ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Efeito topográfico sobre a resposta espectral de povoamentos florestais de *Pinus taeda* Linnaeus no Sul do Brasil

William Gaida¹, Fábio Marcelo Breunig², Edison Rogério Perrando³

¹ Doutor em Geografia, Universidade Federal de Santa Maria, Linha 7 de Setembro, s/n, BR 386 Km 40, CEP 98400-000, Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul. ufsm.william@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9946-0493> (autor correspondente). ² Doutor em Sensoriamento Remoto. Professor do Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Linha 7 de Setembro, s/n, BR 386 Km 40, CEP 98400-000, Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul. breunig@ufsm.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0405-9603>. ³ Doutor em Engenharia Florestal. Professor do Departamento de Engenharia Florestal. Universidade Federal de Santa Maria, Linha 7 de Setembro, s/n, BR 386 Km 40, CEP 98400-000, Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul. edison.perrando@ufsm.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7602-3159>.

Artigo recebido em 09/04/2021 e aceito em 17/11/2021.

RESUMO

Este estudo tem como objetivo examinar a influência da variação sazonal da geometria da irradiância solar na resposta espectral de povoamentos florestais de *Pinus taeda*, localizados na Região Centro-Oeste do Estado de Santa Catarina, Brasil. A influência do efeito topográfico foi analisada por meio de medidas de refletância de superfície e índices de vegetação, obtidas a partir de três imagens MSI/Sentinel-2, adquiridas em baixo, médio e alto ângulo de elevação solar, no segundo semestre de 2018. A influência do efeito topográfico foi analisada a partir das oscilações de valor dos dados de sensoriamento remoto em comparação com as condições de iluminação, delineadas a partir das variações angulares de orientação de vertentes e declividade. Foram realizadas análises de correlação e regressão entre os dados espectrais e as condições de iluminação do terreno, definidas pelos valores do cosseno do ângulo de incidência. As medidas de refletância do dossel foram influenciadas diretamente pelo aspecto direcional da exposição a iluminação, e diminuições em seus valores foram identificadas nas porções do dossel com orientação contrária ao azimuth solar (sul e sudoeste). Os índices de vegetação NDVI, WDRVI e NDRE, apresentaram valores superestimados nas porções sombreadas do dossel, devido às características espectrais dos dosséis de *Pinus*. O NDRE foi o índice menos sensível ao efeito topográfico, enquanto o EVI apresentou maior variação a ele associado. A aplicação da normalização topográfica mostrou-se eficaz em mitigar as diferenças entre os valores obtidos em diferentes condições de iluminação.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, Sentinel-2, silvicultura, geometria solar.

Topographic effect on the spectral response of *Pinus taeda* Linnaeus forest stands in Southern Brazil

ABSTRACT

This study aims to examine the influence of seasonal variation of solar irradiance geometry on the spectral response of *Pinus taeda* forest stands, located in the Midwest Region of Santa Catarina State, Brazil. The influence of the topographic effect was analyzed using surface reflectance and vegetation indices measurements, obtained from three MSI/Sentinel-2 images, acquired at low, medium, and high solar elevation angle, in the second semester of 2018. The influence of the topographic effect was analyzed from the value oscillations of remote sensing data compared to the illumination conditions, delineated from the angular variations of aspect and slope. Correlation and regression analyses were performed between the spectral data and the terrain illumination conditions, defined by the values of the cosine of the incidence angle. The canopy reflectance measurements were directly influenced by the directional aspect of the lighting exposure, and decreases in their values were identified in the portions of the canopy with orientation contrary to the solar azimuth (south). The vegetation indices NDVI, WDRVI, and NDRE, showed overestimated values in the shaded portions of the canopy, due to the spectral characteristics of the pine canopies. The NDRE was the least sensitive index to the topographic effect, while the EVI showed a greater variation associated with it. The application of the topographic effect correction proved to be effective in mitigating the differences between the values obtained under different lighting conditions.

Key-words: remote sensing; Sentinel-2; forestry; solar geometry.

Introdução

A silvicultura brasileira tem apresentando um expressivo crescimento, tanto em área plantada, quanto em produtividade, fazendo das florestas comerciais o principal fornecedor de matéria-prima para a indústria de base florestal, respondendo como uma alternativa viável ao modelo extrativista, tradicionalmente empreendido sobre as florestas nativas (IBGE, 2020), sendo responsável por aproximadamente 1,2% do produto interno bruto brasileiro (IBÁ, 2020). Neste cenário, a Região Sul do Brasil destaca-se pela elevada produtividade, apresentando um dos maiores desempenhos do setor, resultado da implementação de grandes empreendimentos florestais e do desempenho dos povoamentos florestais, alicerçados principalmente no manejo de espécies do gênero *Pinus*, oriundas da América do Norte (Shimizu, 2008; IBÁ, 2020), as quais apresentam elevada capacidade de adaptação as condições edafoclimáticas encontradas no Planalto Meridional nos Estados do Paraná e Santa Catarina, onde encontram-se os maiores povoamentos florestais de *Pinus taeda* Linnaeus, espécie que mais se destaca em volume produtivo na região (Gomes et al., 2016).

Além da capacidade de adaptação das espécies de *Pinus*, a sua elevada produtividade depende da aplicação efetiva de procedimentos de manejo silviculturais, o que exige o monitoramento do desenvolvimento dos projetos de plantio ao longo do ciclo produtivo. Neste sentido, a aplicação de técnicas e produtos de sensoriamento remoto mostra-se como uma alternativa eficiente e de baixo custo, permitindo o acompanhamento do vigor vegetativo em extensas áreas de cultivo com abrangência espacial e temporal adequados (Waldhoff et al., 2017; Jafari et al., 2020). Embora o uso apropriado de dados adquiridos por meio de técnicas de sensoriamento remoto proporcione um acréscimo no entendimento dos fenômenos da superfície terrestre, o uso inadequado destes dados, sem o conhecimento de possíveis erros e limitações que possam estar associados, induz a ocorrência de incertezas, gerando resultados pouco representativos. No contexto das aplicações de técnicas de sensoriamento remoto em estudos florestais percebe-se que grande parte dos estudos, ignora o fato de que o sinal observado pode ser substancialmente influenciado por erros de ordem radiométrica, como o efeito topográfico (Koukal et al., 2014; Chance et al., 2016). O conhecimento dessas limitações implica na escolha de metodologias e procedimentos que necessitam ser adotados para que se possa obter resultados representativos das

características espectrais reais do alvo avaliado (Gillingham et al., 2012).

Este efeito é produzido a partir da redistribuição da irradiância incidente pelas variações altimétricas do relevo, fazendo com que os alvos sejam expostos a diferentes condições de iluminação (Schulmann et al., 2015; Li et al., 2016), influenciando os níveis radiométricos detectados pelos sistemas sensores remotos (Chance et al., 2016). Este efeito mostra-se prejudicial para o monitoramento de povoamentos florestais à medida em que produz variações consideráveis na resposta espectral de alvos idênticos, quando expostos a diferentes geometrias de iluminação, o que para aplicações florestais pode resultar em falsas estimativas do vigor vegetativo (Hantson e Chuvieco, 2011). Nesse momento é importante destacar que as terras destinadas para povoamentos florestais geralmente são acidentadas, ressaltando os efeitos topográficos sobre a radiação detectada pelos sensores remotos.

Além da influência do relevo, as variações sazonais da geometria de iluminação provocadas principalmente pela oscilação do ângulo de elevação solar (AES), resultado da variação da declinação solar anual, constituem-se em um dos fatores de maior influência na produção do efeito topográfico. Estas variações fazem com que a superfície seja imageada sob diferentes condições de iluminação, sendo as imagens obtidas em áreas de média latitude, como a região Sul do Brasil, são significativamente afetadas pelo efeito topográfico (Luciano e Valeriano, 2016).

