra. No segundo trabalho, os autores obtiveram melhores resultados de exatidão global no mapeamento de cafezais, de coberturas florestais, de culturas de milho e de solo exposto em uma área no sul do estado de Minas Gerais após a aplicação da Correção-C. No estudo feito por Cuo et al. (2010), após a aplicação de correção topográfica, os autores obtiveram melhores resultados ao mapear uma zona no norte da Tailândia em campo de arroz seco com gramas curtas, campo arado com solo exposto, campo com grama alta, árvores frutíferas em terreno aberto, floresta secundária avançada e floresta secundária jovem. Dorren et al. (2003) também identificaram melhorias no mapeamento de florestas da Áustria após o uso de métodos de correção topográfica.

Com menor frequência, se observa trabalhos voltados ao impacto das correções topográficas na caracterização espectral dos alvos. Riaño et al. (2003), por exemplo, estudaram a variação da reflectância espectral de diferentes tipos de vegetação do parque nacional Cabañeros após a aplicação de diferentes correções topográficas. O parque aludido está localizado a cerca de 200 km ao sul de Madrid, Espanha. Os autores utilizaram imagens TM/Landsat-5. Como resultado, notaram que o desvio padrão dos fatores de reflectância de todas as bandas espectrais obtidos a partir de diferentes tipos de vegetação diminuíram após o uso de correções topográficas, tendo sido a Correção-C a mais efetiva.

De forma semelhante, Hantson e Chuvieco (2011) fizeram uso de imagens ETM+/Landsat-7 de diferentes datas referentes a uma área localizada na região central da Espanha. A partir destas imagens foram selecionadas duas amostras de pontos: uma amostra referente às áreas com solos expostos e outra amostra referente às áreas cobertas por florestas de *Pinus sp.* Em

ambas as amostras se percebeu redução no desvio padrão do fator de reflectância em todas as bandas espectrais após o uso de correções topográficas. Isso pode ser útil em estudos temporais, uma vez que, após a correção topográfica, os fatores de reflectância apresentaram menor relação com as diferentes condições de iluminação local das datas estudadas e maior relação com as mudanças dos alvos.

No Brasil, Ponzoni (2016) estudou o impacto do uso de dois métodos de correção topográfica (Correção-C e Minnaert Modificado) sobre a caracterização espectral de solos e de vegetação em uma região montanhosa do sudeste brasileiro. Para entender a influência das amostras na estimativa do parâmetro C e na caracterização espectral dos alvos usando imagens Landsat, o autor realizou dois processos de amostragens distintas: um apenas com pontos que representavam áreas cobertas por florestas e outro com pontos de florestas, solos expostos e demais alvos em superfície. Notou-se que a diferença entre os processos de amostragem impactou tanto o valor do parâmetro C , como o aspecto visual das imagens corrigidas e a caracterização espectral dos alvos. Os alvos localizados em áreas sombreadas apresentaram maiores mudanças na reflectância espectral do que os alvos localizados em áreas muito iluminadas.

Vários estudos usando correção topográfica também têm sido feitos para melhorar a estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação. Nesse sentido, Veraverbeke et al. (2010) avaliaram o uso de correções topográficas para obter melhores estimativas do índice de taxa de queima diferenciada (dNBR) de áreas incendiadas em Peloponeso, Grécia, no ano de 2007, a partir do uso de imagens TM/Landsat-5. Os autores notaram que a correção topográfica reduziu a variação dos valores de dNBR causados pela topografia, sendo esta redução mais notável em áreas originalmente pouco iluminadas. Desta forma, os autores concluíram que a correção topográfica é um passo importante para estimativas da severidade de incêndios em áreas de relevo acidentado.

Chen e Cao (2012), por sua vez, analisaram a correlação entre IVs calculados a partir de uma imagem SPOT-5, antes e após o uso de correção topográfica, e

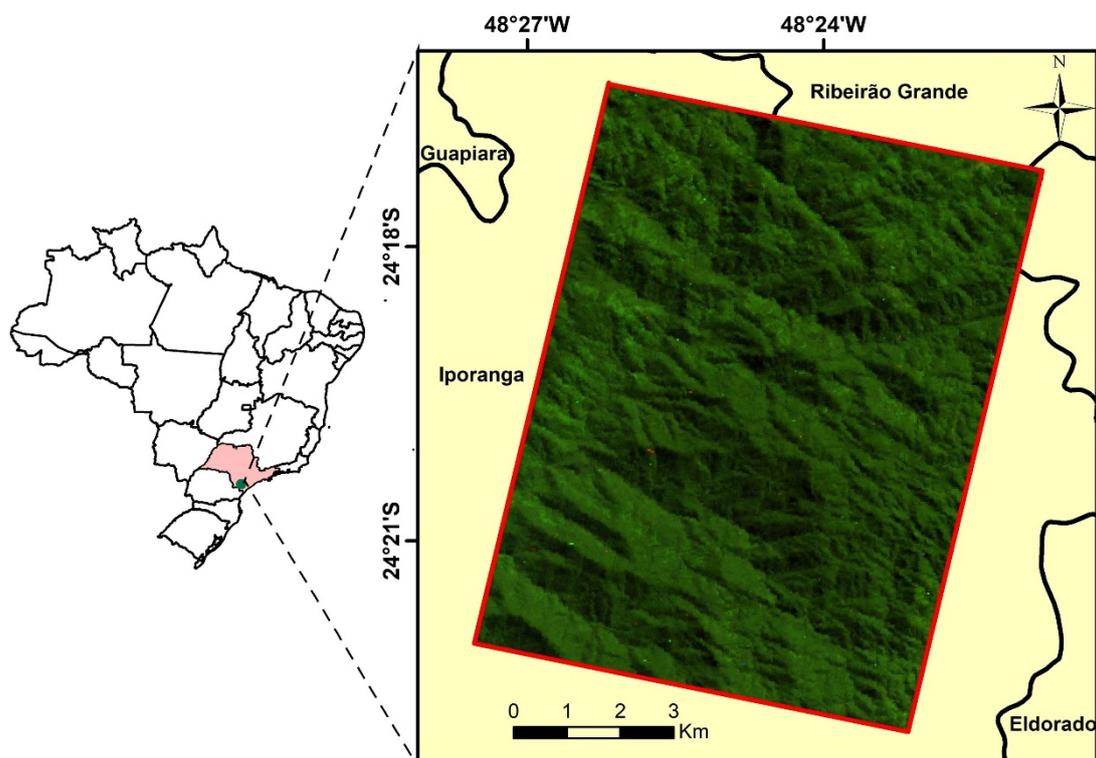
o índice de área foliar (IAF) em uma área montanhosa da China. Os autores destacaram que todos os IVs corrigidos topograficamente apresentaram melhor correlação com o IAF do que os IVs não corrigidos.

Wei et al. (2010) estudaram os impactos dos efeitos da topografia sobre as estimativas de produção primária (NPP). Os autores relataram que a NPP é um processo importante dos ecossistemas, responsável pela retirada de dióxido de carbono da atmosfera e armazenamento deste em tecidos de vida curta (raízes e folhas) e tecidos de vida longa (madeira). Assim, usaram um modelo para estimar NPP que tem como base o NDVI. A área de estudo faz parte de uma montanha coberta por florestas coníferas localizada próxima à cidade de Nara, Japão. Por fim, os autores concluíram que os valores de NPP estimados após o processo de correção topográfica foram mais semelhantes aos de campo que os estimados sem correção topográfica. Além disso, após a correção topográfica, a distinção entre as áreas cobertas e não cobertas por vegetação foi mais evidente.

3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende parte do Parque Estadual Intervales (PEI), localizado a sudeste do Estado de São Paulo, nos municípios de Ribeirão Grande, Guapiara, Iporanga e Eldorado (Figura 3.1).

Figura 3.1. Localização da área de estudo no sudeste do Estado de São Paulo, abrangendo parte do Parque Estadual Intervales (PEI). A composição colorida cor verdadeira usou as bandas do Hyperion/EO-1 posicionadas em 671 nm (R), 569 nm (G) e 487nm (B).



Legenda: Área de estudo Estado de São Paulo Municípios

Sistema de Coordenadas: WGS 1984 UTM ZONA 22 S
Projeção: Transversa de Mercator
Datum: WGS 1984

Fonte: Produção do Autor.

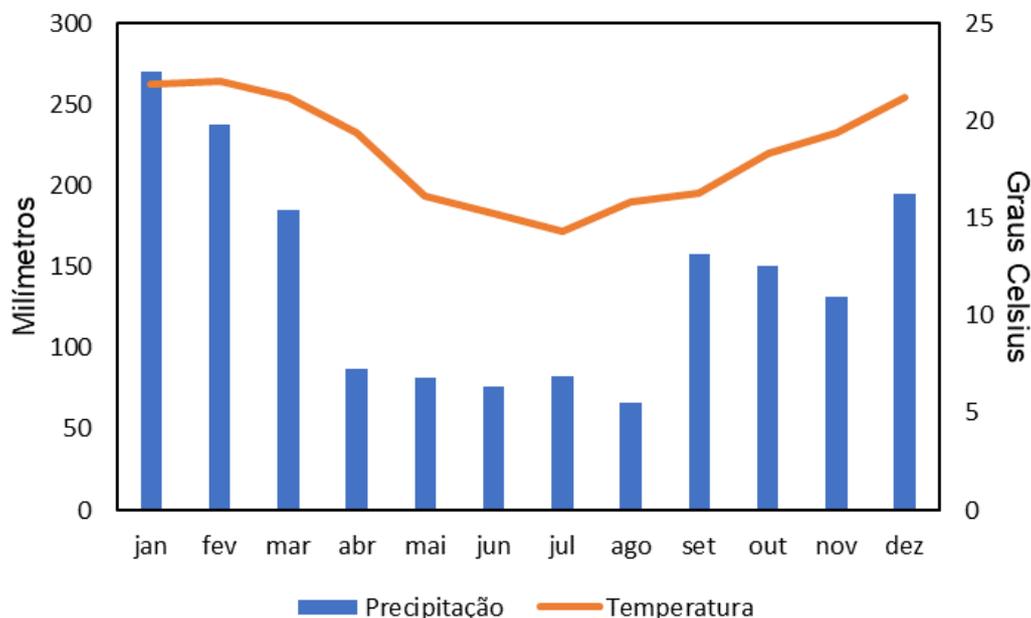
O PEI é considerado uma Unidade de Conservação de Proteção Integral - categoria Parque (Lei federal 9.985/2000), tendo sido fundado em 8 de junho de 1995. Porém, está sob regime de conservação desde 1987, pela

administração da Fundação para a Conservação e Produção Florestal do Estado de São Paulo (Fundação Florestal). O PEI apresenta área de 41.700 hectares e se integra ao mosaico de Paranapiacaba, junto ao Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), ao Parque Estadual Carlos Botelho, ao Parque Estadual Nascentes do Paranapanema, à Estação Ecológica de Xitué, à APA dos Quilombos do Médio Ribeira e à APA da Serra do Mar. Juntos, formam o mais importante corredor ecológico de Mata Atlântica do Estado de São Paulo (FUNDAÇÃO FLORESTAL, 2008).

O PEI se localiza entre duas grandes bacias hidrográficas: a do Rio Paranapanema e a do Rio Ribeira do Iguape. O divisor de águas entre essas bacias está nos limites norte e nordeste do PEI. Assim, quase toda a área do parque é drenada em direção ao Rio Ribeira de Iguape. Apenas uma pequena zona, à noroeste, é drenada para a bacia do rio Paranapanema. O nome do parque, inclusive, se dá devido a esta característica: estar entre dois “vales”.

Em relação ao clima, as áreas norte e oeste da Bacia do Ribeira do Iguape, onde está localizado o PEI, é classificada como Cfb, ou seja, subtropical úmido com verão fresco (CBH-RB, 2011). No PEI, a precipitação média anual entre os anos de 1990 e 2004 foi de 1722 milímetros, enquanto a temperatura média anual do ar entre 1996 a 2006 foi de 18.4 °C. Note também que o período de dezembro até março (verão) é o mais chuvoso e mais quente, enquanto o período de abril a agosto (outono e inverno) é o menos chuvoso e mais frio (Figura 3.2).

Figura 3.2. Precipitação média mensal (1990 a 2004) e variação média mensal da temperatura do ar (1996 a 2005) do Parque Estadual Intervales (PEI).



Fonte: Adaptado de Fundação Florestal (2008).

Quanto ao relevo, segundo o Plano de Manejo do PEI, a área pode ser dividida entre três grandes grupos de formações geomorfológicas: a Depressão Tectônica do Baixo Ribeira; os Morros Altos e Escarpas da Serra do Mar e Paranapiacaba; e os Planaltos do Alto Ribeira.

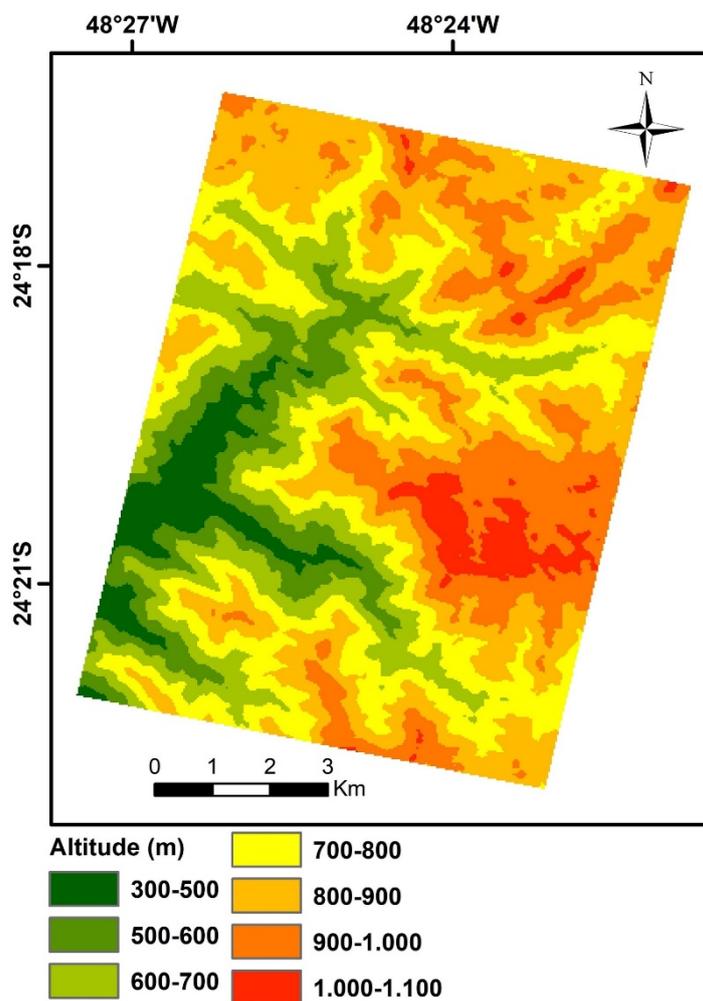
A Depressão Tectônica do Baixo Ribeira compreende áreas com menor altimetria, caracterizadas por grandes ramificações de planícies fluviais. Apesar de inundações frequentes em toda a bacia durante as chuvas, as áreas à jusante permanecem mais tempo alagadas em relação aos trechos à montante, devido às características genéticas dos materiais que compõem essas planícies. Nos trechos mais altos, as planícies e os terraços são mais estreitos, os rios mais entalhados e com declividade mais acentuada. À jusante, as planícies são mais extensas, com origem em vales formados a partir de sedimentação marinha, apresentando baixa declividade e altimetria, o que produz um escoamento mais lento das águas em direção ao mar.

A área classificada como Morros Altos e Escarpas da Serra do Mar e Paranapiacaba, por sua vez, sofreu poucas influências antrópicas. Esta formação se localiza principalmente no Estado de São Paulo, ao longo dos médios e altos cursos dos tributários do Ribeira de Iguape. A altitude predominante está entre 700 e 900 m. Nas partes em contato com a Depressão Tectônica do Baixo Ribeira, varia entre 100 e 200 m. Nas partes mais altas, atinge 1100 m. O plano de manejo destaca ainda a ocorrência comum de vales entalhados, com profundidade média de 80 m, podendo chegar até 160 m. Vertentes com inclinações médias entre 40 e 60% também são observadas, com valores que podem alcançar até 80%.

Os Planaltos do Alto Ribeira, por fim, constituem uma área montanhosa, com os divisores de águas nivelados por volta de 900 m. Todavia, alguns setores mantidos por rochas metamórficas mais resistentes alcançam até 1100 metros. Esses planaltos possuem morfologia de cristas alongadas e contínuas que se estendem por grandes percursos. Entre estes percursos altos e alongados, há morros de topos convexos, com vales relativamente estreitos e profundos e vertentes muito inclinadas, com declividade entre 30 e 60%.

Segundo o Mapeamento de Recursos Naturais do Brasil, disponibilizado pelo IBGE (2016), em escala 1:250.000, a área de estudo está localizada sobre a Serrania do Ribeira, englobada pelos Morros Altos e Escarpas da Serra do Mar e Paranapiacaba, e sobre o Planalto do Guapiara, um dos planaltos do alto Ribeira. Na área de estudo, a altitude varia entre 300 m e 1100 m e 90% dos terrenos são classificados como pertencentes à Serrania do Ribeira (Figura 3.3).

Figura 3.3. Altitude da área de estudo.



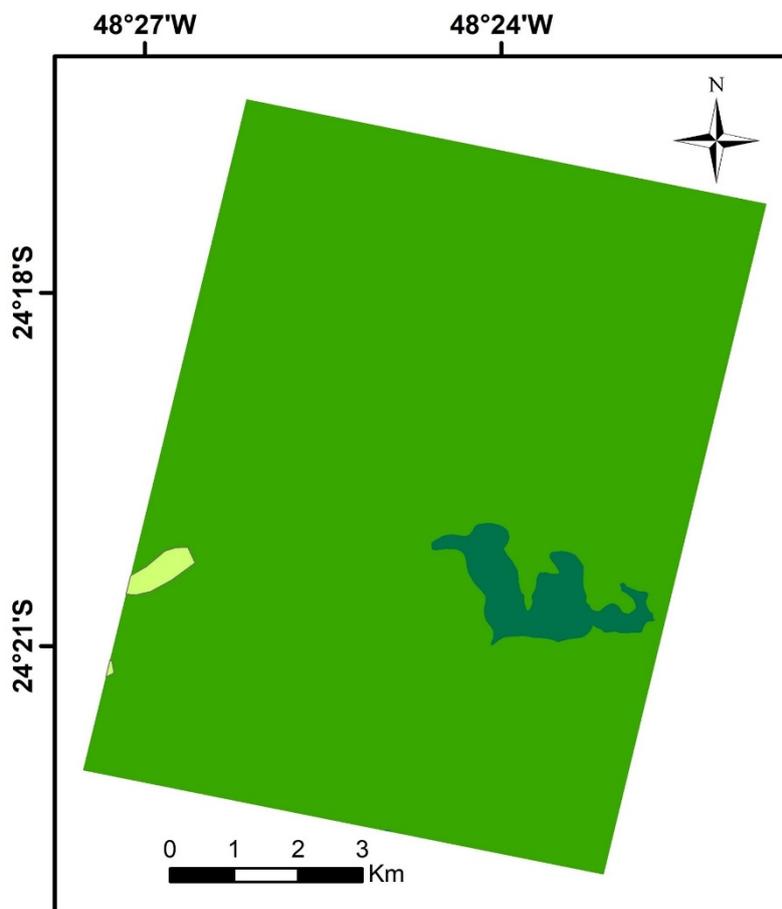
Sistema de Coordenadas: WGS 1984 UTM ZONA 22 S
Projeção: Transversa de Mercator
Datum: WGS 1984

Dados fornecidos pelo IBGE (2016).