Embora a influência produzida pelo efeito topográfico em dados de sensoriamento remoto seja bastando discutida na literatura, estudos que avaliem a sua influência na resposta espectral de dosséis de *Pinus*, considerando as variações sazonais da geometria solar, ainda são escassos, especialmente no Brasil. Os comprimentos de onda mais influenciados pelo efeito topográfico estão localizados nas regiões do verde, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas, onde as acículas adaptadas à condição de sombreamento apresentam maior transmitância em relação as expostas diretamente a radiação eletromagnética (Hovi et al., 2017). Desta forma, considerando o fato de que 87% do total dos cultivos de espécies do gênero *Pinus* encontram-se localizados na região Sul do Brasil (IBÁ, 2020), a análise da influência deste erro radiométrico faz-se de fundamental importância para aplicações de técnicas de sensoriamento remoto no monitoramento destes

cultivos, permitindo a adoção de estratégias e procedimentos que permitam a atenuação deste efeito.

É importante destacar que a resposta espectral dos dosséis de *Pinus* apresenta determinadas particularidades, como menor reflectância nos comprimentos de onda da região do visível e um maior espalhamento nas regiões dos infravermelhos próximo e de ondas curtas, em comparação com dosséis de espécies com folhas laminares (Roberts et al., 2004). Estas características somadas à forte influência do efeito topográfico sobre a resposta do dossel, podem conduzir a aquisição de falsas estimativas do vigor vegetativo, mesmo com a aplicação de índices espectrais de vegetação. Neste sentido, procedimentos de normalização ou correção topográfica, com o objetivo compensar a perda de radiância nos pixels de áreas em condição de sombreamento (Li et al., 2016), devem ser considerados em aplicações sobre este tipo de alvo florestal.

Neste sentido, o presente estudo tem como objetivo analisar a sensibilidade das medidas de reflectância e índices de vegetação obtidos a partir de imagens dos sistemas sensores multiespectrais *MultiSpectral Instrument* (MSI)/Sentinel-2 às variações sazonais da geometria de iluminação. Buscando identificar como a sua dinâmica interfere nas estimativas do vigor vegetativo de povoamentos

florestais da espécie *Pinus taeda*, utilizadas no monitoramento de seus ciclos produtivos.

Metodologia

Caracterização da área de estudo

A análise da influência provocada pelas variações sazonais da geometria de iluminação foi realizada em uma área de manejo silvicultural gerenciada pela empresa Adami S/A Madeiras, na qual são desenvolvidos projetos de plantio da espécie *Pinus taeda* Linnaeus. A área de estudo está localizada na região Centro-Oeste do Estado de Santa Catarina, entre os municípios de Passos Maia e Ponte Serrada, como ilustrado no mapa de localização da Figura 1. Em razão da área de estudo apresentar alta rotatividade de ciclos de cultivo, apresentando projetos de plantio com as mais variadas idades, optou-se por considerar como área de estudo apenas os povoamentos florestais com idades entre dezoito e quatro anos, correspondentes aos plantios realizados entre os anos de 2000 e 2014. Esta escolha considerou a realização de análises em talhões com dossel fechado, evitando-se a ocorrência de mistura espectral oriunda da resposta do substrato e a saturação dos índices de vegetação (Käfer et al., 2018).

Figura 1. Mapa de localização da área dos povoamentos florestais de *Pinus taeda*, analisados no estudo

Os povoamentos florestais analisados neste estudo estão distribuídos sobre relevo modelado por dissecação diferencial com forte controle estrutural, estando inserida na Unidade Geomorfológica denominada Planalto dos Campos Gerais (Perrando et al., 2020). As características de relevo dissecado associadas a baixa fertilidade do solo e a forte suscetibilidade à erosão tornam estes solos de baixa utilidade para a agricultura extensiva, embora apresente condições para uso de pastagem, fruticultura e principalmente reflorestamento (EMBRAPA, 2004).

No aspecto climático, a área de estudo apresenta, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger para o território brasileiro (Alvares et al., 2013), clima do tipo Cfb – subtropical úmido com verão ameno, apresentando estações de verão e inverno bem definidas, com precipitação pluviométrica bem distribuída ao longo do ano, não havendo estação seca definida, como mostrado nas medidas acumuladas para o período entre 2002 e 2018. A média anual de precipitação pluviométrica acumulada, oscila entre 1.100 e 2.000 mm, com a temperatura do mês mais quente inferior a 22°C, sendo no mês mais frio verificada a ocorrência de geadas.

Aquisição e processamento de imagens

Para a análise da influência do efeito topográfico nas medidas de reflectância de superfície e índices de vegetação dos povoamentos florestais de *Pinus taeda*, foram adquiridas três imagens dos sistemas sensores *MultiSpectral Instrument* (MSI), a bordo dos satélites da Constelação Sentinel-2 (Drusch et al., 2012). A escolha das datas das imagens considerou como critérios a ausência de nebulosidade sobre a área de estudo, a qualidade radiométrica dos dados e a geometria de iluminação, de forma com que fossem selecionadas imagens representativas das variações das condições de iluminação local ao longo do ano.

Desta forma, foram escolhidas as imagens correspondentes as datas de 22 de junho, 05 de setembro e 04 de dezembro de 2018, obtidas em condições de baixa, média e alta elevação solar, respectivamente, sendo as medidas angulares da geometria de iluminação em cada imagem, definidas pelos ângulos zenital (AZS) e azimutal (AAS) solares, apresentadas na Tabela 1. A aquisição das imagens foi realizada por meio do repositório de dados espaciais Copernicus Open Access Hub disponibilizado pela *European Space Agency* (ESA), disponível no endereço eletrônico: <<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>>.

Tabela 1. Geometrias de iluminação das imagens selecionadas para a análise da influência do efeito topográfico na resposta espectral dos dosséis de *Pinus taeda*.

Sistema sensor	Data	AZS	AAS
MSI	22/06/2018	56,5330	29,9596
	05/09/2018	41,9655	40,9825
	04/12/2018	22,3139	83,7507

Após a aquisição, as imagens foram submetidas a duas rotinas de processamento, de forma a serem obtidas duas séries multitemporais de imagens, sendo uma sem e outra com aplicação de processamento de correção topográfica. Desta forma, os conjuntos de imagens adquiridos foram primeiramente submetidos a correção dos efeitos atmosféricos, por meio da aplicação do algoritmo *Atmospheric Correction for Flat Terrain* (ATCOR-2) (Richter e Schläpfer, 2019). Sendo aos conjuntos de imagens brutas aplicado uma nova rotina de processamento, na qual foram aplicadas, de forma conjunta, as correções atmosférica e topográfica, sendo para isto utilizado a versão 3 do algoritmo *ATCOR (Atmospheric and Topographic Correction for Satellite Imagery)* (Richter e Schläpfer, 2019).

Para a aplicação dos algoritmos fez-se necessário o cálculo prévio da visibilidade horizontal média das áreas abrangidas pelas imagens, realizado com uso de medidas de medidas de profundidade óptica de aerossol no comprimento de onda de 550 nanômetros e coeficiente de Angström. Estes parâmetros atmosféricos foram obtidos de forma indireta por meio do produto *MOD04.006 MODIS/Terra Aerosol 5-Min L2 Swath 10km* (Levy et al., 2013), sendo adquirido para as datas das imagens MSI/Sentinel-2A/B, a partir do repositório de dados atmosféricos *Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System* (LAADS) Distributed Active Archive Center (DAAC) da NASA, disponível no endereço eletrônico: <<http://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>>.

Cálculo dos índices espectrais de vegetação

A partir da aplicação dos processamentos para correção atmosférica e topográfica foram obtidos dois conjuntos de imagens: com e sem a influência do efeito topográfico, procedeu-se o cálculo dos índices de vegetação (IV). Desta forma, foram calculados os índices *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Rouse et al., 1973), *Enhanced Vegetation Index* (EVI) (Huete et al., 2002), *Normalized Difference Red-Edge index*

(NDRE) (Gitelson e Merzlyak, 1994) e o *Wide Dynamic Range Vegetation Index* (WDRVI) (Gitelson, 2004), sendo estes realizados com por meio das equações apresentadas na Tabela 2, com uso das bandas das regiões do vermelho (B04, 650 – 280 nm), borda do vermelho (B05, 698 – 713 nm) e infravermelho próximo (B08, 785 – 900 nm) dos sistemas sensores MSI. Para o cálculo do WDRVI fez-se necessária a definição dos valores do

coeficiente de ajustamento para a banda do infravermelho próximo (α) para cada uma das imagens, sendo obtidos por meio da Equação 2.1. A escolha destes IVs considerou como critérios a extensa utilização do NDVI e EVI em estudos florestais, como também a maior capacidade de aplicação dos índices NDRE e WDRVI em dosséis com elevada biomassa.

Tabela 2. Índices de vegetação calculados a partir das imagens MSI/Sentinel-2.

Índice	Equação		Referência
NDVI	$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{red})$	(1)	Rouse et al. (1973)
WDRVI	$WDRVI = ((\alpha * \rho_{NIR}) - \rho_{red}) / ((\alpha * \rho_{NIR}) + \rho_{red})$	(2)	Gitelson (2004)
	$\alpha = 2 * (\bar{X}\rho_{red} / \rho_{NIR_{max}})$	(2.1)	Henebry et al. (2004)
EVI	$EVI = G * ((\rho_{NIR} - \rho_{red}) / (\rho_{NIR} + C_1 * \rho_{red} - C_2 * \rho_{blue} + L))$	(3)	Huete et al. (2002)
NDRE	$NDRE = (\rho_{NIR} - \rho_{red-edge}) / (\rho_{NIR} + \rho_{red-edge})$	(4)	Gitelson; Merzlyak (1994)

Modelagem topográfica da área de estudo

Para a análise da influência do efeito topográfico na resposta das medidas espectrais dos povoamentos florestais de *Pinus taeda*, fez-se necessária a obtenção das geometrias de orientação e declividade do terreno das áreas dos talhões de cultivo. Para isto, um modelo digital de terreno (MDT), com resolução espacial de um metro, foi adquirido por meio do repositório de dados geográficos da Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Estado de Santa Catarina, disponível no endereço eletrônico: <<http://sigsc.sds.sc.gov.br/>>.

A obtenção das variáveis topográficas foi realizada a partir do processamento do MDT, realizado com a ferramenta *Topographic Modeling*, disponível no *software* de processamento de imagens de sensoriamento remoto *ENvironment for Visualizing Images version 5.3* (ENVI 5.3) (Harris Geospatial Solutions, 2018). Os produtos gerados foram classificados de acordo com os intervalos

apresentados no Quadro 1, sendo na sequência as áreas abrangidas por cada classe convertidas em regiões de interesse, as quais foram transformadas em arquivos vetoriais contendo o limite de cada classe.

Visando a obtenção de pixels com valores representativos da resposta espectral dos dosséis de *Pinus taeda*, livres de contaminação provocada por mistura espectral presente nas bordas dos talhões de cultivos, realizou-se a extração da área útil de cada talhão de cultivo, considerando a resolução espacial nominal de dez metros dos produtos MSI. Desta forma, com uso de um arquivo em formato vetorial, contendo os limites de cada talhão de cultivo, agrupados de acordo com o projeto de plantio dos povoamentos florestais, disponibilizado pela Empresa Adami S/A, foram delimitados *buffers* com distâncias de trinta metros em direção ao interior de cada talhão de cultivo. Os arquivos contendo os limites úteis de área para cada conjunto de imagens foram utilizados para delimitar todos os demais processamentos de amostragem das medidas de reflectância e índices de vegetação.

Quadro 1. Intervalos de classes utilizados na classificação das variáveis topográficas de orientação e declividade do terreno.

Variáveis topográficas			
Orientação do terreno		Declividade do terreno	
Classes	Intervalo	Classes	Intervalo
Norte	337,5° - 22,5°	Terreno plano	0° - 2°
Nordeste	22,5° - 67,5°	Declividade fraca	2° - 5°
Leste	67,5° - 112,5°	Declividade média	5° - 15°
Sudeste	112,5° - 157,5°	Declividade forte	15° - 25°
Sul	157,5° - 202,5°	Declividade acentuada	25° - 35°
Sudoeste	202,5° - 247,5°	Terreno escarpado	> 35°
Oeste	247,5° - 292,5°		
Noroeste	292,5° - 337,5°		

Caracterização das condições de iluminação da área de manejo florestal

A identificação das condições de iluminação sobre os talhões de cultivo em cada uma das imagens MSI/Sentinel-2 foi realizada por meio do cálculo do fator cosseno do ângulo de incidência (Cos i). Sendo representadas a relação entre as geometrias de iluminação de cada uma das imagens da série multitemporal, com as características topográficas do

terreno onde se situam os talhões de cultivo. O cálculo do Cos i foi realizado com uso da Equação 5 (Colby, 1991), sendo utilizados os dados de orientação e declividade da área dos povoamentos florestais, obtidos na etapa anterior e a geometria de iluminação, caracterizadas pelos ângulos azimutal e zenital solar para cada data das imagens, obtidos a partir dos seus metadados das imagens MSI/Sentinel-2A/B, apresentados anteriormente, na Tabela 1.

$$\cos i = \cos(\theta_s) * \cos(\theta_n) + \sin(\theta_s) * \sin(\theta_n) * \cos(\phi_a - \phi_o) \quad (5)$$

Onde: γ_i corresponde ao ângulo de incidência local sobre cada pixel, θ_s é o ângulo zenital solar; θ_n é o ângulo zenital da normal da superfície terrestre (mapa de declividade); ϕ_a é o ângulo azimutal solar; e ϕ_o o ângulo azimutal normal da superfície terrestre (mapa de orientação de vertentes).

A partir do cálculo do Cos i foram obtidos dados contínuos em formato matricial, nos quais os níveis de cinza correspondem à intensidade das condições de iluminação ou sombreamento para a área de cada pixels das imagens MSI/Sentinel-2A/B. Sendo expressos em uma escala entre zero e um, na qual os valores mais próximos de zero representam porções do terreno dispostas sob condição de baixa incidência de irradiância, ou iluminação difusa, enquanto os valores próximos a um, estão associados à condição de incidência direta de radiação solar sobre o terreno.

Análise da influência do efeito topográfico nos dados de sensoriamento remoto

A sensibilidade dos produtos de sensoriamento remoto aos efeitos topográficos foi primeiramente analisada a partir da relação entre as medidas de reflectância bidirecional de superfície e índices espectrais de vegetação e a modelagem topográfica da área dos talhões de cultivo. Para esta análise foram consideradas 48 geometrias de exposição da superfície, definidas a partir da relação entre as classes de orientação (oito classes) e declividade (seis classes) do terreno, sendo consideradas as três geometrias de iluminação das datas amostrais.

A análise foi realizada a partir do delineamento das geometrias de exposição do terreno, a partir da análise conjunta das variáveis topográficas obtidas na modelagem topográfica, permitindo avaliar a influência do efeito topográfico no aspecto direcional e da intensidade das condições de iluminação. A partir da união das classes de orientação e declividade do terreno foi

elaborado um arquivo em formato vetorial, sendo a partir deste realizada a amostragem dos valores médios de reflectância do dossel nas bandas do vermelho, borda do vermelho, infravermelho próximo e índices de vegetação, abrangidos pela extensão de cada geometria de exposição do terreno. Estes valores foram normalizados em função das medidas de reflectância das porções do dossel florestal diretamente expostas diretamente a irradiância solar (orientadas na mesma direção do ângulo azimutal solar de cada imagem), sendo estas consideradas como a sua resposta espectral padrão. Os valores normalizados foram utilizados na elaboração de gráficos polares, utilizados para a avaliação da sensibilidade direcional das medidas de reflectância de superfície e índices de vegetação às condições de iluminação do terreno.

A sensibilidade dos dados espectrais ao efeito topográfico também foi investigada por meio do cálculo do coeficiente de correlação de postos de Spearman entre as medidas espectrais e os valores do Cos i. O nível de influência do efeito topográfico nas medidas de reflectância bidirecional de superfície e índices espectrais de vegetação derivados destas medidas foi verificado por meio de análise de regressão linear. Sendo desenvolvida a partir da dispersão entre as medidas espectrais e o respectivo fator cosseno do ângulo de incidência para cada uma das três datas avaliadas de cada conjunto de imagens. Estas análises foram realizadas de forma conjunta entre os conjuntos de dados sem e com aplicação de normalização topográfica, de forma a permitir avaliações tanto do desempenho do algoritmo ATCOR-3, quanto para avaliar a sensibilidade dos dados dos sistemas sensores MSI a esse efeito.