Fonte: Produção do Autor.

Particularmente, na área de estudo, a vegetação predominante é classificada como floresta ombrófila densa montana. Ocorrências menores de floresta ombrófila densa alto-montana e submontana também são observadas (Figura 3.4).

Figura 3.4. Classificação da vegetação predominante na área de estudo.



Vegetação

- Floresta Ombrófila Densa Alto-Montana
- Floresta Ombrófila Densa Montana
- Floresta Ombrófila Densa Submontana

Sistema de Coordenadas: WGS 1984 UTM ZONA 22 S
Projeção: Transversa de Mercator
Datum: WGS 1984

Dados fornecidos pelo IBGE (2016).

Fonte: Produção do Autor.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2012), o termo Floresta Ombrófila Densa foi criado por Ellenberg e Mueller-Dombois (1967), sendo substituída a palavra “Pluvial” de origem latina pela sinônima grega “Ombrófila”. Ambas significam “amigo da chuva”. Ainda, os autores propuseram

pela primeira vez a divisão das florestas entre Densa e Aberta, sendo a última a zona de transição da primeira.

A floresta ombrófila é caracterizada por fanerófitos, lianas lenhosas e epífitas. Sua característica ecológica principal está voltada ao ambiente em que reside, com temperaturas médias altas, por volta de 25°C, chuvas intensas e distribuídas por todo o ano, havendo apenas pequenos períodos secos de até 60 dias por ano.

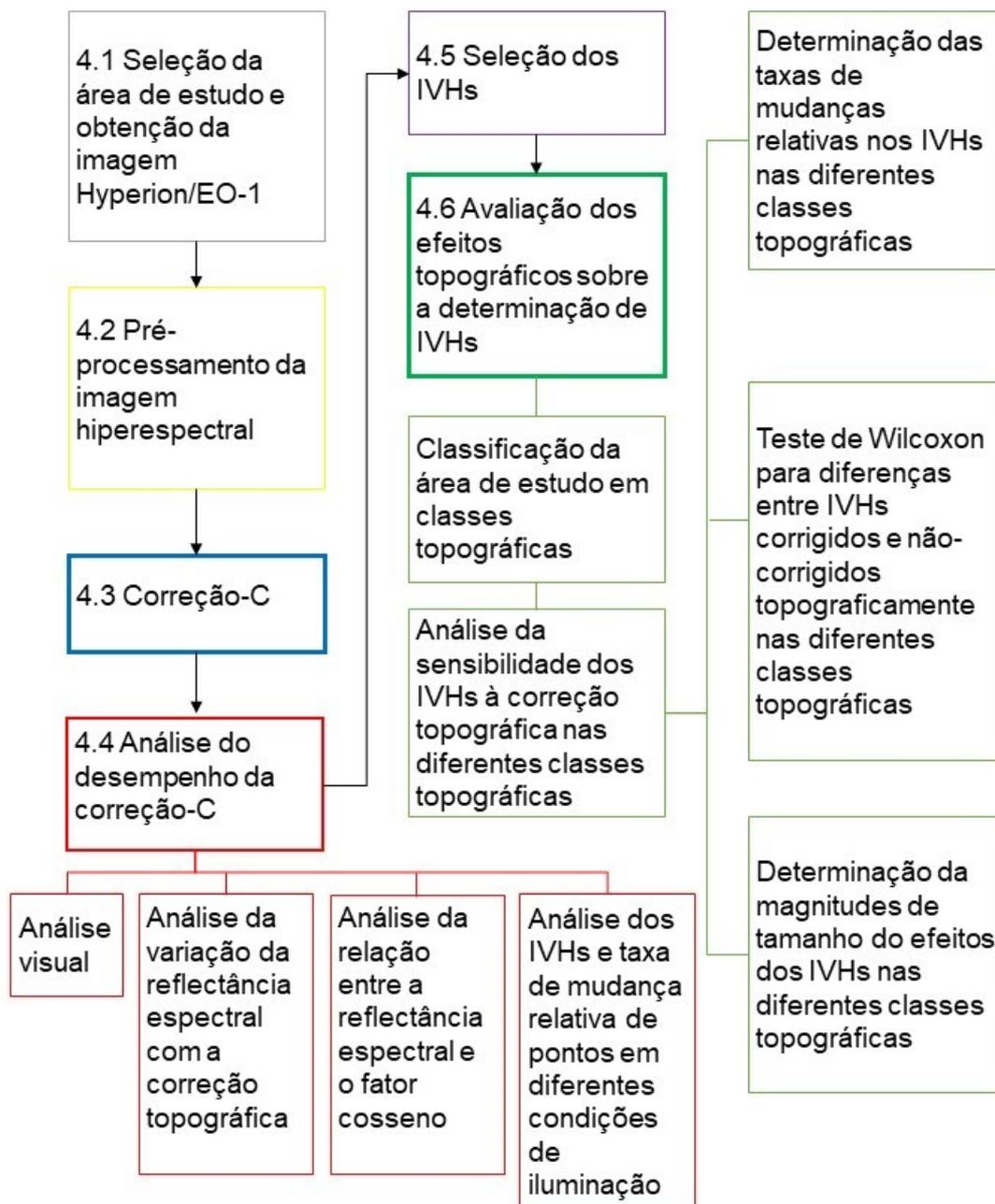
A classificação da vegetação varia conforme a latitude e a altitude. Desta forma, como a área de estudo está entre 24° e 30° de latitude sul, classifica-se de formações submontanas as formações vegetais localizadas em áreas entre 30 metros até em torno de 400 m de altitude. Adota-se o termo "montana" para as formações vegetais localizadas entre 400 m e 1000 m de altitude. A classificação "alto-montana" refere-se as formações vegetais localizadas acima de 1000 m de altitude.

Assim, percebe-se que a área de estudo é coberta por uma formação vegetal relativamente homogênea, composta predominantemente por floresta ombrófila densa montana.

4 METODOLOGIA

O fluxograma a seguir (Figura 4.1) sintetiza as etapas metodológicas deste trabalho, que serão detalhadas nas próximas subseções. As principais seções estão numeradas e descritas no texto.

Figura 4.1. Metodologia de trabalho adotada para processamento e análise dos dados.



Fonte: Produção do Autor.

4.1 Seleção da área de estudo e obtenção da imagem Hyperion/EO-1

A área de estudo selecionada compreende o Parque Estadual Intervales (PEI). Buscou-se uma imagem orbital hiperespectral do sensor Hyperion/EO-1 que representasse uma área de cobertura vegetal homogênea e de relevo acidentado. Ao mesmo tempo, essa imagem deveria apresentar a menor quantidade de nuvens possível. Assim, após consultas à página “<https://earthexplorer.usgs.gov/>” do Serviço Geológico Americano (USGS), foi selecionada a imagem “EO1H2200762003232110PZ_SGS_01”, que cobre uma área do Estado de São Paulo e, em especial, parte do PEI. A imagem foi obtida por volta das 10 horas do dia 20 de agosto de 2003, tendo como características da geometria de aquisição de dados o ângulo azimutal solar de $46,15^\circ$, o ângulo zenital solar de $49,52^\circ$ e o ângulo de apontamento do sensor de $-0,21^\circ$. A aquisição, portanto, foi feita com visada ao nadir.

4.2 Pré-processamento da imagem hiperespectral

Após a obtenção da imagem Hyperion/EO-1 foi efetuado o pré-processamento dos dados. O primeiro passo foi a remoção de *stripes* utilizando o algoritmo proposto por Goodenough et al. (2003). O segundo passo foi a correção dos efeitos atmosféricos causados pela absorção de gases e pelo espalhamento de partículas de aerossóis. Para correção atmosférica e conversão dos dados de radiância aparente para reflectância de superfície, foi utilizado o algoritmo *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercube* (FLAASH), o qual tem como base o modelo de transferência radiativa *Moderate Resolution Transmittance Code* (MODTRAN) (FELDE et al., 2003).

O processamento do FLAASH requer, como parâmetros de entrada, a data e o horário de aquisição da imagem; a localização central da cena; e a altitude média do terreno. O modelo atmosférico e o modelo de aerossol utilizados foram o tropical e o rural, respectivamente. A banda de absorção posicionada em 1135 nm foi usada para o cálculo do vapor d'água, pixel a pixel. O cálculo de visibilidade foi feito utilizando o método K-T (KAUFMAN et al., 2004). Este método se baseia na identificação de pixels escuros, na estimativa de seus

valores de reflectância nas faixas do vermelho e do infravermelho de ondas curtas, e no cálculo subsequente da espessura ótica da atmosfera para determinação da visibilidade.

Originalmente, a imagem Hyperion/EO-1 apresentava deslocamento de cerca de um pixel no sentido oeste, o que comprometeria a correção topográfica. Por este motivo, foi realizado o registro da imagem utilizando pontos de controles de feições similares entre a imagem Hyperion/EO-1 e uma imagem TM/Landsat-5 ortorretificada. Isso garantiu a sobreposição entre os dados topográficos e os dados espectrais.

4.3 Correção-C

Dentre os diferentes métodos de correção topográfica existentes optou-se pela correção-C, uma vez que esta abordagem considera parâmetros topográficos e dados radiométricos em diferentes bandas espectrais. É um método bastante utilizado na literatura e que tem apresentado bons resultados ao reduzir a variação espectral de alvos semelhantes em terrenos movimentados, como nos trabalhos de Riaño et al. (2003), Hantson e Chuvieco (2011) e de Moreira e Valeriano (2014).

A correção-C foi aplicada sobre a imagem Hyperion/EO-1, usando-se *scripts* na linguagem R (R Core Team, 2018). A correção tem como parâmetros de entrada imagens com dados de declividade, de orientação e do fator cosseno para cada pixel, conforme as equações (2.1-2.4) apresentadas na Fundamentação Teórica. Para gerar estes dados foi utilizado o modelo digital de elevação (MDE) produzido pela Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), disponível na página "<https://earthexplorer.usgs.gov/>". Os dados radiométricos e topográficos foram então produzidos por sensores com mesma resolução espacial: 30 m. A partir do MDE, os parâmetros de entrada da correção topográfica foram gerados por meio de *scripts* desenvolvidos em linguagem R.

Para estimar o parâmetro C , foram utilizados valores de reflectância extraídos de 200 pixels da imagem Hyperion/EO-1, aleatoriamente selecionados para classes distintas de iluminação. Para esta seleção, a área de estudo foi

classificada em quatro classes de iluminação local, conforme os valores da imagem referente ao fator cosseno da área de estudo (0-0,25; 0,26-0,50; 0,51-0,75; 0,76-1,0). Foram então selecionados ao acaso 50 pontos representando cada classe. Desta forma, pôde-se extrair valores de reflectância de pixels que representavam toda a variação de iluminação local do terreno da área de estudo, com mesma intensidade amostral.

4.4 Análise do desempenho da correção-C

Para avaliar o desempenho da correção-C, foram adotadas quatro estratégias: análise visual; análise da variação da reflectância espectral com a correção topográfica; análise da relação entre a reflectância espectral e o fator cosseno; e análise das mudanças das curvas espectrais da vegetação sob diferentes condições de iluminação local devido a correção-C.

Para a análise visual, composições coloridas cor-verdadeira, usando as bandas do Hyperion/EO-1 centradas em 671 nm (R), 569 nm (G) e 487 nm (B), foram geradas e comparadas para dados corrigidos e não-corrigidos para os efeitos topográficos. Se a correção topográfica é efetiva, as principais feições topográficas do terreno deixam de ser facilmente identificáveis na imagem corrigida, quando comparada com a imagem não-corrigida.

Para analisar a redução do desvio padrão dos valores de fator de reflectância causados pela correção topográfica, assim como para verificar a relação da reflectância com os valores de fator cosseno, foram selecionados aleatoriamente 200 pixels, independentes dos já utilizados para a correção topográfica. Destes pixels, foram extraídos os valores de fator cosseno e do fator de reflectância de sete bandas espectrais posicionadas nas regiões espectrais do azul, verde, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas (SWIR). As bandas espectrais do Hyperion/EO-1 selecionadas para análise foram aquelas aproximadamente correspondentes ao comprimento de onda central das bandas do sensor TM/Landsat-5, o que possibilita a comparação dos resultados deste trabalho com outros da literatura. A partir destes valores foram gerados *boxplots* e diagramas de

dispersão. Dois pressupostos foram adotados nestas etapas de avaliação: (1) a correção topográfica deve diminuir o desvio-padrão de áreas sombreadas e iluminadas da imagem, reduzindo a variabilidade espectral causada pela iluminação do terreno que tem declividade e orientação de vertentes distintas; e (2) a correção topográfica deve reduzir a correlação entre a reflectância espectral e o fator cosseno, minimizando os efeitos de iluminação local do terreno sobre a resposta espectral das bandas.

Por último, a fim de avaliar os impactos da correção topográfica na caracterização espectral da área de estudo, foram geradas curvas espectrais para áreas em diferentes condições de iluminação local, antes e após a correção topográfica. Durante a comparação das curvas, primeiramente foram analisadas as mudanças nas curvas espectrais de áreas em diferentes condições de iluminação causadas pela correção-C. Em seguida, discutiu-se a similaridade de curvas espectrais de áreas em diferentes condições de iluminação causadas pela correção-C.

4.5 Seleção dos IVHs

A seleção dos IVHs foi feita usando a classificação de índices proposta por Roberts et al. (2012). Foram selecionados 15 IVHs.

Para representar a estrutura da vegetação, foram selecionados os seguintes quatro IVHs: *Enhanced Vegetation Index* (EVI), *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Visible Index Green* (VIG) e *Visible Atmospherically Resistant Index* (VARI).

Para representar a bioquímica da vegetação, foram selecionados oito IVHs: *Anthocyanin Reflectance Index* (ARI), *Carotenoid Reflectance Index 1*(CRI), *Leaf Water Vegetation Index 2* (LWVI2), *Moisture Stress Index* (MSI), *Normalized Difference Infrared Index* (NDII), *Plant Senescence Reflectance Index* (PSRI), *Pigment Specific Simple Ratio* (PSRI) e *Structure Insensitive Pigment Index* (SIPI).

Finalmente, como representantes da fisiologia, foram escolhidos: *Photochemical Reflectance Index* (PRI), *Red Edge Normalized Difference Vegetation Index* (RENDVI) e *Volgemann Red Edge Index* (VOg).

Na prática, a seleção destes IVHs representou a amostragem de diferentes bandas espectrais nas regiões do visível (400 - 700 nm), borda vermelha (700 – 750 nm), infravermelho próximo (750 – 1300 nm) e infravermelho de ondas curtas (1300 – 2500 nm). Destaca-se que, para a formulação dos IVHs, as bandas espectrais podem estar na mesma região espectral, como as do CRI1, ou em regiões espectrais diferentes, como as do NDVI. Destaca-se também que alguns IVHs são resultados de razões simples de bandas, como o VOG e o MSI, enquanto outros são resultados de diferenças normalizadas, como o NDVI e LWVI2. Há ainda uns poucos IVHs, como EVI, que resultam de formulações mais elaboradas.

Equações e referências de origem de cada IVH foram listadas na Fundamentação Teórica (Tabela 2.1). Todos os índices foram calculados a partir de *scripts* na linguagem R.

4.6 Avaliação dos efeitos topográficos sobre a determinação de IVHs

Para avaliar os efeitos topográficos sobre a determinação dos IVHs, a área de estudo foi primeiramente segmentada em 12 classes topográficas, determinadas pela orientação e pela declividade das vertentes. Para a definição das classes foram utilizadas, como parâmetros de entrada, as imagens de orientação e de declividade, geradas a partir do MDE por *scripts* na linguagem R.

A imagem de orientação foi fatiada em quatro classes: norte para pontos com orientação entre 315 e 45°; leste para pontos com orientação entre 45 e 135°; sul para pontos com orientação entre 135 e 225°; e oeste para pontos entre 225 e 315°. Para estas classes foram atribuídos os valores de 10, 20, 30 e 40, respectivamente. A imagem de declividade foi fatiada em 3 classes: menor que 15°; entre 15 e 30°; e maior que 30°. Para estas classes foram atribuídos os valores de 1, 2 e 3, respectivamente.

As imagens classificadas de orientação e de declividade foram cruzadas, dando origem a uma nova imagem com 12 classes de valores (11, 12, 13, 21, 22, 23, 31, 32, 33, 41, 42, 43). Portanto, cada classe representa áreas com condições de orientação e declividade distintas. Por exemplo, a classe 11 representa pontos com orientação Norte (para as quais foram atribuídos o valor 10) e com declividade menor que 15° (valor 1); a classe 32 representa pontos com orientação sul (para as quais foram atribuídos o valor 30) e com declividade entre 15 e 30° (valor 2).

Usando esta estratégia, foi possível analisar os diferentes cenários de iluminação do terreno, fixando-se a declividade e variando-se a orientação das vertentes, e vice-versa.

Em seguida, usando uma estratégia computacional simples, foram selecionados 100 pontos de forma aleatória dentro de cada uma das 12 classes. Destes pontos, foram extraídos os valores dos IVHs correspondentes. Assim, para estimar a magnitude das mudanças nos valores de IVHs, causadas pela correção topográfica nas diferentes condições de orientação e de declividade, os valores foram analisados em duas etapas.