Resultados

Modelagem topográfica e caracterização das condições de iluminação do dossel florestal

A modelagem topográfica da área dos povoamentos florestais de *Pinus taeda* resultou na obtenção das variáveis topográficas de orientação de vertentes e declividade do terreno, as quais permitiram identificar a relação da geometria do terreno na propagação do efeito topográfico. Sendo identificadas as porções da área mais afetadas pelas mudanças nas condições de iluminação ao longo das variações sazonais da geometria solar. Destaca-se que as análises consideram a área útil de cada talhão de cultivo para a resolução espacial dos produtos MSI.

A análise dos dados de orientação de vertentes, apresentados de forma espacializada na Figura 2a, mostrou que os povoamentos florestais analisados apresentam-se distribuídos sobre todas as direções de orientação, não havendo um predomínio direcional no arranjo das vertentes, o que faz com que sob uma mesma geometria de iluminação solar, o dossel florestal possa apresentar diferentes condições de exposição à irradiância, distribuídas pelo relevo, conduzindo a variações significativas na sua resposta espectral.

No entanto, considerando a área ocupada pelas classes de orientação de vertentes, os povoamentos florestais apresentam uma menor área disposta nas direções sudeste e sul, o que corresponde a 7,77% (2,85 km²) e 8,39% (3,08 km²), respectivamente, da área útil dos talhões. Enquanto que as porções orientadas nas direções norte e nordeste, concentram as maiores extensões entre as classes, correspondendo a 16,84% (6,18 km²) e 15,52% (5,70 km²), respectivamente. As demais classes, correspondem em média a 12,87% da área de estudo, apresentando pequenas variações, inferiores à 1,62 km².

Em relação à declividade do terreno (Figura 2b), mostrou que a área de estudo apresenta declividades de variam de 0° a 26,9324°, estando distribuída, em sua maior parte, sobre relevo ondulado, com declividades médias variando entre 5° e 15°, o que corresponde a 58,93% (21,63 km²) da extensão da área de estudo. Enquanto que as encostas com declividades entre 2° e 5°, correspondem a 27,71% (10,17 km²) de seu total. Por outro lado, as áreas com terreno plano, com declividades inferiores a 2°, representam apenas 6,65% (2,44 km²) da extensão da área de estudo.

As espacializações da declividade e orientação do terreno da área dos povoamentos florestais de *Pinus taeda* permitiram identificar as geometrias de exposição do terreno a iluminação, definidas a partir da associação das medidas angulares destas variáveis topográficas. Desta forma, observando-se a localização e extensão das

classes, foi possível identificar que as porções da área de estudo dispostas nas direções norte, nordeste, sudoeste, oeste e noroeste, compreendem todas as classes de declividade, enquanto, que as áreas orientadas nas direções leste, sudeste e sul, apresentam declividades entre 0° e 25°.

A análise das condições de iluminação ocorridas nas três imagens MSI/Sentinel-2, realizada a partir da espacialização das medidas do Cos i (Figura 3) mostrou que ao longo do período representado pela série de imagens, os dosséis foram imageados com diferentes intensidades de exposição à irradiância solar, tanto na dimensão espacial, quanto temporal. As variações sazonais da elevação solar foram o fator que contribuiu em maior parte para a ocorrência de grandes mudanças no padrão de distribuição da radiação solar sobre a extensão dos dosséis florestais, sendo ao longo das datas amostrais identificada uma redução de 33,2797° no AZS.

Os valores do Cos i obtidos em função da geometria de iluminação correspondente a imagem MSI/Sentinel-2 de 22 de junho de 2018, na qual a geometria de iluminação apresentou-se caracterizada por baixa elevação solar, com AZS de 57,5691°, e orientação do fluxo radiante na direção nordeste, determinada pelo AAS de 32,0353°, apresentam uma grande amplitude de variação, sendo encontradas tanto nas porções do dossel expostas diretamente a radiação solar, quanto em condição de sombreamento. Nesta data, em razão da baixa elevação solar, foi verificado um maior controle das condições de iluminação pelo terreno, resultando em uma distribuição heterogênea da radiação eletromagnética.

Com o aumento da elevação solar, condicionado pelo decréscimo da declinação solar no hemisfério sul entre os meses de agosto e outubro, ocorre a redução gradual da influência do relevo na distribuição da incidência de radiação sobre os dosséis florestais, sendo verificada uma redução substancial na amplitude das medidas do Cos i, marcada pela elevação dos valores mais baixos, o que caracteriza a redução nas condições de sombreamento. Desta forma, a espacialização dos valores do Cos i, para a data de 05 de setembro de 2018, caracterizada pela média elevação solar, definida pelo AZS de 43,4615°, com AAS de 43,4161°, mostrou que na condição de iluminação intermediária, ocorre uma redução significativa das condições de sombreamento do dossel florestal, sendo verificada uma menor amplitude dos valores, definida a partir do aumento dos valores mais baixos do Cos i, como mostrado na Figura 2b.

As medidas do Cos i obtidas para a data de 04 de dezembro de 2018, na qual a geometria de

iluminação apresentou a maior elevação solar entre as datas amostrais, definida pelo AZS de 24,2894° e AAS de 84,8929°, mostraram uma maior homogeneidade na distribuição da radiação solar sobre os dosséis florestais, sobre os quais não foram verificadas condições de sombreamento projetado por influência do relevo, o que foi mostrado pelos valores mínimos do Cos i superiores a 0,5, sendo também responsáveis pela menor amplitude dos valores apresentada entre as

três datas amostrais. Embora, seja verificada uma maior homogeneidade na distribuição da iluminação sobre a área de estudo, a análise da espacialização dos valores do Cos i , apresentada na Figura 3c, mostrou que mesmo com a maior elevação solar, a orientação de vertentes ainda exerce, embora de maneira branda, influência sobre a distribuição da iluminação.

Figura 2. Mapas de (a) orientação e (b) declividade da área dos povoamentos florestais de *Pinus taeda*

Figura 3. Condições de iluminação presentes nas imagens MSI/Sentinel-2 de (a) 22 de junho, (b) 05 de setembro e (c) 04 de dezembro de 2018, definidas a partir dos valores do fator cosseno do ângulo de incidência.

O asterisco no gráfico identifica a posição do Sol no dia do imageamento.

Em relação à influência do relevo, as condições de maior incidência direta de irradiação solar ocorrem nas vertentes com orientação coincidente com o ângulo azimutal solar, sendo a

sua intensidade graduada pela declividade do terreno. As vertentes com orientação adjacente ao AAS, também apresentam incidência de radiação solar, embora esta não ocorra de forma direta em relação à normal da superfície. As vertentes cuja orientação não seja adjacente ao AAS, ou dispostas em orientação oposta ao ângulo de incidência da iluminação, apresentam uma menor exposição à radiação solar, sendo grande parte da radiação disponível nestas áreas proveniente de encostas adjacentes, ou no caso de oclusão pelo relevo, sob condição de sombreamento.

Embora as espacializações dos valores do $\cos i$ mostrem que a orientação de vertentes se apresenta como o principal parâmetro topográfico condicionante da distribuição da irradiação solar sobre a área de estudo, a amostragem dos valores médios do $\cos i$ a partir dos planos de exposição do terreno, mostrou que a influência da declividade nas condições de iluminação dos dosséis florestais é significativa, como mostram os gráficos da Figura 4. As variações na intensidade da iluminação e sombreamento mostraram-se proporcionalmente mais acentuadas de acordo com o aumento do gradiente clinográfico. Desta forma, a partir da análise das curvas dos gráficos, verificou-se que as porções planas da área de estudo (com declividade inferior a 2°) sofrem uma menor influência direcional em comparação com as demais porções da área de manejo, sendo encontradas amplitudes de 0,0358, 0,0299 e 0,0179, nas condições de baixa, média e alta elevação solar, respectivamente. O que pode ser explicado devido à variação do ângulo de incidência da radiação solar em relação à normal da superfície ser muito pequena em relação às direções de orientação.

Ao contrário das áreas planas, as porções da área de estudo com maior gradiente clinográfico foram as que apresentaram a maior oscilação das medidas do $\cos i$, em relação a orientação de vertentes, o que remete a uma grande variação nas condições de incidência de radiação solar sobre o dossel florestal. Considerando as variações sazonais avaliadas da geometria solar, foram encontradas as amplitudes de variação de 0,7174, 0,6120 e 0,3522, nas condições de baixa, média e alta elevação solar, respectivamente, para as porções da área de manejo com declividades entre 25° e 35° .

Figura 4. Variação das medidas do fator cosseno do ângulo de incidência delimitadas em função das classes de exposição do terreno, para as datas das imagens MSI/Sentinel-2A/B de (a) 22 de junho, (b) 05 de setembro, (c) 04 de dezembro de 2018.

Por outro lado, a partir da análise dos valores médios do $\cos i$ e do comportamento das curvas dos gráficos, apresentados na Figura 4, foi verificado no decorrer das datas amostrais, a ocorrência de um acréscimo nos valores do $\cos i$, sendo este mais acentuado nas áreas com maior declividade e orientação do terreno na direção do azimute solar (em frente ao Sol – plano principal de espalhamento). A elevação das medidas do $\cos i$ está diretamente associada à redução do ângulo zenital solar, caracterizando uma maior elevação aparente do Sol, o que implica diretamente no aumento da distribuição da iluminação, resultando na redução do sombreamento projetado sobre o dossel florestal e menor influência do relevo.

Os resultados obtidos a partir da modelagem dos padrões de distribuição da radiação solar sobre a área de estudo, corroboram com os resultados obtidos por Luciano; Valeriano (2016). Os autores ao investigar a distribuição da radiação solar sobre diferentes latitudes, verificaram que as áreas situadas em média latitude, como a área dos povoamentos florestais de *Pinus taeda*, apresentam um maior controle do padrão de distribuição da radiação solar pelo relevo, mesmo durante os períodos de maior elevação solar, o que de acordo com os autores pode ser explicado em função da declinação solar não atingir a latitude local, fazendo com que em condições de maior elevação solar, ainda seja verificado o controle da iluminação pela orientação de vertentes.

Influência do efeito topográfico na resposta espectral dos povoamentos florestais de *Pinus taeda*

As medidas de reflectância do dossel florestal nas bandas do vermelho, borda do

vermelho e infravermelho próximo, mostraram-se diretamente influenciadas pelo aspecto direcional das variações nas condições de iluminação. Desta forma, a partir dos arranjos das curvas dos gráficos da Figura 5, foi possível identificar a ocorrência de variações nos valores médios de reflectância de acordo com a incidência de irradiação solar apresentada em cada orientação do terreno.

Nas porções da área de estudo cuja orientação de vertentes proporcionou uma maior exposição a irradiação solar, os valores de reflectância do dossel apresentaram-se elevados, não sendo encontradas oscilações. Esta condição foi encontrada a partir de porções homogêneas do dossel florestal, orientadas nas direções em que ocorre a incidência direta de irradiação solar, sendo norte e nordeste, nas datas de 22 de junho e 05 de setembro, e leste, na data de 04 de dezembro de 2018. As porções do dossel florestal dispostas nas porções do terreno com orientação adjacente ao AAS também apresentam baixa variação nas medidas de reflectância. Esta condição foi observada nas três datas amostras, mantendo-se no decorrer de todas as principais variações locais da geometria solar.

No que se refere a influência da declividade do terreno no agravamento do efeito topográfico, esta ocorre de maneira proporcional ao aumento do gradiente clinográfico, sendo nas porções do dossel dispostas sobre encostas com declividade acima de 25°, encontradas tanto as menores, quanto as maiores medidas de reflectância, de acordo com a orientação do terreno (acentuando os efeitos direcionais nas direções do espalhamento frontal quanto retroespalhamento, respectivamente).

Figura 5. Variações dos valores médios de reflectância normalizada das bandas do (a) vermelho, (b) borda do vermelho e (c) infravermelho próximo do sistema sensor MSI, em função da geometria de exposição do relevo.

Por outro lado, as medidas de reflectância obtidas sobre as áreas planas da área de estudo mostraram-se menos influenciadas pelo aspecto direcional do efeito topográfico, sendo a maior amplitude de variação de 1,67%, encontrada na banda do infravermelho próximo, entre as porções iluminadas e sombreadas do dossel florestal, na data de 22 de junho de 2018. Também ao longo das datas amostras, observou-se que estas medidas de reflectância foram as menos impactadas pelo decréscimo do AZS, não sendo encontradas mudanças em seu comportamento.

A análise dos coeficientes de correlação para postos de Spearman, apresentados na Tabela 3, mostrou que no aspecto temporal, no decorrer

das datas amostrais, com o aumento do AES e proporcional maior distribuição da irradiação solar sobre o dossel florestal, ocorre a diminuição da influência do efeito topográfico, verificada a partir do decréscimo dos valores dos coeficientes.

Considerando os valores dos coeficientes de correlação obtidos, as medidas de reflectância do dossel nos comprimentos de onda da banda B05 foram as que apresentaram oscilações mais associadas a variação das condições de iluminação. Sendo desta forma, mais sensíveis aos efeitos topográficos sobre condições de baixa elevação solar e maior sombreamento, como verificado nas duas primeiras datas amostrais.

Tabela 1. Coeficientes de correlação para postos de Spearman obtidos a partir da relação entre as medidas do Cos i e as bandas do vermelho (B04), borda do vermelho (B05) e infravermelho próximo (B08) do sistema sensor MSI.

Datas amostrais		B04	B05	B08
22/06/2018	Cos i	0,6009*	0,7775*	0,5657*
	p-valor	0,0000	0,0000	0,0000
05/09/2018	Cos i	0,4059*	0,6207*	0,4385*
	p-valor	0,0000	0,0000	0,0000
04/12/2018	Cos i	0,1601*	0,3270*	0,3372*
	p-valor	0,0000	0,0000	0,0000

*Correlações estatisticamente significativas em nível 0,05.

Na data de 04 de dezembro, com menor influência do efeito topográfico, as medidas de reflectância do dossel nas bandas espectrais do infravermelho próximo e da borda do vermelho apresentaram-se mais influenciadas pelas variações das condições de iluminação, sendo identificadas correlações estatisticamente significativas positivas fracas. Sendo as medidas de reflectância da banda do vermelho as menos influenciadas pelo efeito topográfico nessa condição de iluminação.

Os resultados obtidos a partir da análise conjunta das variáveis topográficas analisadas em relação ao condicionamento da resposta espectral do dossel dos povoamentos florestais de *Pinus taeda*, corroboram com os resultados encontrados por Fan et al. (2018), nos quais os autores encontraram uma relação semelhante ao analisar a variação de medidas de radiância de um dossel florestal com as variáveis topográficas de orientação de vertentes e declividade, em função do efeito topográfico.

Influência do efeito topográfico nos índices espectrais de vegetação dos povoamentos florestais de *Pinus taeda*

Os valores do NDVI, amostrados em função da geometria de exposição do terreno, apresentaram baixa oscilação em suas medidas associadas às diferentes condições de iluminação, as quais o dossel florestal encontra-se exposto em cada data amostral, como mostrado na Figura 6a. Em comparação aos demais índices avaliados, o NDVI foi o que apresentou a menor variação em suas medidas relacionadas ao efeito topográfico, não sendo verificadas amplitudes de variação significativas que permitam identificar de forma direta oscilações de valores associadas à variação das condições de iluminação sobre os dosséis florestais. As oscilações nos valores, embora pequenas, foram encontradas apenas nas datas de 22 de junho e 05 de setembro de 2018, correspondentes as

condições de baixa e média elevação solar, não sendo encontrado um padrão de variação nos valores que possa ser relacionado de forma direta com a influência do efeito topográfico na data de 04 de dezembro de 2018, uma vez que as variações nos valores, embora existam, não seguem o mesmo padrão de variação de valores verificado nas medidas do Cos i.