Na primeira etapa, aplicou-se o teste estatístico de Wilcoxon. O teste de Wilcoxon é um teste de hipótese não paramétrico consagrado para quando se deseja comparar duas amostras relacionadas, ou quando se deseja identificar mudanças causadas em uma população ao passar por um processo qualquer. Neste caso, desejou-se identificar se os IVHs provenientes da imagem com correção topográfica diferiam significativamente dos IVHs calculados da imagem sem correção topográfica. Os testes de hipótese foram realizados por *scripts* na linguagem R com nível de significância de 5%. Para a comparação dos resultados foram utilizados os valores p do teste de Wilcoxon.

A maior parte dos testes estatísticos serve para indicar aceite ou rejeição de uma hipótese sobre um determinado nível de significância, sem conseguir mensurar a magnitude da similaridade ou da diferença entre duas amostras testadas. Com a finalidade de mensurar a magnitude das diferenças foram

utilizadas duas métricas: a taxa de mudança relativa e a métrica r proposta por Cohen (1988).

As taxas de mudanças relativas (em porcentagem) entre dados corrigidos e não-corrigidos para os efeitos topográficos foram calculadas a partir da Equação 4.1:

$$TMR = \left(\frac{IVHu - IVHc}{IVHu} \right) * 100 \quad (4.1)$$

Onde TMR indica a taxa de mudança relativa; $IVHc$ indica a média dos valores de IVHs que foram gerados da imagem que sofreu correção topográfica; e $IVHu$ indica a média dos valores de IVHs gerados da imagem que não sofreu correção topográfica.

Para mensurar a magnitude do tamanho do efeito de algum processo (correção topográfica, no presente caso) sobre uma amostra qualquer, é comum o uso da “métrica d de Cohen”. Todavia, esta pressupõe que os dados possuam distribuição normal. Entre as diversas métricas de Cohen, para este trabalho, selecionou-se a métrica “ r ” (COHEN, 1988), a qual é análoga a métrica “ d de Cohen”, porém, não exige que os dados apresentem distribuição normal.

Assim, a métrica “ r de Cohen” pode ser calculada de forma simplificada, através da razão do valor Z proveniente do teste de Wilcoxon, pela raiz quadrada da soma dos tamanhos das amostras (FIELD, 2005), conforme a Equação (4.2):

$$r = \frac{Z}{\sqrt{N}} \quad (4.2)$$

Ainda, a métrica “ r de Cohen” pode ser classificada em quatro grupos, conforme a magnitude de efeito (Tabela 4.1).

Tabela 4.1. Faixas de magnitude de tamanho do efeito.

Magnitude de tamanho do efeito	Valor de “r de Cohen”
Efeito Nulo	0 - 0,1
Baixo efeito	0,1 - 0,3
Médio efeito	0,3 -0,5
Alto efeito	> 0,5

Fonte: Cohen (1988).

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão abordados os principais resultados deste trabalho. Inicialmente serão apresentados os resultados referentes ao desempenho da correção-C. Em seguida, serão apresentados os resultados referentes ao impacto da topografia sobre os diferentes IVHs.

5.1 Análise do desempenho da correção-C

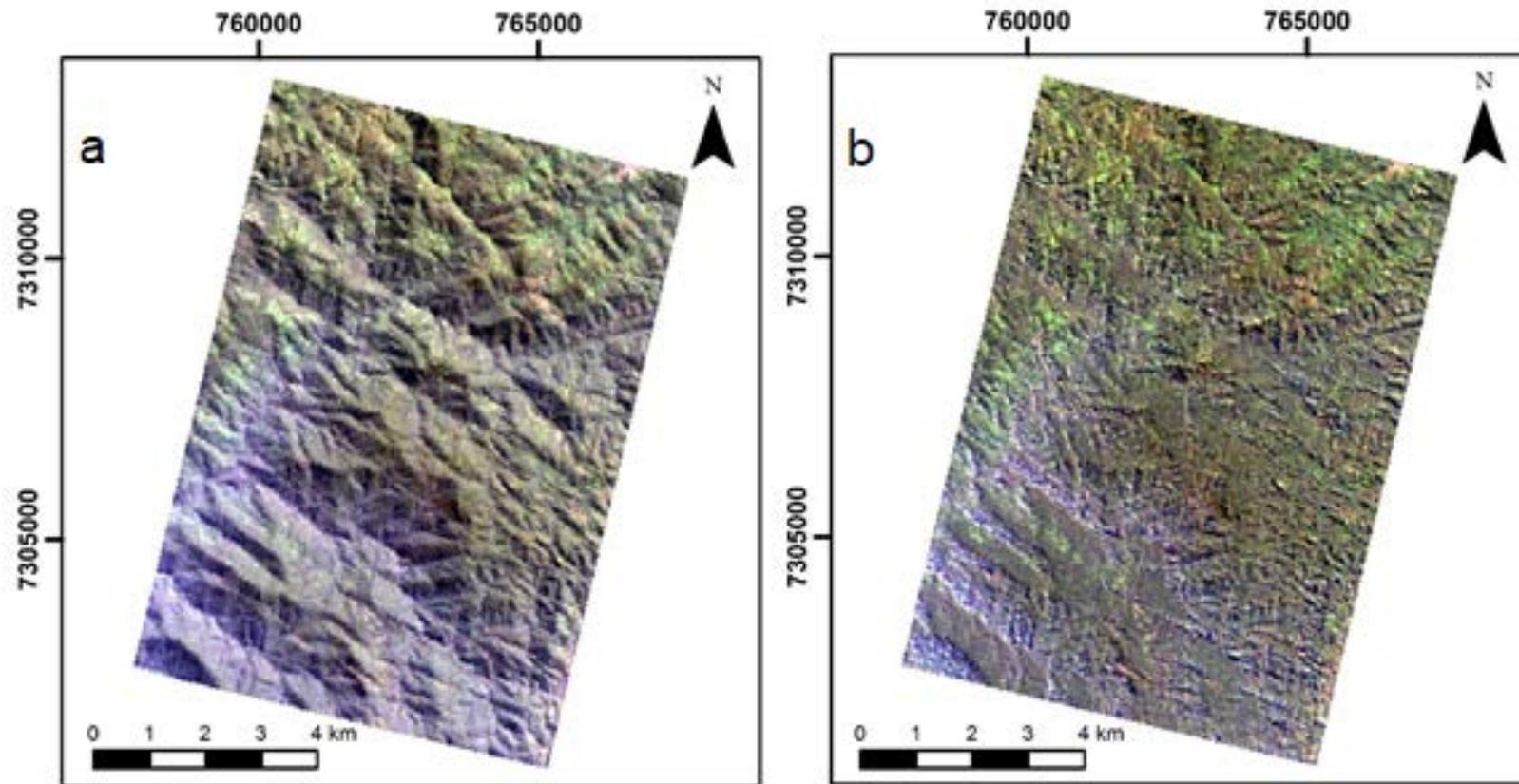
5.1.1 Análise visual

A Figura 5.1a apresenta a imagem Hyperion/EO-1 da área de estudo, não corrigida para os efeitos topográficos, em composição colorida cor-verdadeira, usando as bandas centradas em 671 nm, 569 nm e 487 nm em vermelho, verde e azul, respectivamente. Os resultados após a correção-C são apresentados na Figura 5.1b.

Após a correção topográfica, as feições topográficas observadas na Figura 5.1a foram suavizadas, como ilustrado na imagem da Figura 5.1b, mostrando uma superfície aplainada. As vertentes muito iluminadas, principalmente aquelas voltadas para leste e norte, foram corrigidas para os efeitos de iluminação do terreno. O mesmo ocorreu para vertentes muito sombreadas, voltadas para sul e oeste. Portanto, decorrente da correção topográfica, as variações de iluminação local do terreno foram reduzidas, conforme esperado.

Nota-se também que apesar do bom desempenho da correção-C, alguns pixels escuros da imagem original não foram completamente corrigidos. Isso ocorreu porque estes pixels representam condições de iluminação extrema, de difícil correção topográfica.

Figura 5.1. Imagem Hyperion/EO-1 em composição colorida cor-verdadeira, usando as bandas posicionadas em 671 nm (R), 569 nm (G) e 487 nm (B), antes (a) e após (b) a correção-C.



Sistema de Coordenadas: WGS 1984 Zona 22S
Projeção: Transversa de Mercator
Datum: WGS 1984

Fonte: Produção do Autor.

5.1.2 Análise da variação da reflectância espectral com a correção-C

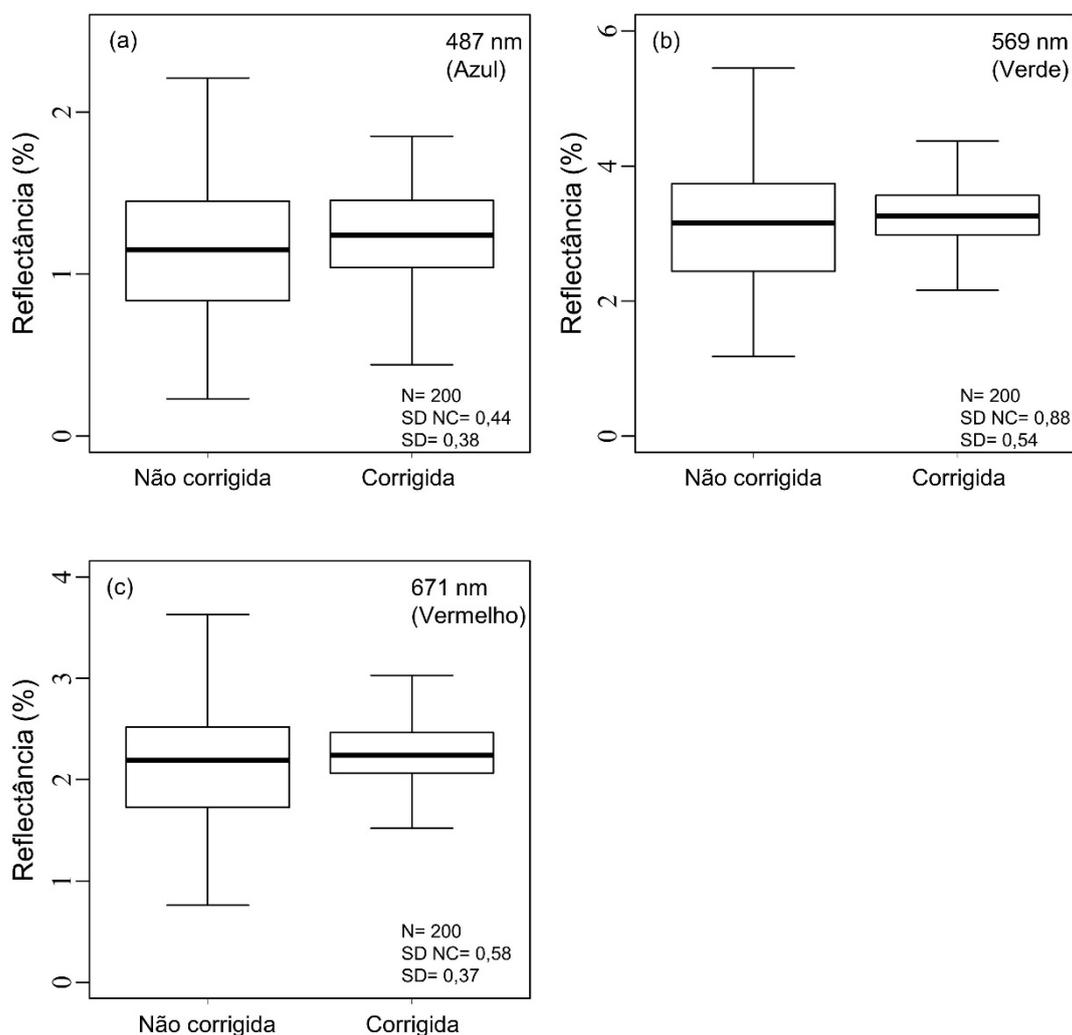
As Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 mostram, a partir de *boxplots*, a variação dos valores de fator de reflectância para diferentes bandas do Hyperion/EO-1, antes e após a correção topográfica. No lado direito inferior de cada *boxplot* foram indicados os valores de desvio padrão dos fatores de reflectância extraídos de pontos da imagem não corrigida topograficamente (“SD NC”) e da imagem corrigida (“SD C”).

A variação dos valores de fator de reflectância na banda espectral do azul (487 nm) do Hyperion/EO-1 situou-se entre 0,1 e 2,3% na imagem não corrigida, com a maior parte dos valores posicionados entre 0,8 e 1,5% (Figura 5.2a). Nos valores da imagem corrigida topograficamente, as diferenças foram reduzidas para valores entre 0,4 e 1,9%, com o primeiro e o terceiro quartil mostrando variação entre 1,1 e 1,5% de reflectância. Como um todo, o desvio padrão variou de 0,44 para 0,38%, antes e após a correção topográfica.

Na banda espectral do verde (569 nm), um padrão similar foi observado, mas de forma mais acentuada (figura 5.2b). Os valores mais extremos de fator de reflectância originalmente estavam entre 1 e 6% na imagem não corrigida, sendo reduzido para valores entre 2,1 e 4,5% na imagem corrigida topograficamente. O primeiro e o terceiro quartil variaram de 2,5 e 3,9 (antes da correção) para 3 e 3,5% (após a correção). O desvio padrão foi reduzido de 0,88 para 0,54% com a aplicação do método-C.

Na banda espectral do vermelho (671 nm), o fator de reflectância variou de 0,5 a 3,5% na imagem não corrigida e de 1,5 a 3% na imagem corrigida (figura 5.2c). O primeiro e o terceiro quartil variaram de 1,8 e 2,5% (antes da correção) para 2 e 2,5% (após a correção). A correção topográfica reduziu o desvio padrão de 0,58 para 0,37%.

Figura 5.2. Distribuição dos valores de reflectância das bandas espectrais do Hyperion/EO-1 do (a) azul (487 nm), (b) verde (569 nm) e (c) vermelho (671 nm), antes (NC) e após (C) a correção topográfica. SD é o desvio padrão e N é o tamanho da amostra.

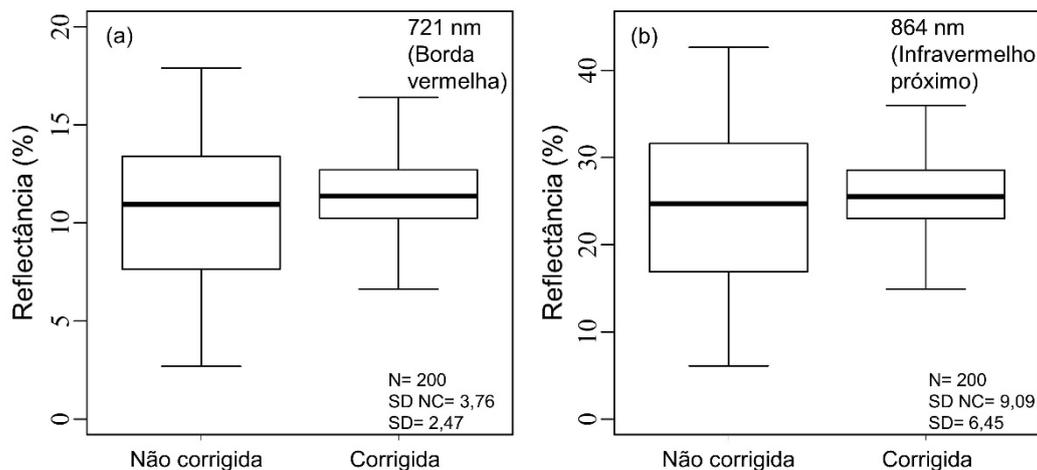


Fonte: Produção do Autor.

Na banda espectral da borda vermelha (721 nm), percebe-se que os valores do fator de reflectância foram maiores, variando entre 3 e 18% na imagem sem correção topográfica e entre 6 e 16% na imagem corrigida (figura 5.3a). Os quartis mudaram de 8 e 14% para 11 e 13% com a correção topográfica. O desvio padrão variou de 3,76 para 2,47% de reflectância após a correção dos efeitos topográficos.

O fator de reflectância na banda espectral do infravermelho próximo (864 nm) do Hyperion foi o que sofreu maior variação: de 8 até 40% na imagem sem correção e entre 15 e 35% na imagem corrigida (figura 5.3b). A correção-C reduziu o desvio padrão de 9,09 para 6,45% de reflectância.

Figura 5.3. Distribuição dos valores de fator de reflectância das bandas espectrais do Hyperion/EO-1 da (a) borda vermelha (721 nm) e (b) do infravermelho próximo (864 nm), antes (NC) e após (C) a correção topográfica. SD é o desvio padrão e N é o tamanho da amostra.

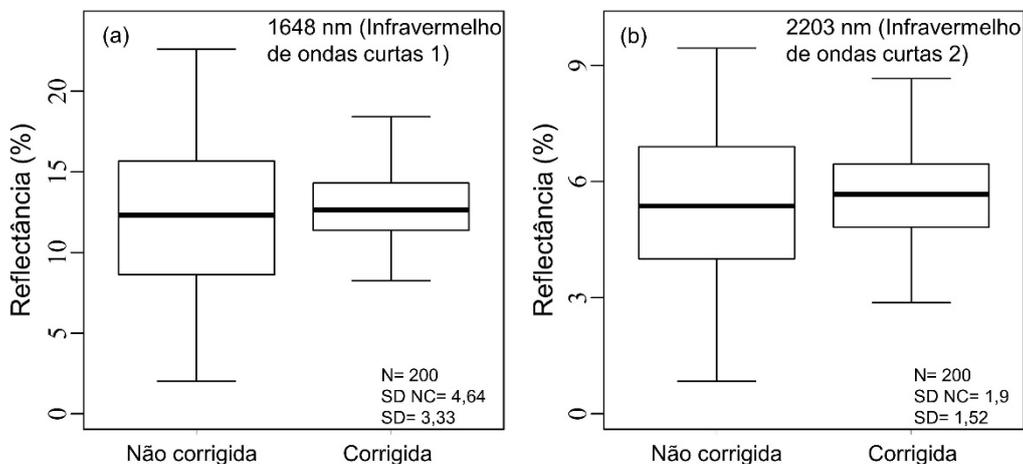


Fonte: Produção do Autor.

Na banda espectral do infravermelho de ondas curtas 1 (1649 nm), o fator de reflectância variou de 3 a 25% na imagem sem correção, e de 8 a 17% na imagem corrigida (Figura 5.4a). A correção topográfica reduziu o desvio padrão de 4,64 para 3,33% de reflectância.

Por último, na banda espectral do infravermelho de ondas curtas 2 (2203 nm), o fator de reflectância variou entre 1 e 10% na imagem não corrigida e entre 3 e 9% na imagem corrigida (Figura 5.4b). O desvio padrão mudou de 1,9 para 1,52% de reflectância com a correção topográfica.

Figura 5.4. Distribuição dos valores de fator de reflectância das bandas espectrais do Hyperion/EO-1 do infravermelho de ondas curtas 1 (1648 nm) e do infravermelho de ondas curtas 2 (2203 nm), antes (NC) e após (C) a correção topográfica. SD é o desvio padrão e N é o tamanho da amostra.



Fonte: Produção do Autor.

Portanto, para todas as faixas espectrais ou bandas do Hyperion/EO-1, a correção topográfica reduziu a variabilidade dos dados resultante das mudanças nas condições de iluminação local do terreno vistas pelo sensor. Desta forma, a correção topográfica se mostrou eficiente ao reduzir o desvio padrão do fator de reflectância ao longo de todo espectro, conforme mostrado nos boxplots das Figuras 5.2, 5.3 e 5.4.

5.1.3 Análise da relação entre a reflectância espectral e o fator cosseno

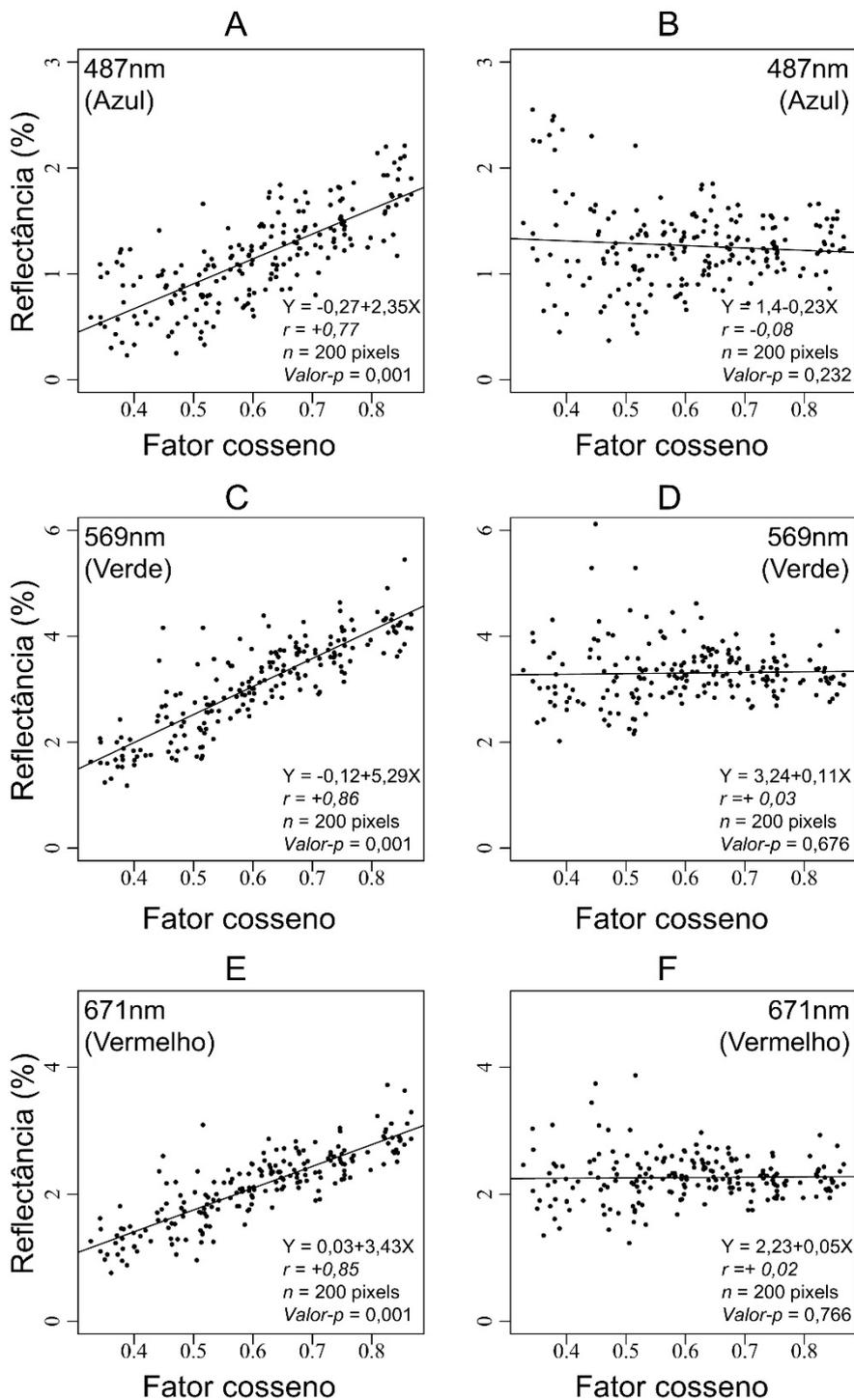
As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam os diagramas de dispersão entre os valores de fator de reflectância e do fator cosseno para 200 pixels selecionados aleatoriamente na área de estudo em função de classes de iluminação distintas, conforme relatado no item 4.4. Ao lado direito inferior de cada diagrama de dispersão estão a equação da reta e o coeficiente de correlação de Pearson (R) entre as variáveis.

Na banda espectral do azul (Figura 5.5A) havia alta correlação entre a reflectância e o fator cosseno antes da correção topográfica ($R = +0,77$). Nos dados provenientes da imagem que foi corrigida topograficamente, a correlação entre as variáveis foi reduzida significativamente ($R = -0,08$) (Figura 5.5B).

Na banda espectral do verde (Figura 5.5C), o coeficiente de correlação dos dados provenientes da imagem não corrigida foi de 0,86. Após a correção topográfica, este valor foi reduzido para 0,03 (Figura 5.5D). A inclinação da reta foi menor, uma vez que o coeficiente angular mudou de 5,29 para 0,11 com a correção topográfica.

O coeficiente de correlação na banda espectral do vermelho variou de 0,85 (Figura 5.5E) para 0,02 (Figura 5.5F) com a correção topográfica. Decorrente do procedimento, o coeficiente angular mudou de 3,43 para 0,05.

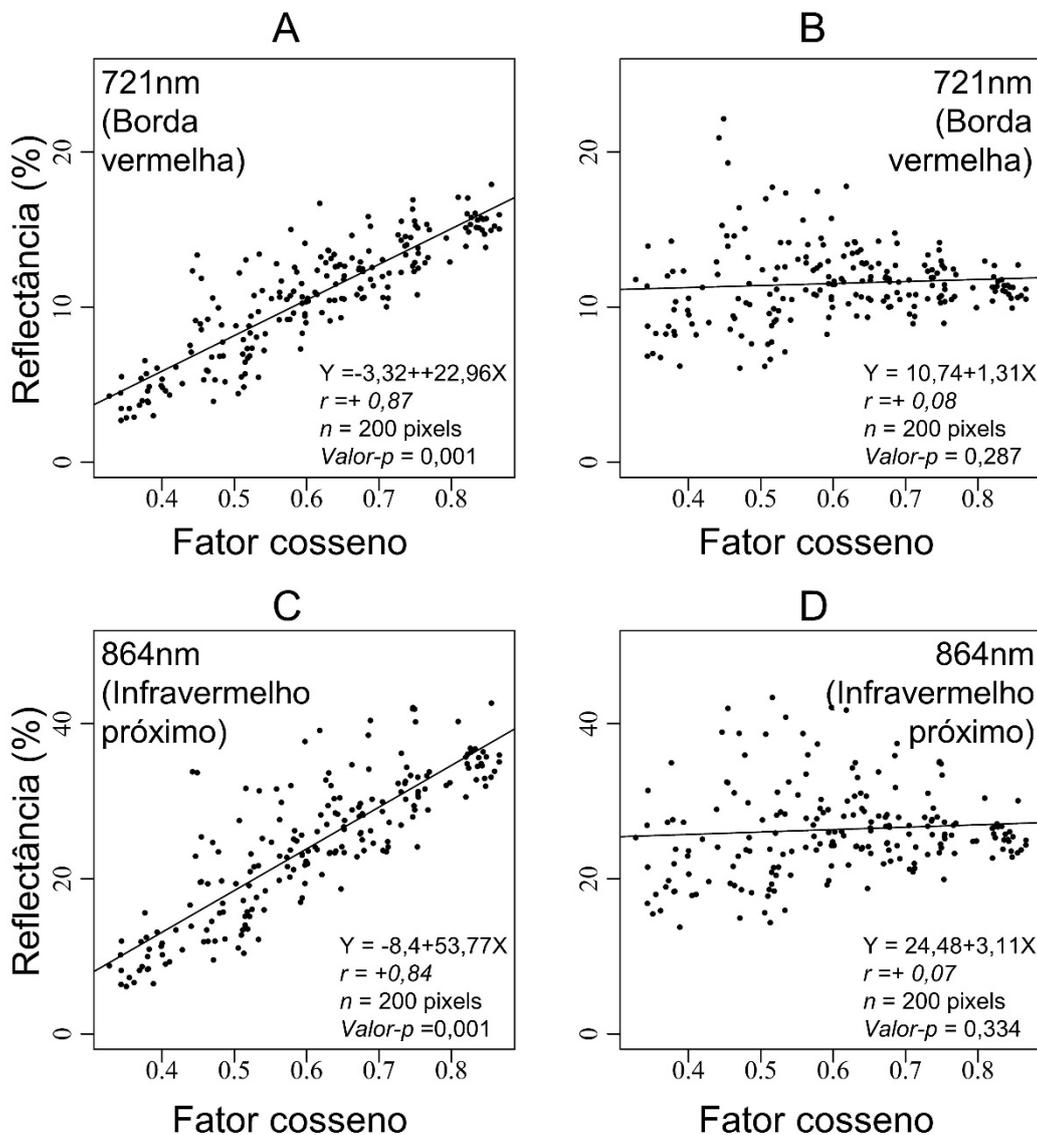
Figura 5.5. Relações entre o fator cosseno e a reflectância das bandas espectrais do Hyperion/EO-1 do azul (487 nm), verde (569 nm) e vermelho (671 nm) para dados não corrigidos (A, C, E) e corrigidos (B, D, F) dos efeitos topográficos. n é o tamanho da amostra e Valor- p se refere ao valor do teste-t a 5% de significância.



Fonte: Produção do Autor.

Nas bandas espectrais do infravermelho próximo (864 nm) e da borda vermelha (721 nm), observaram-se os maiores valores de coeficientes de correlação antes da correção topográfica ($R = +0,84$ e $+0,87$ nas Figuras 5.6A e 5.6C). Para ambas as bandas, estes valores foram reduzidos para $+0,08$ (Figura 5.6B) e $+0,07$ (Figura 5.6D) após a correção topográfica.

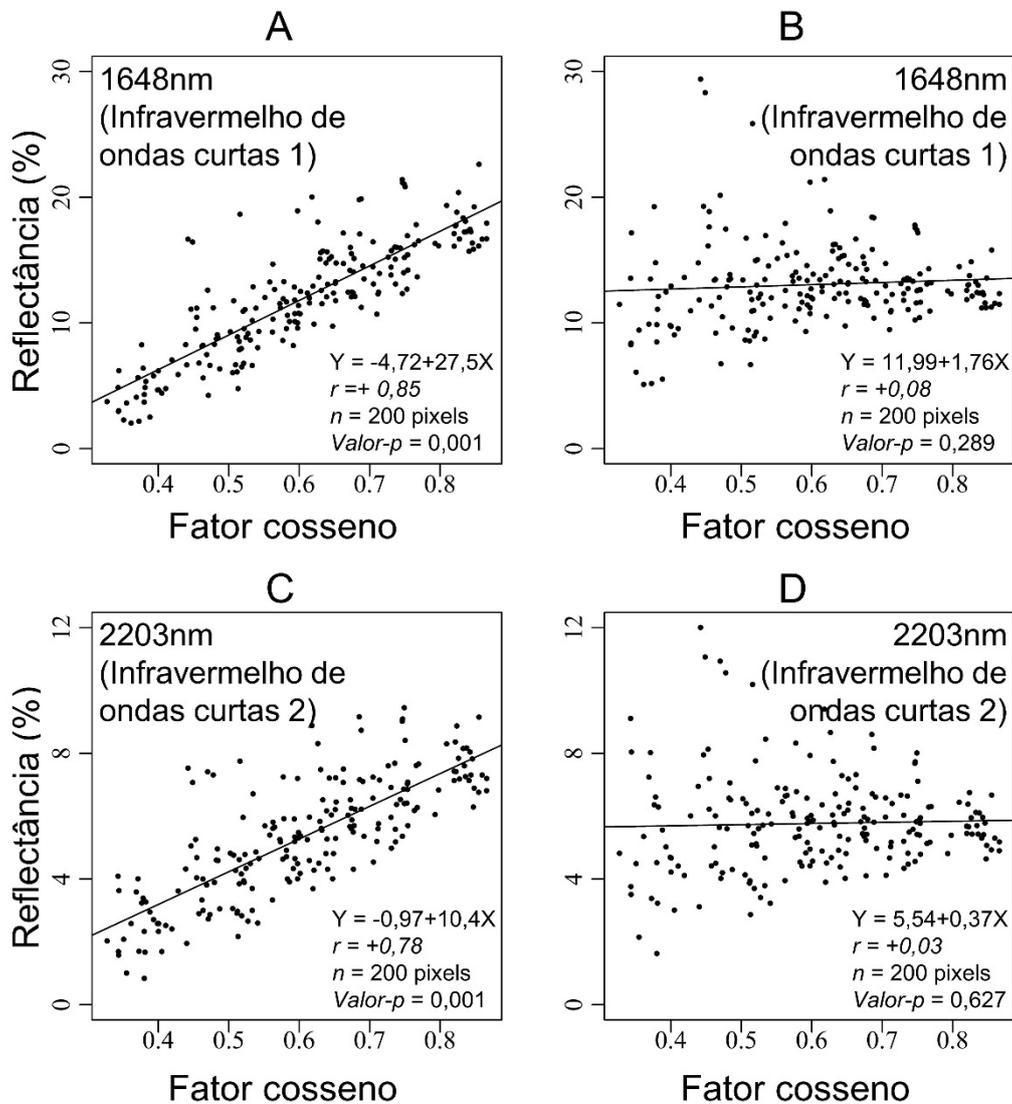
Figura 5.6. Relações entre o fator cosseno e a reflectância das bandas espectrais do Hyperion/EO-1 do infravermelho próximo (864 nm) e da borda vermelha (721 nm) para dados não corrigidos (A, C) e corrigidos (B, D) dos efeitos topográficos. n é o tamanho da amostra e Valor- p se refere ao valor do teste-t a 5% de significância.



Fonte: Produção do Autor.

Finalmente, nas bandas do infravermelho de ondas curtas do Hyperion, posicionadas em 1648 nm (Figuras 5.7A e 5.7B) e 2203 nm (Figuras 5.7C e 5.7D), a correção topográfica modificou os valores da correlação entre reflectância e fator cosseno de +0,85 para +0,08 (1648 nm) e +0,78 para +0,03 (2203 nm), respectivamente.

Figura 5.7. Relações entre o fator cosseno e a reflectância das bandas espectrais do Hyperion/EO-1 do infravermelho de ondas curtas 1 (1648 nm) e 2 (2203 nm) para dados não corrigidos (A, C) e corrigidos (B, D) dos efeitos topográficos. n é o tamanho da amostra e Valor- p se refere ao valor do teste-t a 5% de significância.



Fonte: Produção do Autor.

Em todas as bandas espectrais, os valores- p do teste t indicavam que existiam correlação entre os dados de reflectância e o fator cosseno antes da correção topográfica (valores- p inferiores a 0,05). Esta correlação diminuiu após a correção topográfica para valores não-estatisticamente significantes (valores- p superior a 0,05).

Assim, com base na inspeção das Figuras 5.5, 5.6 e 5.7, concluiu-se que a correção topográfica teve bom desempenho ao reduzir fortemente a correlação existente entre o fator de reflectância e o fator cosseno para todas as bandas espectrais do Hyperion/EO-1.

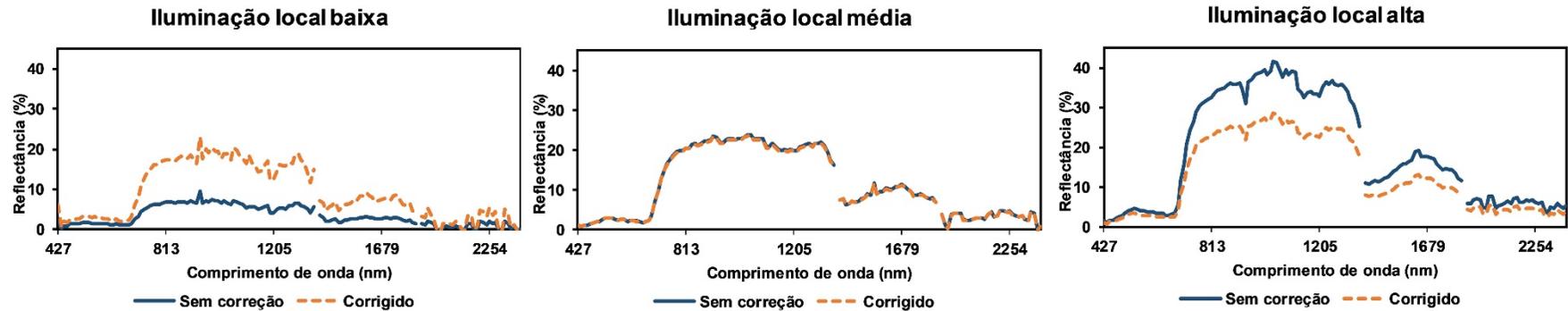
5.1.4 Análise das mudanças das curvas espectrais da vegetação sob diferentes condições de iluminação local devido a correção-C

A Figura 5.8 ilustra curvas de reflectância espectral extraídas de pixels posicionados em diferentes condições de iluminação local do terreno, representadas pelo fator cosseno. A resposta espectral foi obtida sobre um mesmo tipo de vegetação (Floresta Ombrófila Densa).

Em geral, observa-se que a correção-C aumenta os valores de reflectância das áreas sombreadas (Fator Cosseno: 0,344) e reduz os valores de reflectância das áreas iluminadas (Fator Cosseno: 0,863). Os espectros de reflectância após a correção topográfica são aproximadamente equivalentes entre si, especialmente quando comparado com a resposta espectral de áreas com condições de iluminação local intermediária (Fator Cosseno: 0,644). Este fato é observado na Figura 5.9, onde as curvas espectrais provenientes da imagem corrigida topograficamente estão praticamente sobrepostas.