A análise entre as condições de iluminação do dossel em cada uma das datas amostrais, representadas pelos os valores do Cos i, e as medidas de NDVI mostrou a ocorrência de uma relação de variação inversa, na qual os maiores valores médios deste índice foram encontrados nas porções dos dosséis florestais dispostas em vertentes com orientação nas direções de menor incidência direta de iluminação. Este comportamento pode ser identificado a partir da análise de correlação entre as medidas do NDVI e do Cos i, na qual foram encontradas correlações estatisticamente significativas negativas muito fracas em condições de iluminação definidas por baixa e média elevação solar, representadas nas duas primeiras datas amostrais, como mostrado na Tabela 4. Enquanto que em condição de elevado AES e restrita influência do efeito topográfico, não foram encontradas correlações estatisticamente significativas, o que mostra que nesta condição, as medidas do NDVI não foram influenciadas de maneira direta pela baixa oscilação na incidência de irradiação solar sobre o dossel.

O índice WDRVI foi proposto como uma variação do NDVI, destinado a aplicações sob dosséis com elevada biomassa, a partir da inclusão de um coeficiente de ajustamento para as medidas de reflectância da banda do infravermelho próximo, o que permite a ampliação do intervalo de valores para condições de elevada biomassa para valores negativos em sua escala.

Figura 6. Valores amostrados e normalizados em função do azimuth solar das datas amostrais dos índices de vegetação (a) NDVI, (b) WDRVI, (c) EVI e (d) NDRE, em função da geometria de exposição do terreno, para as diferentes datas analisadas.

Tabela 2. Coeficientes de correlação para postos de Spearman obtidos a partir da relação entre as medidas do Cos i e os índices espectrais de vegetação NDVI, EVI, NDRE e WDRVI, calculados a partir das imagens MSI/Sentinel-2. Fonte elaborado pelos autores (2020).

Datas amostrais		NDVI	WDRVI	EVI	NDRE
22/06/2018	Cos i	-0,1982*	-0,1982*	0,3863*	-0,1271*
	p -valor	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
05/09/2018	Cos i	-0,1611*	-0,1611*	0,2163*	-0,0987*
	p -value	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001
04/12/2018	Cos i	0,0281	0,0280	0,1917*	0,0590*
	p -value	0,2777	0,2781	0,0000	0,0223

*Correlações estatisticamente significativas em nível 0,05.

A análise gráfica dos valores amostrados do WDRVI, apresentada na Figura 6b, mostrou ao longo das datas amostrais a ocorrência de uma grande amplitude de variação nas medidas em relação as obtidas nas direções adjacentes ao AAS. Sendo esta proporcional ao aumento da declividade do terreno.

Os valores mais elevados do WDRVI foram encontrados nas porções do dossel florestal orientadas nas direções leste, sudeste, sul e sudoeste, e declividade superior a 25°, o que mostra um comportamento de superestimação em suas medidas em áreas com baixa incidência de irradiação solar, sendo o aumento dos valores proporcional ao aumento das condições de sombreamento. Este comportamento foi encontrado durante as ocorrências de geometria de iluminação de baixa e média elevação solar. Entretanto, sob condições de maior incidência de radiação solar decorrentes do aumento da elevação solar como ocorrido na data amostral de 04 de dezembro de 2018, foram identificadas ocorrências de superestimação nas medidas do WDRVI apenas em algumas porções da área de estudo com declividade entre 15° e 25°. Enquanto que nas demais frações do dossel florestal os valores deste índice comportaram-se de forma proporcional a incidência de radiação solar.

Analisando a relação entre as medidas do WDRVI e as características de iluminação de cada pixel das imagens, representadas pelos valores do Cos i , verificou-se uma relação idêntica à encontrada nas medidas do NDVI, sendo encontrados os mesmos valores nos coeficientes de correlação em todas as datas amostrais, como apresentado na Tabela 4. Isto permite concluir que a aplicação do coeficiente de ajuste de ganho da banda do infravermelho próximo, não ocasiona um aumento na sensibilidade deste índice ao efeito topográfico, comportando-se da mesma forma como um índice baseado em razão de bandas.

Os valores dos índices NDVI e WDRVI, ao contrário das medidas de reflectância amostradas, apresentaram uma superestimação de valores associados as porções do dossel com menor incidência

direta de radiação solar. Este comportamento pode ser explicado pela redução da resposta espectral do dossel nos comprimentos de onda do vermelho provocada pelo sombreamento, e também pelas as propriedades ópticas das acículas que compõe a estrutura do dossel de espécies do gênero *Pinus*. De acordo com Smolander; Stenberg (2005) e Rautiainen; Stenberg (2005), as acículas quando dispostas sob condições de sombreamento apresentam elevados níveis de espalhamento múltiplo de fótons, o que influencia em um aumento na resposta espectral do dossel nos comprimentos de onda do infravermelho próximo. Estas características espectrais, quando associadas por meio dos índices espectrais de vegetação resultam em uma falsa resposta de elevado vigor vegetativo. Neste sentido, Rautiainen et al. (2018) observaram por meio de medidas radiométricas, que a porção de folhas em condição de sombreamento no dossel, em geral, apresenta maior transmitância do que as folhas expostas diretamente à irradiação, na região espectral entre 400 nm e 2.400 nm. Desta forma, o maior espalhamento provocado pelas acículas resulta em um acréscimo substancial nas medidas de reflectância nos comprimentos de onda do infravermelho próximo (Hovi et al., 2017), o que pode ser responsável pelo acréscimo nas medidas dos índices NDVI e WDRVI observado nas porções do dossel dispostas sob condições de incidência indireta de radiação solar ou sombreamento.

As características estruturais e espectrais dos dosséis de povoamentos florestais de *Pinus* fazem com que os resultados obtidos diferenciem-se dos obtidos por Adhikari et al. (2016) e Chen et al. (2020), os quais analisando florestas naturais concluíram que o índice NDVI poderia ser considerado como insensível ao efeito topográfico. Estes autores atribuíram a insensibilidade ao efeito topográfico ao fato de quanto aplicado sobre alvos florestais naturais, constituídos em sua maioria por espécies de estrutura foliar plana, a influência das variações de iluminação afeta de forma semelhante as medidas de reflectância das bandas do vermelho

e infravermelho próximo, de modo que a estrutura em razão de bandas normalizada atenua os seus efeitos. No entanto, esta condição não ocorre nos dosséis de *Pinus*.

A análise dos valores do EVI obtidos para os povoamentos florestais de *Pinus taeda*, mostrou que as medidas deste índice espectral apresentaram um comportamento semelhante ao verificado na análise das medidas de reflectância das bandas espectrais dos sistemas sensores MSI, definido pelo decréscimo dos valores nas áreas correspondentes às porções do dossel dispostas nas direções sul, sudoeste e oeste, nas datas de 22 de junho e 05 de setembro e sudoeste, oeste e noroeste, na data de 04 de dezembro, nas quais ocorrem as menores incidências diretas de radiação solar, como apresentado nos gráficos da Figura 6c.

Assim como verificado com as medidas de reflectância, ao longo das datas com a maior distribuição da incidência de irradiação solar e decréscimo da influência do efeito topográfico, as medidas do EVI apresentam uma redução em suas amplitudes de variação. Este comportamento pode ser identificado a partir da análise dos coeficientes de correlação obtidos, os quais indicam um decréscimo na relação entre as variações das medidas do EVI em função das condições de iluminação, variando de uma correlação fraca, na data de 22 de junho, para uma muito fraca, na data de 04 de dezembro, conforme mostrado na Tabela 4.

A análise dos valores do EVI mostrou que estes apresentam uma oscilação semelhante à encontrada nas medidas de reflectância do dossel florestal nos comprimentos de onda da banda do infravermelho próximo, sendo esta verificada em todas as condições de iluminação representadas nas datas amostrais. Esta relação, também verificada nos resultados obtidos por Moreira et al. (2016), ao avaliar a sensibilidade de índices espectrais de vegetação ao efeito topográfico, está diretamente relacionada ao fator de ajustamento à influência do solo (L), aplicado à estrutura do índice. De acordo com Matsushita et al. (2007) este fator é o principal responsável por fazer com que o EVI não se comporte da mesma forma como um índice estruturado a partir de razão de bandas, tornando-o muito mais sensível ao efeito topográfico do que o NDVI.