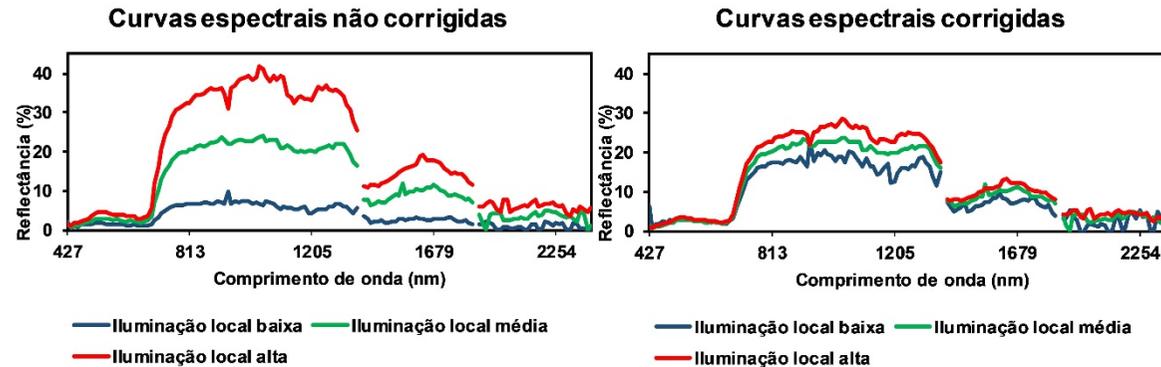
Desta forma, a correção-C foi capaz de minimizar os efeitos da topografia sobre as curvas espectrais de alvos semelhantes, fazendo com que toda a área de estudo aparente estar sob as mesmas condições de iluminação local.

Figura 5.8. Espectros de reflectância de pixels de floresta ombrófila densa, vistos pelo Hyperion/EO-1 sob diferentes condições de iluminação do terreno. Os resultados antes (linhas em azul) e após (linhas em laranja) a correção-C são apresentados.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 5.9. Efeito da correção-C sobre espectros de reflectância de floresta ombrófila densa de pixels vistos pelo Hyperion/EO-1 em diferentes condições de iluminação do terreno.



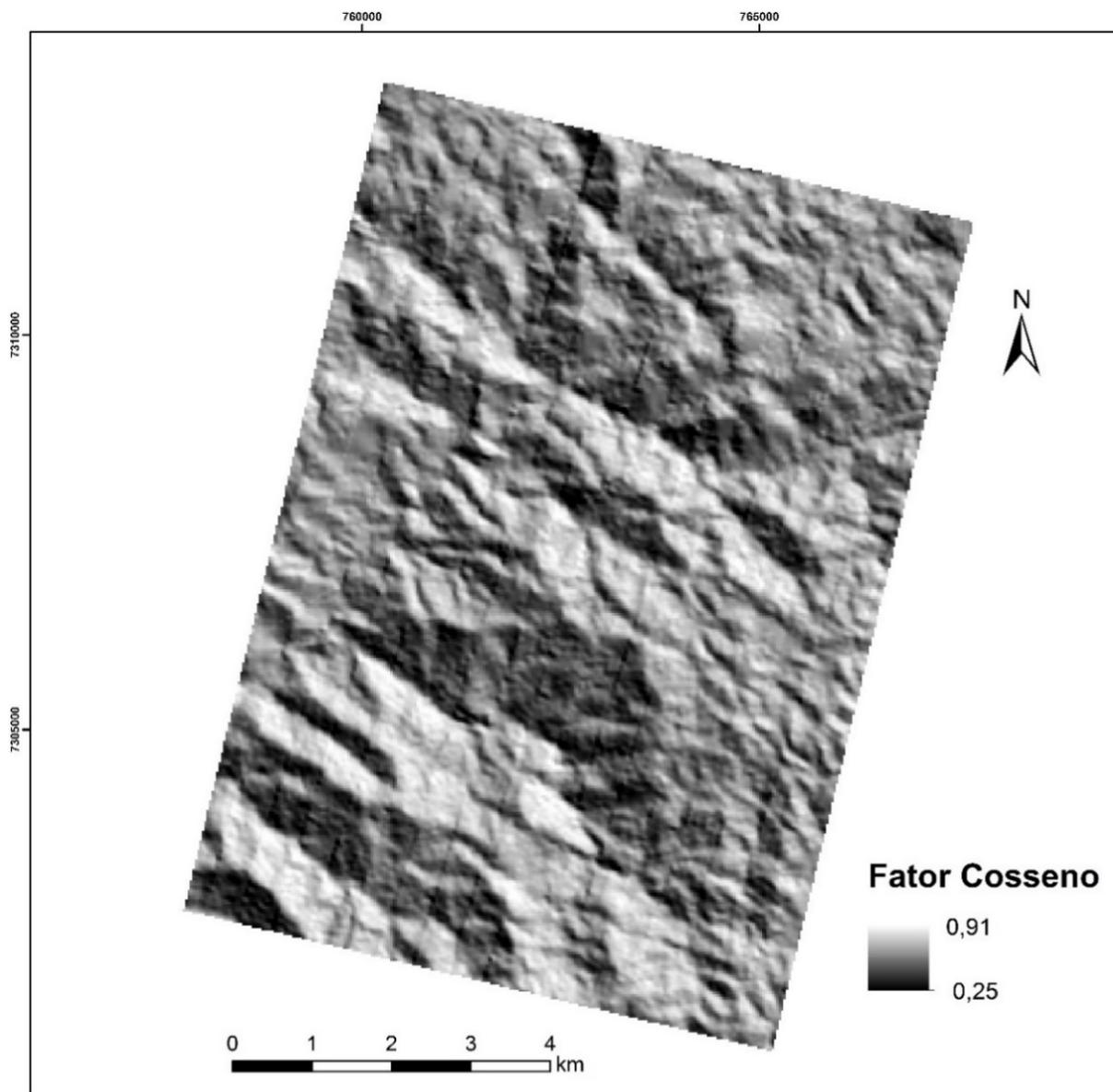
Fonte: Produção do Autor.

5.2 Análise da sensibilidade dos IVHs à correção topográfica em diferentes condições de iluminação do terreno

5.2.1 Análise visual de alguns IVHs antes e após a correção topográfica.

A Figura 5.10 apresenta a imagem do fator cosseno, que representa de forma quantificada a iluminação local da área de estudo. No momento em que a imagem foi gerada, o ângulo azimutal solar era de $46,15^\circ$ e o ângulo zenital solar de $49,52^\circ$. Essas condições fizeram com que as faces voltadas para o norte e leste se tornassem mais iluminadas, enquanto as faces para o sul e oeste estivessem mais sombreadas. O fator cosseno na área de estudo variou entre 0,25 e 0,91, com média de 0,626. A declividade influenciou na quantidade de energia eletromagnética recebida pelas superfícies. Vertentes mais inclinadas, orientadas a sudoeste, apresentaram maiores quantidades de energia incidente, enquanto vertentes menos inclinadas, orientadas a leste, apresentaram menores quantidades de iluminação.

Figura 5.10. Variações de iluminação local do terreno no momento da aquisição da imagem Hyperion/EO1, representadas pela imagem do fator cosseno. Pixels escuros e claros indicam superfícies sombreadas e iluminadas, respectivamente.



Sistema de Coordenadas: WGS 1984 UTM Zona 22S
Projeção: Transversa de Mercator
Datum: WGS 1984

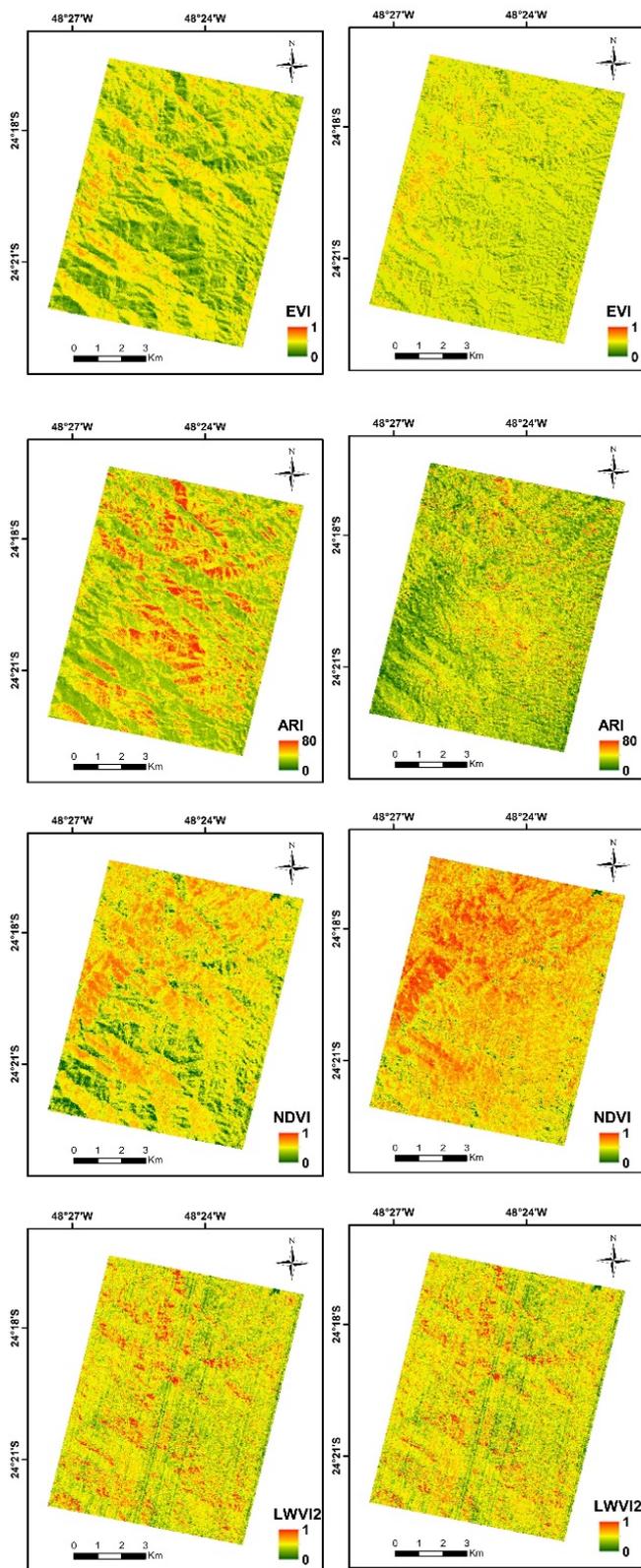
Fonte: Produção do Autor.

A Figura 5.11 ilustra a espacialização de 4 IVHs (EVI, ARI, NDVI e LWVI2) calculados sobre a área de estudo. Notou-se que, antes da correção topográfica, os IVHs EVI, ARI e EVI expressam as principais feições topográficas da área de estudo. Isto indica a forte influência dos efeitos topográficos sobre a determinação destes IVHS.

Visualmente, percebe-se forte semelhança entre as imagens IVHs calculadas sem correção topográfica, representadas na Figura 5.11, com as condições de iluminação local, representadas na Figura 5.10. Após a correção-C, as feições topográficas não são mais percebidas visualmente nas imagens IVHs.

Dentre as 4 imagens IVHs, calculadas antes e após a correção-C, apenas a imagem referente ao LWVI2 não apresentou visualmente as feições topográficas da área de estudo. Isto indica que este IVH é pouco sensível aos efeitos da topografia. Além disso, não foi possível perceber visualmente muitas mudanças entre a imagem do LWVI2 calculadas antes e após a correção-C.

Figura 5.11. Espacialização do EVI, ARI, NDVI e LWVI2 antes (a esquerda) e após (a direita) a correção-C.



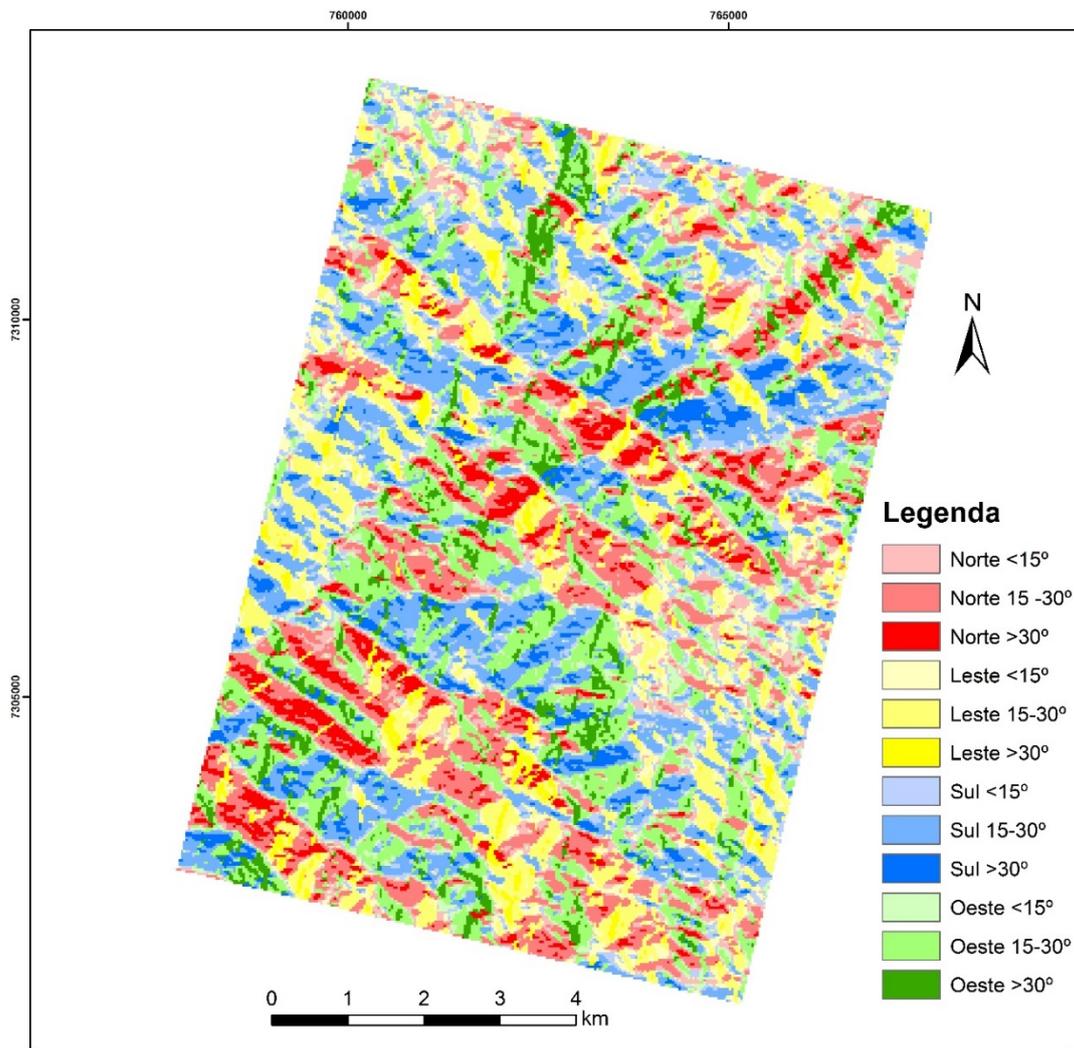
Fonte: Produção do Autor.

5.2.2 Classes topográficas

A Figura 5.12 apresenta a área de estudo subdividida em 12 classes temáticas relacionadas à orientação e à declividade das vertentes, as quais serão denominadas, neste trabalho, de “classes topográficas”.

Conforme visto na Figura 5.12, a área de estudo apresentou a maior parte das vertentes com orientações norte e sul, com a maior parte dos vales no sentido sudeste-noroeste. As vertentes, em sua maioria, apresentaram declividade entre 15° e 30° , superando 30° em algumas áreas. As regiões sudoeste e central da área de estudo apresentaram maiores declividades, enquanto as regiões ao leste apresentaram vertentes menos inclinadas.

Figura 5.12. Classificação da área de estudo por orientação e declividade (classes topográficas).



Sistema de Coordenadas: WGS 1984 UTM Zona 22S
Projeção: Transversa de Mercator
Datum: WGS 1984

Fonte: Produção do Autor.

5.2.3 Taxa de mudança relativa

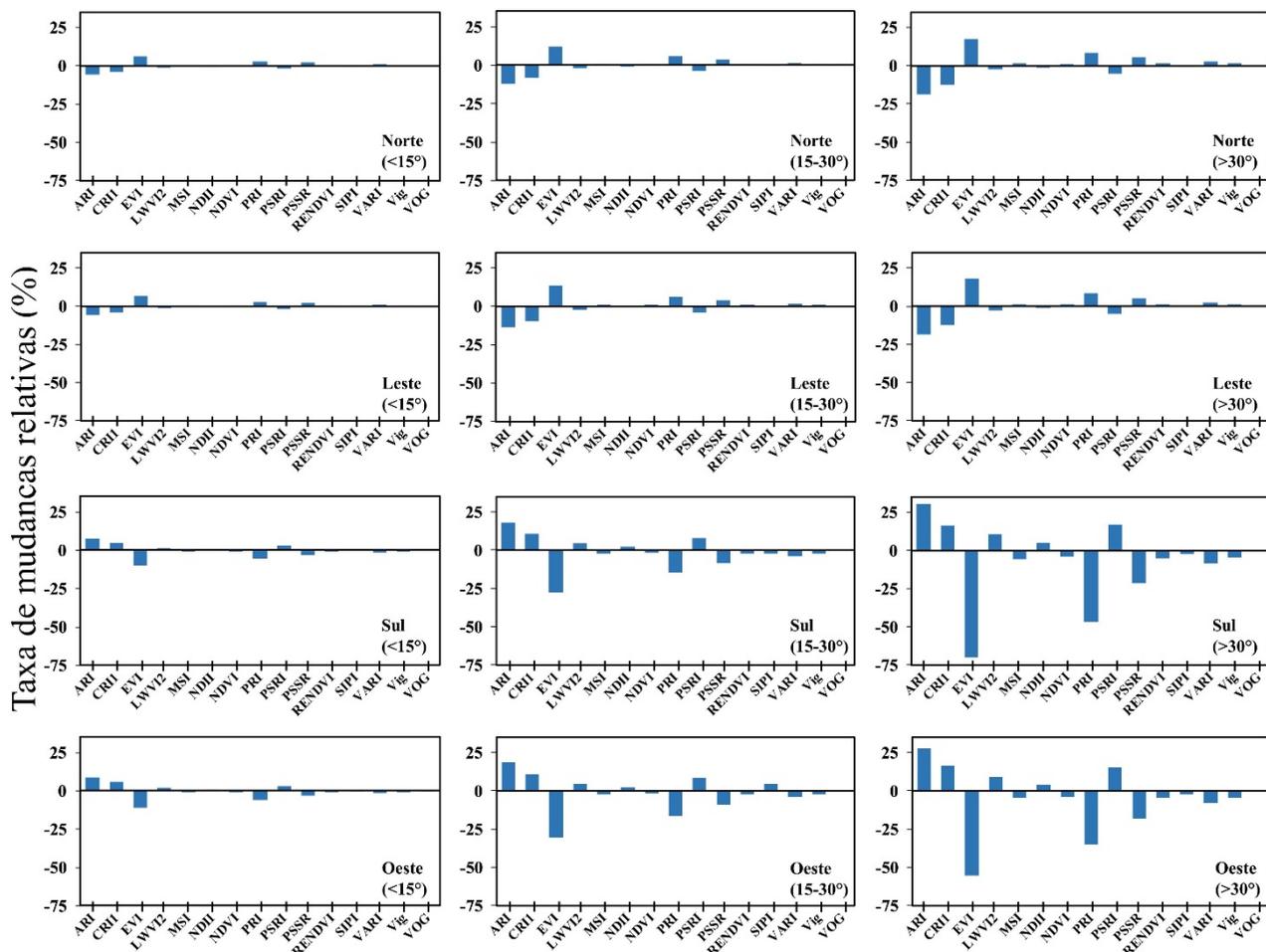
A taxa de mudança relativa dos valores dos IVHs, gerados a partir de imagens corrigidas e não corrigidas topograficamente, aumentou com a declividade (Figura 5.13). Todos os IVHs apresentaram maiores taxas de mudanças relativas nas classes topográficas com declividade superior a 30°, quando comparado com as classes topográficas de declividade inferior a 15° e entre 15 e 30°, nas mesmas condições da orientação de vertentes. A taxa de mudança relativa do PRI nas classes topográficas com orientação à leste, por exemplo, aumentou de 2,7%, quando as superfícies apresentaram declividade inferior a 15°, para 8,4%, quando as superfícies apresentaram declividade superior a 30°.