A análise da sensibilidade ao efeito topográfico mostrou que as medidas do NDRE do dossel florestal apresentaram um comportamento semelhante ao encontrado nas medidas do NDVI, como mostram os gráficos da Figura 6d. Não foram identificadas oscilações na amplitude de variação dos

valores que apontem diretamente a influência direcional das variações de iluminação sobre o dossel. No entanto, analisando-se os valores do NDRE foram identificadas ocorrências de superestimação nos valores médios amostrados nas porções do dossel florestal dispostas sob condições de sombreamento ou baixa incidência direta de irradiação solar. Este comportamento verificado nas datas amostrais de 22 de junho e 05 de setembro de 2018, pode ser identificado a partir da análise dos coeficientes de correlação, os quais mostram a ocorrência de relação inversa, embora muito fraca, nas condições de baixa e média elevação solar.

Durante os períodos de maior incidência de irradiação solar sobre a área de estudo, como ocorrido na data de 04 de dezembro, não foram identificados condicionamentos da resposta do NDRE devido às variações nas condições de iluminação, sendo encontrada uma relação quase nula entre seus valores e os do $\cos i$.

A menor superestimação encontrada nos valores no NDRE em relação aos demais índices estruturados a partir de razão de bandas, está associada à maior resposta do dossel florestal nos comprimentos de onda da borda do vermelho compensar a elevada sensibilidade desta banda à influência do efeito topográfico.

Análise da correção do efeito topográfico nas medidas de reflectância do dossel florestal

Embora os povoamentos florestais analisados apresentem um elevado grau de homogeneidade, sendo constituídos apenas por cultivares da espécie *Pinus taeda* em diferentes estágios de desenvolvimento, constituindo um dossel florestal com elevado volume de biomassa, as suas medidas de reflectância deveriam, em tese, apresentar-se de forma similar às medidas extraídas das porções de terreno plano da área de estudo, quando analisadas de acordo com o aspecto direcional do relevo. No entanto, as análises anteriores mostraram que, de forma geral, as medidas de reflectância das bandas dos sistemas sensores MSI são afetadas pelo condicionamento da incidência de irradiação solar sobre o dossel, determinado pelas geometrias de iluminação e do terreno, influenciando diretamente na perda da radiância detectada nas porções do dossel com declividades mais elevadas, o que produz como efeito visual a percepção da modelagem do relevo, como mostrado nas Figuras 7a, 7c e 7e.

Figura 7. Efeito das variações sazonais da geometria de iluminação na área de estudo (coluna da esquerda) apresentado nas bandas espectrais dos sistemas sensores MSI analisadas no estudo e seus respectivos aspectos após a aplicação da correção topográfica (coluna da direita), representadas em composição colorida falsa-cor (RGB854), para as datas amostrais de (a, b) 22 de junho, (c, d) 05 de setembro e (e, f) 04 de dezembro de 2018.

A aplicação da normalização topográfica nas medidas de reflectância do dossel nas bandas do vermelho, borda do vermelho e infravermelho próximo proporcionou uma atenuação significativa deste efeito, reduzindo a percepção visual do terreno, a partir da compensação da radiância nos pixels correspondentes as porções da superfície em condições de iluminação definidas por baixa incidência de radiação solar ou sombreadas, como

mostrado nas Figuras 7b, 7d e 7f. Em nível espectral, a aplicação desse processamento produziu uma redução significativa nas amplitudes de variação das medidas de reflectância em relação as diferentes condições de exposição do dossel florestal a incidência de radiação solar, delimitadas pelas direções de orientação do terreno dos talhões de plantio.

Embora a análise dos valores amostrados de acordo com as geometrias de exposição do relevo,

apresentada na Figura 8, ainda sejam percebidas variações nos valores, estas apresentam-se de forma mais branda, sendo em sua maior parte identificadas nas medidas amostradas em condições de baixa elevação solar. Porém, na sequência das datas amostrais, com a maior incidência de radiação solar, as medidas de reflectância passam a não apresentar

um padrão de variação que permita identificar de maneira direta a ocorrência de condicionamentos provocados pelo efeito topográfico, não sendo encontradas estratificações de valores associadas a orientação de vertentes nas porções do dossel florestal com declividades entre 0° e 15°.

Figura 8. Variações dos valores médios de reflectância normalizada, corrigida para o efeito topográfico das bandas do (a) vermelho, (b) borda do vermelho e (c) infravermelho próximo do sistema sensor MSI, em função da geometria de exposição do relevo, para as três datas analisadas.

Dentre as bandas espectrais analisadas no estudo, as medidas de reflectância dos comprimentos de onda do infravermelho próximo (B08), foram as que apresentaram maior atenuação do efeito topográfico após a aplicação do algoritmo ATCOR-3, o que resultou em coeficientes de correlação indicativos de relações muito fracas positivas com as condições de iluminação do dossel florestal, em todas as variações sazonais da geometria de iluminação analisadas, como mostrado na Tabela 5. Por outro lado, as medidas de reflectância do dossel nos comprimentos de onda das bandas do vermelho e da borda do vermelho, embora apresentem uma maior

amplitude de variação em relação ao aspecto direcional da distribuição da radiação solar sobre o dossel florestal em comparação com a banda B08, após a aplicação da correção topográfica apresentaram uma acentuada redução da sensibilidade as variações de exposição do dossel florestal, passando a apresentarem correlações fracas sob condições de iluminação definidas por baixa e média elevação solar. Enquanto que sob condições de maior incidência de radiação solar, a aplicação do algoritmo ATCOR-3 resultou em correlações estatisticamente não significativas.

Tabela 3. Coeficientes de correlação para postos de Spearman obtidos a partir da relação entre as medidas do $\cos i$ e de reflectância corrigidas para o efeito topográfico das bandas do vermelho (B04), borda do vermelho (B05) e infravermelho próximo (B08).

Datas amostrais		B04	B05	B08
22/06/2018	$\cos i$	0,3190*	0,3754*	0,1314*
	p -valor	0,0000	0,0000	0,0000
05/09/2018	$\cos i$	0,2324*	0,2335*	0,0349
	p -valor	0,0000	0,0000	0,1774
04/12/2018	$\cos i$	0,0122	-0,0127	0,0578*
	p -valor	0,6372	0,6237	0,0252

*Correlações estatisticamente significativas em nível 0,05.

Análise da correção do efeito topográfico na resposta dos índices de vegetação

Dentre os índices espectrais de vegetação avaliados neste estudo, o NDVI foi o que apresentou a menor sensibilidade ao efeito topográfico, apresentando apenas pequenas oscilações em seus valores entre as porções iluminadas e sombreadas do dossel florestal. Com a aplicação da correção do efeito topográfico verificou-se uma redução nas amplitudes de variação, com a amostragem de medidas nas porções mais declivosas das áreas de estudo apresentando valores próximos à encontrada nas porções do dossel com terreno plano e menor variação do ângulo de incidência da irradiação solar em relação a normal da superfície, como mostrado na Figura 9a.

No entanto, mesmo com a aplicação da correção topográfica, as medidas do NDVI apresentaram-se mais elevadas nas porções do dossel florestal com baixa incidência direta de radiação solar, mantendo o comportamento identificado anteriormente, o que pode ser verificado por meio dos coeficientes de correlação negativos encontrados nas datas de 22 de junho e 05 de setembro de 2018, como mostrado na Tabela 6. No entanto, a atenuação do efeito topográfico provocou uma sensível redução na superestimação de seus valores, fazendo com que as amplitudes de variação entre as direções de exposição do dossel fiquem abaixo de 0,1.

Analisando os valores do WDRVI calculado a partir de medidas de reflectância corrigida para o efeito topográfico, foi possível identificar uma redução na amplitude de oscilação de suas medidas. Embora estas não apresentem um padrão de variação que possa ser diretamente relacionado à influência das diferentes condições de iluminação incidentes sobre o dossel em uma

imagem, a análise dos valores amostrados em função da exposição do terreno, apresentado na Figura 9b, apontam a ocorrência de valores elevados nas porções do dossel com menor incidência direta de radiação solar. No entanto, ao analisarem-se os valores dos coeficientes de correlação verificou-se que estes, da mesma forma como analisado anteriormente, apresentam-se idênticos aos encontrados na análise do NDVI, o que mostra que apesar da elevada oscilação em suas medidas, estas não estão relacionadas a influência do efeito topográfico, uma vez que as curvas dos valores amostrados não permitem a associação com o padrão de iluminação apresentado pelos valores do $\cos i$.