Quanto à orientação de vertentes, os IVHs calculados a partir das classes topográficas menos iluminadas, voltadas para oeste e sul, apresentaram maior taxa de mudança relativa do que os IVHs calculados a partir de áreas mais iluminadas, voltadas para leste e norte (Figura 5.13).

Os IVHs ARI, CRI1 e EVI apresentaram as maiores taxas de mudanças relativas em todas as classes, enquanto MSI, NDII, SIPI, VARI, VIG e VOG apresentaram as menores taxas de mudanças. Nas superfícies voltadas para o norte, com declividade maior que 30°, ARI, CRI1 e EVI apresentaram taxas de mudanças relativas de -18,6%, -12,4% e 17,5%, respectivamente. Nas superfícies voltadas para sul, com declividade maior que 30°, estes mesmos IVHs apresentaram taxas de mudanças relativas de 30,3% (ARI), 16,6% (CRI1) e 70% (EVI).

Conforme visto na Figura 5.13, as taxas de mudança relativa dos IVHs variaram de sinal de acordo com a orientação das vertentes. Os IVHs ARI, CRI1, LWVI2, NDII e PSRI apresentaram taxas de mudanças negativas nas classes voltadas a norte e a leste. Valores positivos foram observados nas faces voltadas a sul e a oeste. Desta forma, os valores destes IVHs foram reduzidos nas faces iluminadas e aumentaram nas faces sombreadas com a correção - C. O contrário aconteceu com os valores dos IVHs EVI, MSI, NDVI, PRI, PSSR, RENDVI, VARI, VIG e VOG.

Figura 5.13. Taxa de mudança relativa dos IVHs após a correção topográfica. Os resultados são apresentados por classes de declividade e orientação de vertentes.



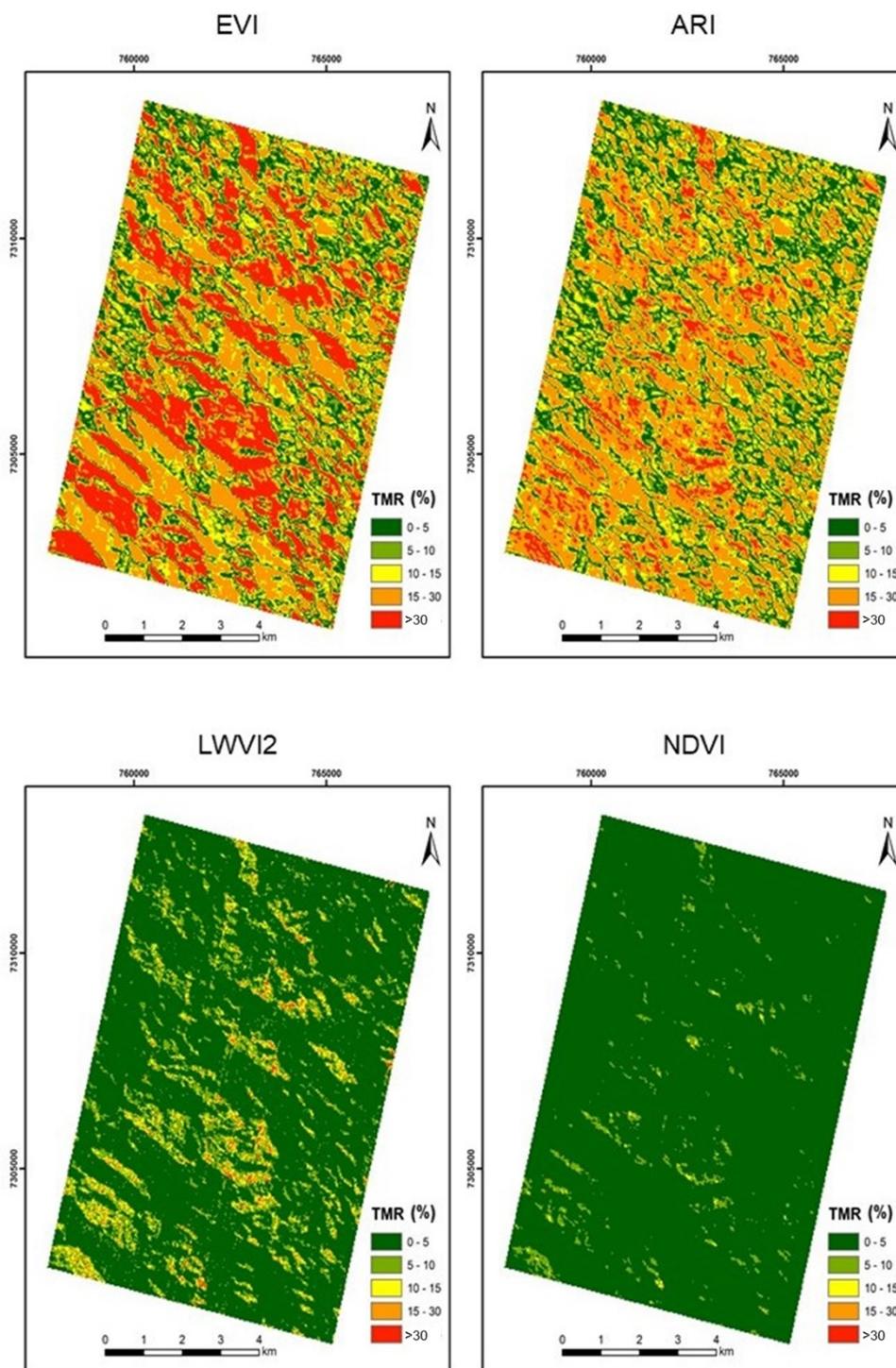
Fonte: Produção do Autor.

A Figuras 5.14 ilustra os resultados da espacialização da taxa de mudança relativa na área de estudo para EVI, ARI, NDVI e LWVI2, respectivamente. O EVI, na maior parte da área de estudo, apresentou altos valores de taxa de mudança relativa, principalmente nas vertentes voltadas para sul e oeste e com alta declividade. O ARI apresentou comportamento semelhante, porém com menor magnitude de mudança, apresentando predominantemente taxas de mudanças relativas entre 10 e 30%. Quando comparado com outros IVHs, o NDVI apresentou baixa taxa de mudança relativa, predominantemente inferior a 5%. Finalmente, o LWVI2 apresentou taxas de mudanças relativas

predominantemente abaixo de 10%, com umas poucas superfícies apresentando valores entre 10 e 30%.

Desta forma, percebe-se que os resultados apresentados na Figura 5.12 são concordantes com a espacialização dos IVHs na área de estudo, conforme esperado. O EVI apresentou taxas de mudanças relativas altas em quase toda área de estudo, assim como o ARI, especialmente nas áreas com orientação a sul e a leste e com declividade maior que 30°. Outros IVHs, como o NDVI e o LWVI2, apresentaram menores taxas de mudanças relativas.

Figura 5.14. Espacialização da taxa de mudança relativa (TMR) dos IVHs EVI, ARI, LWVI2 e NDVI na área de estudo, decorrente da correção topográfica C.



Fonte: Produção do Autor.

5.2.4 Teste de Wilcoxon

A Tabela 5.1 apresenta os valores- p (*p-value*) resultantes do teste de Wilcoxon. O teste foi realizado com nível de significância de 5%. A hipótese nula era de que as populações não diferiam significativamente, antes e após a correção topográfica. Desta forma, foi aplicado o teste de Wilcoxon para comparar os valores dos IVHs calculados a partir da imagem corrigida topograficamente e não corrigida topograficamente. Desta forma, pode se dizer que as populações que apresentaram p -value inferior a 5% (neste caso, os IVHs nas diferentes classes topográficas) diferiram significativamente. Para facilitar a identificação dos IVHs que diferiram significativamente nas diferentes classes topográficas, aqueles mais sensíveis aos efeitos topográficos foram destacados em vermelho.

Conforme visto na Tabela 5.1, a maioria dos IVHs, calculados antes e após a correção-C, diferiram significativamente em pelo menos uma classe topográfica. Em outras palavras, os IVHs calculados a partir dos dados corrigidos topograficamente podem ser considerados diferentes dos calculados a partir dos dados que não sofreram correção topográfica.

Alguns IVHs, como o ARI e o EVI, diferiram significativamente em todas condições topográficas, enquanto o VIg, o VOG, o SIPI e o LWVI2 não diferiram significativamente em nenhuma classe topográfica. Nas classes topográficas com declividade superior a 30° e orientação a oeste e a sul, a maior parte dos IVHs diferiram significativamente.

Para estimar a magnitude do tamanho do efeito da correção topográfica sobre os IVHs, calculou-se a métrica “r de Cohen”, conforme visto na próxima seção.

Tabela 5.1. Valor-p do teste de Wilcoxon dos IVHs nas diferentes condições topográficas. Células destacadas em amarelo indicam IVHs que diferiram a 5% de significância.

IVHs	Norte <15°	Norte 15°-30°	Norte >30°	Leste <15°	Leste 15°-30°	Leste >30°	Sul <15°	Sul 15°-30°	Sul >30°	Oeste <15°	Oeste 15°-30°	Oeste >30°
ARI	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
CRI	0.33	0.03	0.01	0.20	0.01	0.01	0.24	0.05	0.01	0.19	0.02	0.02
EVI	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
LWVI	0.64	0.47	0.33	0.62	0.37	0.27	0.51	0.23	0.06	0.51	0.28	0.07
MSI	0.65	0.45	0.19	0.64	0.31	0.25	0.56	0.15	0.01	0.49	0.23	0.02
NDII	0.73	0.58	0.43	0.68	0.47	0.35	0.65	0.30	0.04	0.61	0.28	0.08
NDVI	0.23	0.02	0.01	0.20	0.01	0.01	0.12	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01
PRI	0.40	0.16	0.01	0.42	0.16	0.01	0.24	0.03	0.01	0.15	0.01	0.01
PSRI	0.60	0.31	0.14	0.54	0.21	0.14	0.43	0.13	0.02	0.46	0.12	0.01
PSSR	0.28	0.01	0.01	0.21	0.01	0.01	0.09	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01
RENDVI	0.35	0.16	0.05	0.43	0.14	0.02	0.25	0.02	0.01	0.15	0.01	0.01
SIPI	0.94	0.83	0.59	0.89	0.99	0.81	0.97	0.82	0.19	0.91	0.92	0.25
VARI	0.70	0.36	0.20	0.72	0.39	0.29	0.62	0.29	0.01	0.53	0.22	0.04
VIG	0.82	0.55	0.40	0.81	0.52	0.49	0.73	0.47	0.13	0.68	0.45	0.15
VOG	0.84	0.78	0.71	0.87	0.77	0.70	0.79	0.66	0.34	0.76	0.53	0.40

Fonte: Produção do Autor.

5.2.5 Magnitudes de tamanho do efeito

A Figura 5.15 apresenta a magnitude de tamanho do efeito da correção topográfica sobre os IVHs, com base na estatística “r de Cohen”. Portanto, os resultados refletem as diferenças entre os valores de IVHs gerados a partir de imagens corrigidas e não corrigidas topograficamente. Seguindo a classificação da Tabela 4.1, as faixas em azul indicam valores de r em que a magnitude do tamanho do efeito é nula; as faixas em verde indicam efeitos de baixa magnitude; em amarelo, de média magnitude; e em rosa, de alta magnitude.

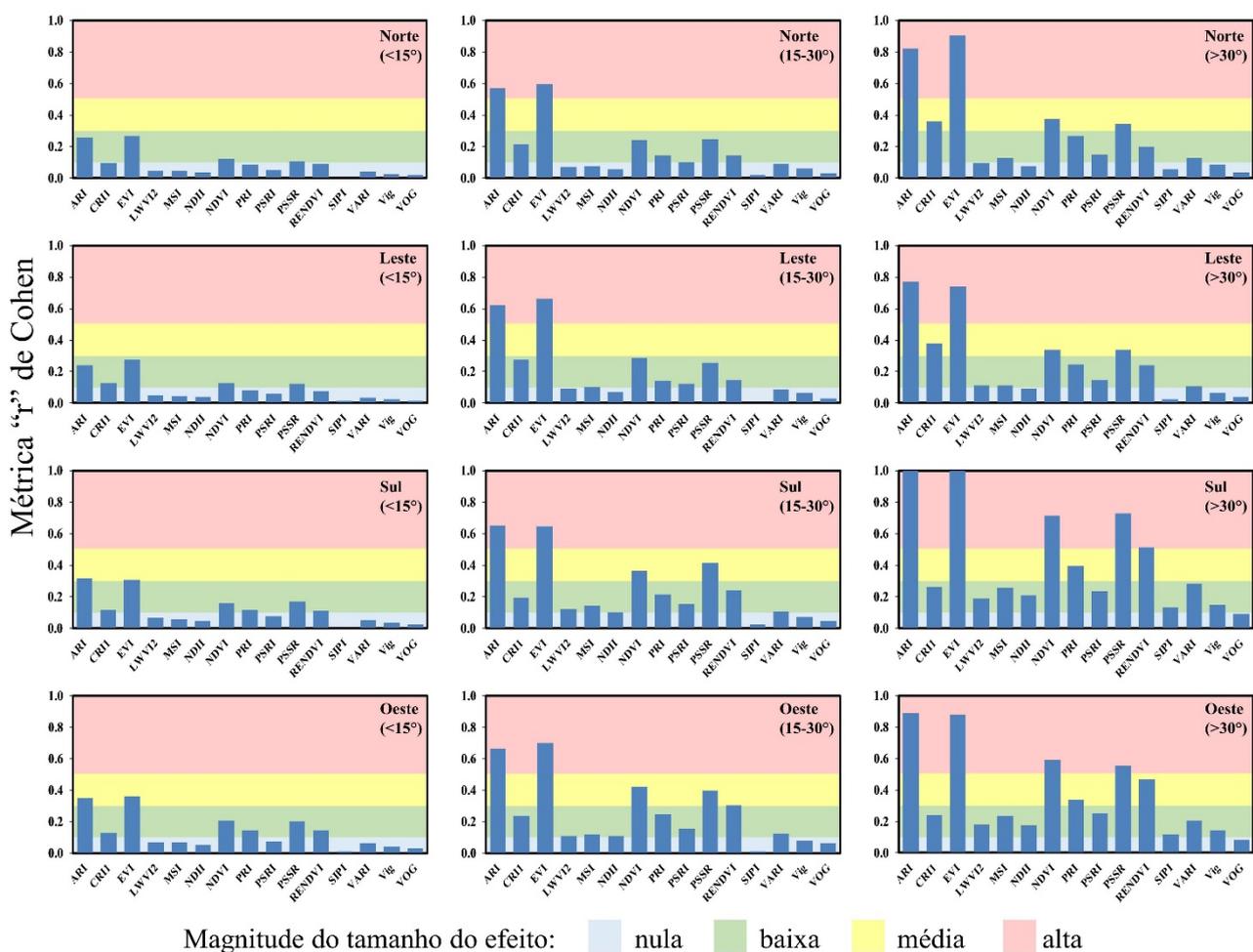
Nas classes com declividade inferior a 15°, os IVHs ARI, CRI1, EVI NDVI, PRI, PSSR e RENDVI apresentaram magnitude do tamanho do efeito não nula. Quando calculados em faces voltadas a oeste, o EVI e o ARI atingiram magnitude do tamanho do efeito média.

A magnitude do tamanho do efeito de todos IVHs aumentou com a declividade. Nas classes com declividade entre 15 e 30°, o ARI e o EVI apresentaram magnitude do tamanho do efeito alta, enquanto o NDVI e o PSSR baixa nas faces voltadas a norte e leste e alta nas faces voltadas a sul e a oeste. Somente o SIPI, VIg e o VOG apresentaram magnitude do tamanho do efeito nula em todas as condições de orientação.

Nas classes topográficas com declividade superior a 30°, o ARI e EVI apresentaram magnitude do tamanho do efeito alta em todas condições de orientação. O NDVI e o PSSR apresentaram magnitude do tamanho do efeito média quando calculados em faces voltadas ao norte e a leste; e alta, quando calculados em faces voltadas a oeste e a sul. Apenas o VOG apresentou magnitude do tamanho do efeito nula em todas classes topográficas com declividade superior a 30°.

Especificamente quanto a orientação, percebe-se que quando calculados a partir das classes mais sombreadas (voltadas a sul e oeste), todos IVHs apresentaram maiores magnitudes de tamanho do efeito.

Figura 5.15. Magnitude de tamanho do efeito da correção topográfica sobre a determinação dos IVHs, em função das classes de iluminação local do terreno.



Fonte: Produção do Autor.

6 DISCUSSÃO

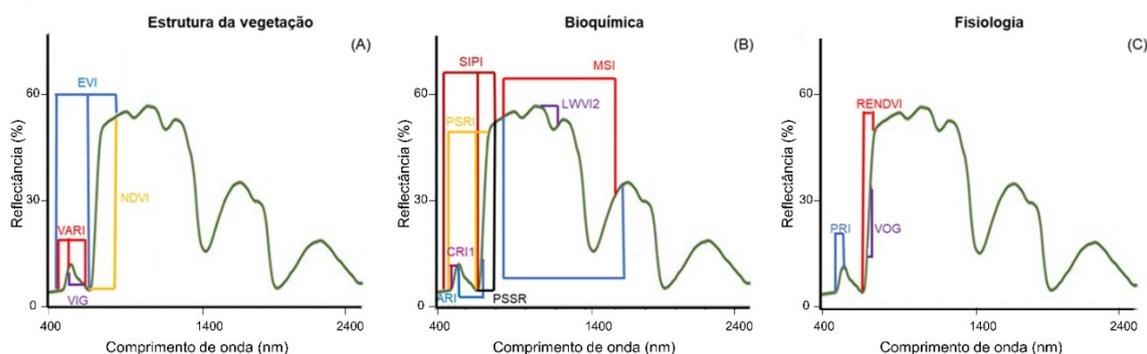
Neste estudo, investigou-se a sensibilidade de diferentes IVHs, calculados a partir de dados Hyperion obtidos no PEI, para os efeitos topográficos. Os resultados mostraram que as condições da topografia, principalmente em áreas de alta declividade e baixa iluminação local (que pode ser determinada pela orientação oposta ao Sol), impactaram de maneira acentuada os valores dos IVHs. Os resultados contribuíram para uma melhor compreensão dos possíveis efeitos topográficos em áreas montanhosas para as futuras missões hiperespectrais que visem oferecer produtos baseados em diferentes IVHs para todo o globo.

Ponzoni (2016), ao estudar a resposta espectral de florestas tropicais em relevo acidentado no sudeste do Brasil, percebeu que as distorções nas estimativas de reflectância espectral causadas pela topografia foram maiores em vertentes mais sombreadas. De forma semelhante, Gaida et al. (2016) notaram que os IVs calculados em vertentes sombreadas foram mais sensíveis aos efeitos topográficos. Ambos os trabalhos foram feitos com dados multiespectrais dos sensores TM/Landsat-5 e RapidEye, respectivamente.

Os resultados do presente estudo corroboraram com os dos autores acima mencionados, já que as taxas de mudança relativa e a magnitude de tamanho de efeito foram maiores para todos os IVHs nas classes topográficas menos iluminadas, com orientação voltada a oeste e a sul, e com inclinações superiores a 30°. Da mesma forma, a reflectância espectral e os IVHs das vertentes mais sombreadas apresentaram maiores sensibilidades à correção topográfica do que as das vertentes mais iluminadas.

A Figura 6.1 mostra as bandas utilizadas para a elaboração dos IVHs, considerando a resposta espectral típica de vegetação e a classificação dos IVHs da Tabela 2.1.

Figura 6.1. Representação esquemática do posicionamento das principais bandas utilizadas no cálculo dos IVHs relacionados com (A) estrutura da vegetação, (B) bioquímica e (C) fisiologia.



Fonte: Produção do Autor.

Os resultados deste trabalho mostraram que a correção-C afetou de forma diferente as bandas espectrais. As bandas espectrais das regiões espectrais do infravermelho próximo e de ondas curtas (1 e 2) apresentaram maiores mudanças do que as das outras regiões espectrais, como resultado da correção topográfica.

Dois dos IVHs voltados à estrutura da vegetação são formulados a partir de bandas da região espectral do visível e do infravermelho (EVI e NDVI) e dois são calculados a partir exclusivamente de bandas da região espectral do visível (VIG e VARI). O EVI foi proposto para melhorar as estimativas de IAF, de biomassas úmida, seca e verde, e de cobertura fracionada, que eram realizadas originalmente com base no NDVI. O objetivo era sanar as deficiências do NDVI, que tende a saturar em coberturas florestais com valores relativamente baixos de IAF (HUETE et al., 1999). Desta forma, o EVI possui em sua formulação um parâmetro L voltado a reduzir o impacto do solo e uma banda espectral na região espectral do azul para compensar os efeitos da atmosfera (ROBERTS et al., 2004, 2012). Todavia, observou-se que, dependendo do valor deste parâmetro, o índice torna-se bastante sensível à geometria de iluminação e de visada (GALVÃO et al., 2011; MOURA et al., 2012; MORTON et al., 2014).

No presente estudo, o EVI apresentou também grande sensibilidade a todas as condições de iluminação do terreno (classes topográficas), como indicado pela análise das taxas de mudanças relativas e pela análise da magnitude do tamanho do efeito devido à correção topográfica. A alta sensibilidade do EVI às condições topográficas observadas no PEI pode afetar as relações entre este índice e os parâmetros biofísicos da vegetação, fato que precisa ser melhor investigado. Como comparativo, a maior taxa de mudança relativa do EVI foi de 70%, enquanto a do NDVI foi de apenas 4,2%, quando se considerou, em ambos os casos, vertentes orientadas a sul com declividade superior a 30°. Por ser fortemente dependente da resposta do infravermelho próximo, o EVI é mais sensível aos efeitos topográficos do que o NDVI, confirmando análise prévia de efeitos topográficos com dados multiespectrais feita em áreas montanhosas do Japão por Matsushita et al. (2007). Neste estudo, os autores concluíram que IVs calculados a partir de razões não normalizadas entre bandas espectrais são mais sensíveis a efeitos topográficos do que IVs calculados a partir de razões normalizadas. Isto também foi verificado aqui com dados hiperespectrais. Portanto, IVHs que se baseiam em diferenças normalizadas tendem a compensar de forma mais efetiva os efeitos topográficos.

Outro IVH normalizado é o RENDVI, que apesar de ser classificado como de fisiologia da vegetação, foi proposto por Gitelson et al. (1996) para estimar concentrações de clorofila em folhas de boldo (*Acer platanooides* L.) e de castanheiras (*Aesculus hippocastanum* L.). Este IVH apresentou sensibilidade muito semelhante à do NDVI, com taxa de mudanças relativas um pouco maior, mas com magnitude de tamanho de efeito um pouco menor.

O VIg é calculado a partir das bandas da região espectral do verde (559 nm) e do vermelho (660 nm). É comumente utilizado para estimativas de vegetação fotossinteticamente ativa, uma vez que é possível aferir a quantidade de nitrogênio nas plantas a partir de análises da reflectância nas regiões espectrais do verde e do vermelho. Ele apresentou baixas taxas de mudanças relativas em todas as classes topográficas, alcançando apenas 5% na classe topográfica com declividade maior que 30° e orientação a oeste, e magnitude de tamanho do efeito nula ou baixa em todas as classes topográficas.

O VIg é um índice normalizado baseado nas bandas espectrais da região espectral do verde e do vermelho. Considerando que os efeitos atmosféricos sobre as regiões espectrais do vermelho e do verde não são tão diferentes, tais efeitos se anulariam no numerador, porém se somariam no denominador. Considerando ainda que os efeitos atmosféricos sobre as bandas da região espectral do azul são próximos ao dobro dos efeitos sobre as bandas das regiões espectrais do verde e do vermelho, Gitelson et al. (2002) propuseram o VARI. Este IVH possui a formulação semelhante à do VIg, com adição da estimativa de reflectância de uma banda da região espectral do azul ao denominador.

Apesar do VARI ser menos sensível aos efeitos atmosféricos do que o VIg, este índice apresentou maior sensibilidade aos efeitos da topografia, já que a taxa de mudança relativa e a magnitude de tamanho do efeito do VARI foram maiores que as do VIg em pelo menos 50% de todas as classes de iluminação analisadas.

Os resultados aqui obtidos mostraram que os IVHs relacionados à estrutura da vegetação, calculados a partir de bandas em uma única região espectral (VIg e VARI), apresentaram menores magnitudes de tamanho do efeito do que os calculados a partir de bandas em duas regiões espectrais distintas: visível e infravermelho (EVI, NDVI e RENDVI).

Quanto aos IVHs voltados à estimativa de bioquímica da vegetação, cinco deles são comumente utilizados para estimar concentração de pigmentos (ARI, CRI1, PSRI, PSSR e SIPI) e três outros para estimar a umidade da vegetação (LWVI2, MSI e NDII).

As formulações do ARI e do CRI1 são semelhantes. Ambos são calculados a partir da diferença entre o inverso da reflectância espectral do visível e da borda vermelha. O ARI é calculado a partir de uma banda posicionada na região espectral do verde (559 nm) e de outra posicionada na região da borda vermelha (721 nm). O ARI é um IVH importante para as estimativas de antocianinas e pigmentos de plantas, que podem indicar estresse e ter um papel na minimização da foto-inibição (ROBERTS et al., 2012). Para Araújo e

Deminicis (2009), a foto-inibição pode ser definida como “um complexo conjunto de processos moleculares que promovem a inibição de fotossíntese através do excesso de luz”. Assim, as antocianinas apresentam funções de proteção a luz visível e ultravioleta, a partir da absorção de luz na região espectral entre 400 e 600 nm (CLOSE et al., 2003).

Dentre os IVHs voltados às estimativas de carotenoides, pigmentos que auxiliam na absorção de energia pelas plantas para a fotossíntese, sendo mais comuns nas folhas conforme a senescência, destacaram-se o CRI1 e o SIPI. O CRI1 é calculado a partir da reflectância nas bandas espectrais de 510 e 550 nm. O SIPI é obtido com o uso das bandas espectrais posicionadas em 467 nm, 681 nm e 803 nm (ROBERTS et al., 2012).

ARI e o CR1 são formulados a partir de uma banda na região espectral do verde. Porém, o ARI tem em sua fórmula outra banda na região espectral do infravermelho próximo, enquanto o CRI1 inclui outra banda na região do visível. Esta diferença de formulação fez com que o ARI apresentasse taxa de mudança relativa e magnitude de tamanho do efeito maiores do que as observadas para o CRI1. Na área de estudo deste trabalho, o CRI1 se comportou como um dos IVHs mais sensíveis aos efeitos topográficos.

Por sua vez, o SIPI foi um dos IVHs menos sensíveis aos efeitos da topografia. A magnitude de tamanho do efeito sobre o SIPI foi nula ou baixa em todas as classes topográficas, enquanto os efeitos topográficos não afetaram o CRI1 apenas nas classes com declividade menor que 15°. É possível atribuir a diferença de sensibilidade topográfica entre estes IVHs às suas respectivas formulações, uma vez que o CRI1 é calculado a partir da diferença do inverso da reflectância e o SIPI é calculado como uma diferença normalizada.

Outros IVHs voltados para estimativas de pigmentos são o PSSR e o PSRI. O PSSR foi proposto para estimar clorofila a partir da razão simples entre uma banda espectral de absorção centrada no vermelho (671 nm) e outra de espalhamento posicionado no infravermelho próximo em 803 nm (BLACKBURN, 1998b). O PSRI, por sua vez, é formulado a partir da diferença da reflectância entre as bandas espectrais de absorção de clorofila (681 nm) e

do verde (489 nm), dividido pela banda do infravermelho próximo (750 nm). O PSRI tem como principal objetivo estimar o nível de senescência das plantas ou o nível de amadurecimento em que se encontram os frutos destas (MERZLYAK et al., 1999).

Em todas as classes de iluminação do terreno analisadas, as taxas de mudanças relativas do PSSR e do PSRI foram muito semelhantes, porém em sentidos contrários, com o IVH diminuindo ou aumentando em valor após a correção topográfica. As taxas de mudança relativa não foram maiores do que as observadas para CRI1 e PRI, como também não foram menores do que as verificadas para SIPI. Porém, a magnitude de tamanho do efeito topográfico do PSSR foi maior do que a do PSRI e do PRI.

O PRI é um IVH muito importante em estudos de eficiência do uso da luz para fotossíntese, usando duas bandas do verde (529 nm e 569 nm) para tal finalidade. Conforme as plantas se estressam, elas tendem a realizar menos fotossíntese, reduzindo a absorção da luz por volta de 530 nm e aumentando a reflectância nessa mesma banda espectral (ROBERTS et al., 2012). Apesar de ser um IVH normalizado, ele apresentou taxa de mudança relativa superior à do SIPI em todas as condições de orientação e declividade, e maior que a do CRI1 em todas as classes de iluminação com orientação não voltada para leste. Apresentou também magnitude do tamanho do efeito não nula em todas classes topográficas. Portanto, o PRI é um IVH bastante sensível aos efeitos topográficos. Além disso, também é muito sensível a efeitos causados pelas mudanças no ângulo de visada dos sensores (GALVÃO et al., 2012) e apresenta melhor relação com a eficiência do uso da luz quando estimado a partir de aquisições combinadas, ocorridas durante o período da manhã e durante o período da tarde (MIDDLETON et al., 2016). Desta forma, estudos baseados no PRI devem levar em conta as condições de iluminação local.

Quanto aos IVHs relacionados com a umidade do dossel, o LWVI2 foi proposto por Galvão et al. (2005) com o objetivo de discriminar variedades de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo usando a banda de absorção estreita de água foliar em 1205 nm. O MSI e o NDII são IVHs formulados para estimar a

umidade das copas das árvores, usando principalmente bandas do infravermelho de ondas curtas. Em geral, os IVHs de umidade da vegetação apresentaram baixa sensibilidade aos efeitos topográficos, uma vez que as taxas de mudanças relativas foram inferiores a 6% para todas as classes de iluminação. A magnitude do tamanho do efeito sobre esses IVHs foi menor do que para maior parte dos demais IVHs.

O VOG foi proposto por Vogelmann et al. (1993), com objetivo de separar folhas saudáveis de *Acer saccharum Marsh.* de folhas atacadas por insetos nos Estados Unidos. O VOG foi o IVH que apresentou a menor taxa de mudança relativa e a segunda menor magnitude de tamanho do efeito topográfico, com valores sempre próximos a zero. Acredita-se que isto se deu devido a formulação matemática do VOG, já que é baseado na razão entre bandas espectrais contíguas (centradas 742 e 722 nm). O efeito da topografia sobre essas bandas deve ser muito semelhante.

Os resultados deste trabalho mostraram que os efeitos topográficos não podem ser desconsiderados na análise de séries temporais que serão obtidas pelas futuras missões hiperespectrais, especialmente para os IVHs EVI, ARI, CRI1 e PRI. Em alguns trabalhos, é possível observar que isto de fato ocorre muitas vezes pela dificuldade de aplicar técnicas de correção topográfica. Por exemplo, Dhumal et al. (2017) analisaram o comportamento de seis IVHs (NDVI, EVI, ARVI, SGI, REDNVI e VOG) provenientes de uma imagem Hyperion/EO-1 para diferenciar áreas ocupadas por culturas de algodão e de milho na Índia. Os autores notaram que a média dos valores dos IVHs (com exceção do SGI) eram maiores quando estimados a partir de áreas com cultivos de algodão do que de áreas com cultivos de milho. Todavia, pelas imagens apresentadas no trabalho, percebe-se que a área de estudo apresenta relevo movimentado. Assim, as estimativas dos IVHs também foram influenciadas pelas diferenças de iluminação local do terreno. Desta forma, é possível que a diferença entre as médias dos IVHs reflita parcialmente a influência da topografia ao invés das diferenças espectrais entre os cultivos.

Em outra investigação, Wang et al. (2016) estudaram a relação entre IVHs originados de um sensor hiperespectral aerotransportado (HySpex) e as medições em campo (*in situ*) de parâmetros de estrutura do dossel, concentrações de nitrogênio foliar e concentração de clorofila. O estudo teve como base a vegetação de floresta temperada do Parque Florestal Nacional da Baviera (Alemanha). Os autores utilizaram seis IVHs para estimativas de nitrogênio foliar, oito IVHs para estimativas de estrutura do dossel, e 18 IVHs para estimativas de clorofila. Poucos IVHs apresentaram relação com as medições em campo. Todavia, os autores não levaram em consideração que a vegetação do Parque Florestal Nacional da Baviera ocorre em área de relevo movimentado, caracterizado por planaltos, montanhas e vales. Nesta área a variação de altitude alcança 800 m e a maior parte das vertentes apresenta orientação a sudoeste (BÄSSLER et al., 2010; TOMÁŠ; ROMPORTL, 2016). Assim, é possível que as relações entre IVHs e parâmetros biofísicos da vegetação tenham sido afetadas de alguma forma pelas condições de iluminação local.

Os resultados da presente investigação mostram que a correção topográfica deve ser um procedimento obrigatório em áreas montanhosas, dependendo do IVH selecionado para análise.

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou diferenças de sensibilidades de 15 IVHs aos efeitos topográficos, tendo como base uma área de estudo com cobertura homogênea de floresta ombrófila densa. Na área de estudo, os resultados mostraram que a anisotropia dos IVHs para os efeitos de iluminação local do terreno aumentou com a declividade das vertentes e com sua orientação para as direções sul e oeste. Esta orientação corresponde às superfícies sombreadas imageadas pelo Hyperion/EO-1, com valores relativamente baixos de fator cosseno.

Confirmou-se então a hipótese de que os IVHs possuem sensibilidades diferentes aos efeitos da topografia, com a magnitude dos efeitos sendo dependente das regiões espectrais de operação dos índices e das condições de declividade e orientação do terreno.

As principais conclusões deste trabalho indicaram que:

- a) A correção-C apresentou bom desempenho, pois foi capaz de gerar uma imagem corrigida topograficamente com aspecto aplainado em que se verificou redução do desvio-padrão da reflectância em todas as bandas espectrais do Hyperion/EO-1. Além disso, o procedimento reduziu a correlação existente entre os valores de reflectância espectral e o fator cosseno.
- b) As mudanças causadas nos valores dos IVHs devido a correção topográfica foram estatisticamente significativas (5% de significância), conforme indicado pelos valores de p , obtidos do teste de Wilcoxon, para comparação de amostras corrigidas e não-corrigidas para os efeitos topográficos.
- c) A partir da análise das métricas de mudanças (taxa de mudança relativa e magnitude do tamanho do efeito “ r de Cohen”), os resultados confirmaram que o EVI foi o IVH estrutural mais sensível aos efeitos topográficos, seguido por alguns IVHs de bioquímica da vegetação

voltados a estimativas de pigmentos (p.ex., ARI, CRI1, PSSR e PSRI) e de fisiologia das plantas (PRI). Quando comparado com o EVI, outros IVHs relacionados com a estrutura da vegetação (NDVI, RENDVI, VIG e VARI) foram menos afetados pelos efeitos topográficos, em função da normalização das bandas usadas em suas determinações. Os IVHs de bioquímica da vegetação, relacionados com estimativas de umidade do dossel (LWVI2, NDII e MSI), foram menos sensíveis do que os IVHs estruturais. Por último, o VIg, o VOG e o SIPI foram os IVHs menos sensíveis aos efeitos da topografia.

O estudo desenvolvido é importante para futuras investigações hiperespectrais da vegetação em áreas montanhosas, antecipando a resposta anisotrópica de diferentes IVHs estruturais, bioquímicos e de fisiologia das plantas para os efeitos de iluminação local do terreno. A análise dos efeitos de iluminação terreno sobre a determinação de IVHs complementa estudos em andamento para tentar se compreender efeitos mais amplos de geometria de iluminação e visada da cena durante a aquisição de dados por sensores de largo campo de visada ou com capacidade de apontamento. Os resultados também são importantes por servir de apoio para futuras missões hiperespectrais, que pretendam oferecer produtos de IVHs em escala global, ou para o satélite hiperespectral PRISMA, lançado em 2019 pela Agência Espacial Italiana, com faixa de imageamento de 30 km.

A análise de dados mostrou que, dependendo do IVH considerado e das características topográficas da área de estudo, a correção topográfica é um procedimento obrigatório para reduzir os efeitos de iluminação do terreno na resposta espectral da vegetação em áreas de relevo acidentado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APAN, A.; HELD, A.; PHINN, S.; MARKLEY, J. Detecting sugarcane “orange rust” disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 2, p. 489–498, 2004.
- ARAÚJO, S. A. C.; DEMINICIS, B. B. Fotoinibição da fotossíntese. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 7, n. 4, p. 463–472, 2009.
- ARFA, J. B. et al. Vegetation changes detection in Gabes Oases using EO1/Hyperion data. In: KALLEL, A.; KSIBI, M.; DHIA, H. B.; KHÉLIFI, N. (Ed). **Recent advances in environmental science from the Euro-Mediterranean and surrounding regions**. Berlin: Springer, 2018. p.1779–1781.
- BÄSSLER, C.; MÜLLER, J.; DZIOCK, F. Detection of climate-sensitive zones and identification of climate change indicators: a case study from the Bavarian Forest National Park. **Folia Geobotanica**, v. 45, n. 2, p. 163–182, 2010.
- BLACKBURN, G. A. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: A test using senescent tree leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 4, p. 657–675, 1998a.
- BLACKBURN, G. A. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 4, p. 657–675, 1998b.
- CHEN, W.; CAO, C. Topographic correction-based retrieval of leaf area index in mountain areas. **Journal of Mountain Science**, v. 9, n. 2, p. 166–174, 2012.
- CLOSE, D. C.; BEAOCE, C. L.; BEADLE, C. L.; BEAOCE, C. L. The ecophysiology of foliar anthocyanin. **Botanical Review**, v. 69, n. 2, p. 149–161, 2003.
- COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. 2.ed. Hillsdale: Lawrence Erlbaum, 1988.
- CUO, L.; VOGLER, J. B.; FOX, J. M. Topographic normalization for improving vegetation classification in a mountainous watershed in Northern Thailand. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 11, p. 3037–3050, 2010.

DHUMAL, R. K.; VIBHUTE, A. D.; NAGNE, A. D.; KALE, K. V; MEHROTRA, S. C. Performance analysis of spectral features based on narrowband vegetation indices for cotton and maize crops by EO-1 hyperion dataset rajesh.

Computational Intelligence in Data Mining, Advances in Intelligent Systems and Computing, v. 711, p. 581–590, 2017.

DORREN, L. K. A.; MAIER, B.; SEIJMONSBERGEN, A. C. Improved Landsat-based forest mapping in steep mountainous terrain using object-based classification. **Forest Ecology and Management**, v. 183, n. 1/3, p. 31–46, 2003.

DU, J.; HE, Z.; YANG, J.; CHEN, L.; ZHU, X. Detecting the effects of climate change on canopy phenology in coniferous forests in semi-arid mountain regions of China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 17, p. 6490–6507, 2014.

FELDE, G. W. et al. Analysis of hyperion data with the FLAASH atmospheric correction algorithm. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2003, Toulouse, France. **Proceedings... IEEE**, 2003. p. 90–92.

FIELD, A. **Discovering statistics using SPSS**. 2.ed. [S.l.]: Thousand Oaks, 2005.

FRIEDEL, M. J.; BUSCEMA, M.; VICENTE, L. E.; IWASHITA, F.; KOGA-VICENTE, A. Mapping fractional landscape soils and vegetation components from Hyperion satellite imagery using an unsupervised machine-learning workflow. **International Journal of Digital Earth**, v. 11, n. 7, p. 670–690, 2018.

FUNDAÇÃO FLORESTAL. P. E. INTERVALS. **Sobre o Parque**. Disponível em: <<http://fflorestal.sp.gov.br/intervalos/sobre-o-parque/>>. Acesso em: 20 fev. 2019.

GAIDA, W.; BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; TELES, T. S.; BALBINOT, R. Variações da reflectância e dos índices de vegetação em função dos parâmetros da modelagem topográfica no Parque Estadual do Turvo, Rio Grande do Sul, Brasil. **Investigaciones Geograficas**, v. 2016, n. 91, p. 105–123, 2016.

GALVÃO, L. S.; BREUNIG, F. M.; SANTOS, J. R.; MOURA, Y. M. View-illumination effects on hyperspectral vegetation indices in the Amazonian tropical forest. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 21, n. 1, p. 291–300, 2012.

GALVÃO, L. S.; BREUNIG, F. M.; TELES, T. S.; GAIDA, W.; BALBINOT, R. Investigation of terrain illumination effects on vegetation indices and VI-derived phenological metrics in subtropical deciduous forests. **GIScience and Remote Sensing**, v. 53, n. 3, p. 360–381, 2016.

GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; TISOT, D. A. Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 4, p. 523–534, 2005.

GALVÃO, L. S.; ROBERTS, D. A.; FORMAGGIO, A. R.; NUMATA, I.; BREUNIG, F. M. View angle effects on the discrimination of soybean varieties and on the relationships between vegetation indices and yield using off-nadir Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 4, p. 846–856, 2009.

GALVÃO, L. S. et al. On intra-annual EVI variability in the dry season of tropical forest: a case study with MODIS and hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 9, p. 2350–2359, 2011.

GALVÃO, L. S.; VITORELLO, Í.; ALMEIDA FILHO, R. Effects of band positioning and bandwidth on NDVI measurements of Tropical Savannas. **Remote Sensing of Environment**, v. 67, n. 2, p. 181–193, 1999.

- GAMON, J. A.; SERRANO, L.; SURFUS, J. S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. **Oecologia**, v. 112, n. 4, p. 492–501, 1997.
- GILES, P. T. Remote sensing and cast shadows in mountainous terrain. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 67, p. 833–839, 2001.
- GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 76–87, 2002(b).
- GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N.; CHIVKUNOVA, O. B. Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. **Photochemistry and Photobiology**, v. 74, n. 1, p. 38, 2001.
- GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N.; LICHTENTHALER, H. K. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. **Journal of Plant Physiology**, v. 148, n. 3/4, p. 501–508, 1996.
- GITELSON, A. A.; ZUR, Y.; CHIVKUNOVA, O. B.; MERZLYAK, M. N. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. **Photochemistry and Photobiology**, v. 75, n. 3, p. 272, 2002(a).
- GONG, P.; PU, R.; BIGING, G. S.; LARRIEU, M. R. Estimation of forest leaf area index using vegetation indices derived from Hyperion hyperspectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 6 PART I, p. 1355–1362, 2003.
- GOODENOUGH, D. G. et al. Processing hyperion and ali for forest classification. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 6, p. 1321–1331, 2003.
- GUANTER, L. et al. The EnMAP spaceborne imaging spectroscopy mission for earth observation. **Remote Sensing**, v. 7, n. 7, p. 8830–8857, 2015.

HANTSON, S.; CHUVIECO, E. Evaluation of different topographic correction methods for landsat imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, n. 5, p. 691–700, 2011.

HMIMINA, G. et al. Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: an investigation using ground-based NDVI measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 132, p. 145–158, 2013.

HOCHBERG, E. J.; ROBERTS, D. A.; DENNISON, P. E.; HULLEY, G. C. Special issue on the Hyperspectral Infrared Imager (HyspIRI): emerging science in terrestrial and aquatic ecology, radiation balance and hazards. **Remote Sensing of Environment**, v. 167, p. 1–5, 2015.

HOLBEN, B. N.; JUSTICE, C. O. The topographic effect on the spectral response of nadir pointing sensors. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 46, p. 1191–1200, 1980.

HUETE, A. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 3, p. 440–451, 1997.

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; LEEUWEN, W. VAN. Modis vegetation index. **Vegetation Index and Phenology Lab**, v. 3, n. 1, p. 129, 1999.

HUNTJR, E.; ROCK, B. Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances. **Remote Sensing of Environment**, v. 30, n. 1, p. 43–54, 1989.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2.ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

JACON, A. D.; GALVÃO, L. S.; SANTOS, J. R.; SANO, E. E. Seasonal characterization and discrimination of savannah physiognomies in Brazil using hyperspectral metrics from hyperion/EO-1. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 15, p. 4494–4516, 2017.

- JIA, W.; PANG, Y.; MENG, S.; JU, H.; LI, Z. Tree species classification using airborne hyperspectral data in subtropical mountainous forest. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2016. **Proceedings...** IEEE, 2016. p.2284–2287.
- KAUFMAN, Y. J. et al. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 102, n. D14, p. 17051–17067, 1997.
- KRUSE, F. A.; BOARDMAN, J. W.; HUNTINGTON, J. F. Comparison of airborne hyperspectral data and eo-1 hyperion for mineral mapping. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 6, p. 1388–1400, 2003.
- LAMBERT, J.; DRENOU, C.; DENUX, J. P.; BALENT, G.; CHERET, V. Monitoring forest decline through remote sensing time series analysis. **GIScience and Remote Sensing**, v. 50, n. 4, p. 437–457, 2013.
- LANDIS, D. R. et al. EO-1: 15 years after the start of its "one-year mission. **The Earth Observer**, v. 28, n. 1, p. 4–44, 2016.
- LEITÃO, P. J. et al. Mapping woody plant community turnover with space-borne hyperspectral data: a case study in the Cerrado. **Remote Sensing in Ecology and Conservation**, p. 1–9, 2018.
- LIANG, L.; SCHWARTZ, M. D.; FEI, S. Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 1, p. 143–157, 2011.
- LIMA, R. N. DE S.; RIBEIRO, C. B. DE M. Comparison of Topographic Correction Methods on Landsat Imagery under Different Lighting Conditions. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 5, p. 1097–1116, 2014
- LIU, C.; LI, N.; LI, X.; ZHAO, H. The research by topographic correction methods of airborne hyperspectral remote sensing data based on DEM. **Proceedings of SPIE**, v. 9260, p. 926049, Nov. 2014.

LOIZZO, R.; GUARINI, R.; LONGO, F.; et al. Prisma: The Italian hyperspectral mission. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). **Anais...** . v. 2018-July, p.175–178, 2018.

MATSUNAGA, T.; IWASAKI, A.; TSUCHIDA, S.; et al. **Hisui Status Toward Fy2019 Launch**. Tokyo: National Institute for Environmental Studies (NIES), The University of Tokyo , 2018. p. 160–163.

MATSUSHITA, B.; YANG, W.; CHEN, J.; ONDA, Y.; QIU, G. Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to topographic effects: a case study in high-density cypress forest. **Sensors**, v. 7, n. 11, p. 2636–2651, 2007.

MERZLYAK, M.; GITELSON, A.; CHIVKUNOVA, O.; RAKITIN, V. Y. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. **Physiologia Plantarum**, v. 106, n. 1, p. 135–141, 1999.

MIDDLETON, E. M.; HUENNRICH, K. F.; LANDIS, D. R.; et al. Photosynthetic efficiency of northern forest ecosystems using a MODIS-derived Photochemical Reflectance Index (PRI). **Remote Sensing of Environment**, v. 187, p. 345–366, 2016.

MOREIRA, E. P. **Correção radiométrica do efeito de iluminação solar induzido pela topografia**. 2014. 112p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

MOREIRA, E. P.; VALERIANO, M. D. M.; RENNÓ, C. D.; FRANÇA, H. Efeito da topografia sobre a classificação do uso e baseada em objetos. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, p. 505–517, 2016.

MOREIRA, E. P.; VALERIANO, M. M. Application and evaluation of topographic correction methods to improve land cover mapping using object-based classification. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 32, n. 1, p. 208–217, 2014.

MORTON, D. C. et al. Amazon forests maintain consistent canopy structure and greenness during the dry season. **Nature**, v. 506, n. 7487, p. 221–224, 2014.

MOURA, Y. M.; GALVÃO, L. S.; SANTOS, J. R.; ROBERTS, D. A.; BREUNIG, F. M. Use of MISR/Terra data to study intra- and inter-annual EVI variations in the dry season of tropical forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 127, p. 260–270, 2012.

NATALE, V. G.; KAFRI, A.; TIDHAR, G. A.; et al. SHALOM - Space-borne hyperspectral applicative land and ocean mission. **Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing, Evolution in Remote Sensing**, v. 2013, p. 5–8, 2017.

PEARLMAN, J. S. et al. Hyperion, a space-based imaging spectrometer. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 6, p. 1160–1173, 2003.

PEÑUELAS, J.; BARET, F.; FIRELELLA, I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. **Photosynthetica**, v.31, n.2, p.221-230, 1995.

PLAZA, A.; PLAZA, J.; MARTIN, G.; SÁNCHEZ, S. Hyperspectral data processing algorithms. **Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation**, p. 121–137, 2012.

PONZONI, F. J. Impact of topographic correction on soil and vegetation cover spectral characterization by Tm/Landsat 5 imagery. **Cerne**, v. 22, n. 3, p. 289–298, 2016.

PONZONI, F. J.; SILVA, C. B.; SANTOS, S. B.; MONTANHER, O. C.; SANTOS, T. B. Local illumination influence on vegetation indices and plant area index (PAI) relationships. **Remote Sensing**, v. 6, n. 7, p. 6266–6282, 2014.

REESE, H.; OLSSON, H. C-correction of optical satellite data over alpine vegetation areas: a comparison of sampling strategies for determining the empirical c-parameter. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 6, p. 1387–1400, 2011.

- RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; SALAS, J.; AGUADO, I. Assessment of different topographic corrections in Landsat -TM data for mapping vegetation types. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 5, p. 1056–1061, 2003.
- ROBERTS, D. A.; ROTH, K. L.; PERROY, R. L. Hyperspectral Vegetation Indices. In: THENKABAIL, P. S.; LYON, J. G. (Ed.). **Hyperspectral remote sensing of vegetation**. Boca Raton: CRC Press, 2012. p.309–327.
- ROBERTS, D. A. et al. Spectral and structural measures of northwest forest vegetation at leaf to landscape scales. **Ecosystems**, v. 7, n. 5, p. 545–562, 2004.
- ROCK, B. N.; VOGELMANN, J. E.; WILLIAMS, D. L.; VOGELMANN, A. F.; HOSHIZAKI, T. Remote detection of forest damage. **BioScience**, v. 36, n. 7, p. 439–445, 1986.
- ROUSE, W.; HAAS, H.; DEERING, W. 20 Monitoring vegetation systems in the great plains with Erts. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973. **Proceedings...** Greenbelt: NASA, 1973.
- SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS DA BACIA DO RIBEIRA DE IGUAPE E LITORAL SUL DO CBH-RB. **Caderno de informações sobre a Bacia do Ribeira**. Registro: SIRGB, 2011.
- SONG, C.; WOODCOCK, C. E. Monitoring forest succession with multitemporal Landsat images: factors of uncertainty. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 11 PART I, p. 2557–2567, 2003.
- TEILLET, P. M.; GUINDON, B.; GOODENOUGH, D. G. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 2, p. 84–106, 1982.
- THENKABAIL, P. S.; ENCLONA, E. A.; ASHTON, M. S.; LEGG, C.; DIEU, M. J. . Hyperion, IKONOS, ALI, and ETM+ sensors in the study of African rainforests. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 1, p. 23–43, 2004.

TOMÁŠ, J.; ROMPORTL, D. Comparative landscape typology of the Bohemian and Bavarian Forest National Parks. **European Journal of Environmental Sciences**, v. 6, n. 2, p. 114–118, 2016.

VERAVERBEKE, S.; VERSTRAETEN, W. W.; LHERMITTE, S.; GOOSSENS, R. Illumination effects on the differenced Normalized Burn Ratio's optimality for assessing fire severity. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 12, n. 1, p. 60–70, 2010.

VERBYLA, D. L.; KASISCHKE, E. S.; HOY, E. E. Seasonal and topographic effects on estimating fire severity from Landsat TM/ETM+ data. **International Journal of Wildland Fire**, v. 17, n. 4, p. 527, 2008.

VERRELST, J.; SCHAEPMAN, M. E.; KOETZ, B.; KNEUBÜHLER, M. Angular sensitivity analysis of vegetation indices derived from CHRIS/PROBA data. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 5, p. 2341–2353, 2008.

VOGELMANN, J. E.; ROCK, B. N.; MOSS, D. M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 8, p. 1563–1575, 1993.

WANG, Z.; WANG, T.; DARVISHZADEH, R.; et al. Vegetation indices for mapping canopy foliar nitrogen in a mixed temperate forest. **Remote Sensing**, v. 8, n. 6, p. 1–20, 2016.

WEI, H. et al. Topographic effects on estimating net primary productivity of green coniferous forest in complex terrain using Landsat data: a case study of Yoshino Mountain, Japan. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 11, p. 2941–2957, 2010.

WESTPHALEN, A. B.; SALDANHA, D. L.; ALMEIDA ESPINOZA, J. M.; CALLIARP, L. J.; ORTIZ, M. S. Identificação de minerais de titânio na Região do Bojuru, São José do Norte, RS - Brasil, com técnicas de espectroscopia de reflectância. **Serie Correlación Geológica**, v. 33, n. 2, p. 1–10, 2017.

WU, Q.; JIN, Y.; FAN, H. Evaluating and comparing performances of topographic correction methods based on multi-source DEMs and Landsat-8 OLI data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 37, n. 19, p. 4712–4730, 2016.

YAMAZAKI, F.; LIU, W.; TAKASAKI, M. Characteristics of shadow and removal of its effects for remote sensing imagery. **International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, v. 4, p.426-429, 2009.