Os valores do índice EVI foram os que apresentaram maior redução de amplitude de variação associada diretamente a influência do efeito topográfico, uma vez que este índice mostrou-se mais influenciado pela distribuição heterogênea da irradiação solar sobre os povoamentos florestais sob condições de iluminação condicionadas por baixa elevação solar. Analisando-se o comportamento de suas medidas, apresentado na Figura 9c, foram identificadas reduções mais acentuadas nas diferenças entre as frações iluminadas e sombreadas do dossel com declividades acima de 15° , sendo para nas porções com gradiente clinográfico entre 15° e 25° encontrada a maior atenuação do efeito topográfico, passando de 0,1545 para 0,0471 com a aplicação do algoritmo ATCOR-3. Isto demonstra que a atenuação do efeito topográfico nas medidas de reflectância, deve ser considerada antes do cálculo deste índice em aplicações em condições semelhantes as descritas, conforme também destacado por Martín-Ortega et al. (2020).

Figura 9. Valores amostrados e normalizados em função do azimuth solar das datas amostrais dos índices de vegetação (a) NDVI, (b) WDRVI, (c) EVI e (d) NDRE, calculados a partir das imagens corrigidas dos efeitos topográficos, em função da geometria de exposição do terreno.

Tabela 4. Coeficientes de correlação para postos de Spearman obtidos a partir da relação entre as medidas do $\cos i$ e os índices espectrais de vegetação NDVI, EVI, NDRE e WDRVI, calculados a partir das imagens MSI/Sentinel-2 corrigidas para o efeito topográfico.

Dadas amostrais		NDVI	WDRVI	EVI	NDRE
22/06/2018	$\cos i$	-0,1797*	-0,1797*	0,0699*	-0,1254*
	p-valor	0,0000	0,0000	0,0068	0,0000
05/09/2018	$\cos i$	-0,1533*	-0,1533*	-0,0262	-0,0971*
	p-valor	0,0000	0,0000	0,3100	0,0002
04/12/2018	$\cos i$	0,0277	0,0277	0,0510*	0,0576*
	p-valor	0,2468	0,2466	0,0484	0,0210

*Correlações estatisticamente significativas em nível 0,05.

Por outro lado, nas porções com menor declividade e, portanto, menos afetadas pelo efeito topográfico, foram verificadas apenas reduções sensíveis na amplitude de variação entre as condições de iluminação apresentadas nas diferentes direções de orientação do terreno. Enquanto que nas porções com declividades acima de 25°, a atenuação do efeito topográfico foi menos eficiente, apresentando uma oscilação de valores de EVI superior a 0,2.

Sob condições de iluminação com elevação solar intermediária e alta, nas quais a influência do efeito topográfico é mais branda, restringindo-se as porções da área de estudo orientadas nas direções opostas ao AAS e com declividades superiores a 15°, foram identificadas pequenas reduções na amplitude de variação entre estas e as áreas diretamente expostas, ficando os valores do EVI destas porções do dossel próximos às encontradas nas áreas planas. A análise dos valores amostrados do NDRE corrigidos para o efeito topográfico, apresentados na Figura 9d, mostrou que estes apresentam algumas oscilações, como valores mais baixos nas porções do dossel orientadas nas direções norte (nas datas de 22 de junho e 05 de setembro) e noroeste (na data de 04 de dezembro), e valores mais elevados que os demais nas direções leste, sudeste e sul. No entanto, de forma geral, estas oscilações não estão diretamente relacionadas ao aspecto direcional das variações das condições de iluminação dos pixels de acordo com geometria de exposição do terreno, sendo estas encontradas nos valores amostrados nas porções da área de estudo com declividades superiores a 25°, sendo estas as mais afetadas por esse efeito. Com a aplicação da normalização topográfica, foram encontradas reduções na amplitude de variação dos valores entre as frações iluminadas e sombreadas do dossel.

Os resultados obtidos com a análise comparativa dos coeficientes de determinação ajustados, antes e após a execução da correção topográfica, mostraram que dentro das características da geometria de iluminação e do terreno

apresentadas pela área de estudo, a aplicação do algoritmo ATCOR-3 foi efetiva para a atenuação da influência provocada pelas variações nas condições de iluminação locais, produzindo resultados proporcionais de acordo com as diferentes sensibilidades ao efeito topográfico apresentadas pelos índices de vegetação.

A análise dos coeficientes de determinação ajustados obtidos a partir da análise de regressão com ajuste linear (apresentados na Tabela 7), mostrou que para o conjunto calculado a partir das medidas de reflectância do dossel florestal, sem a aplicação da correção topográfica, o índice EVI foi que apresentou maior sensibilidade em decorrência das variações na incidência da radiação solar, em todas as condições de iluminação analisadas. Desta forma, a amplitude variação apresentada por este índice pode ser explicada em até 21,45%, pelas diferenças na iluminação do dossel em uma cena obtida durante o período de baixa elevação solar.

Por outro lado, após a aplicação da correção dos efeitos topográficos o EVI passou a ser o índice espectral de vegetação menos influenciado pelas variações nas condições de iluminação do dossel florestal, passando seus valores a serem explicados em menos de 1,01% pela variação na incidência de radiação solar, sob condições de baixa elevação solar, sendo também o menos influenciado sob condições de elevação solar intermediária (0,06%) em relação aos demais índices analisados.

Os índices NDVI e WDRVI apresentam uma sensibilidade ao efeito topográfico muito semelhante, embora sendo pouco afetados, mesmo em condições de grande variabilidade nas condições de iluminação. Desta forma, com a aplicação da correção topográfica, verificou-se uma pequena redução na influência de seus valores, devido esta já ser baixa. Sendo o NDVI, menos afetado em comparação ao WDRVI em condições de iluminação caracterizadas por média e alta elevação solar. Não sendo identificadas variações entre os valores do NDVI que possam ser associadas

ao efeito topográfico sob condições de iluminação definidas por alta elevação solar ($R^2_{aj} = 0,0000$).

Tabela 5. Coeficientes de determinação ajustados obtidos a partir de regressão com ajuste linear entre as medidas do Cos θ e dos índices espectrais de vegetação calculados a partir das medidas de reflectância sem e com aplicação da correção dos efeitos topográficos, para as datas amostrais analisadas.

Data amostral	Índice de vegetação	R ² _{aj} (%)	
		Sem correção	Com correção
22/06/2018	NDVI	4,59%	3,81%
	WDRVI	4,58%	3,80%
	EVI	21,45%	1,01%
	NDRE	1,81%	1,80%
05/09/2018	NDVI	2,94%	2,50%
	WDRVI	3,83%	3,34%
	EVI	6,73%	0,06%
	NDRE	1,20%	1,16%
04/12/2018	NDVI	0,00%	0,00%
	WDRVI	0,11%	0,11%
	EVI	4,92%	0,47%
	NDRE	0,29%	0,29%

Dentre os índices analisados, o NDRE foi o que apresentou menor influência do efeito topográfico, até mesmo, quando comparado aos demais índices formulados a partir de razão de bandas normalizada, sendo essa inferior a 2% de sua amplitude de variação, mesmo quando obtido sobre condições de grande disparidade nas condições de iluminação do dossel. Devido a este comportamento, os valores de NDRE foram os menos impactados pelo processo de correção topográfica, uma vez que, não apresentaram grandes oscilações de valores entre as diferentes condições de iluminação do dossel.

Conclusões

As características espectrais dos povoamentos florestais de *Pinus taeda*, quando associadas a condições de baixa incidência de radiação solar sobre o dossel, conduzem a superestimação nas medidas de índices espectrais de vegetação estruturados a partir de razão de bandas.

Considerando a localização da área de estudo e as variações sazonais da geometria de iluminação e a topografia local, as porções do dossel menos afetadas pelo efeito topográfico correspondem as localizadas nas áreas planas ou com os demais gradientes clinográficos orientadas nas direções norte, nordeste, leste e sudeste. As demais porções do dossel são afetadas, embora com intensidades variáveis de acordo com o ângulo de elevação solar, pelo efeito topográfico, sendo nestas encontrada uma menor resposta espectral do

dossel, o que faz necessária a adoção de procedimentos para a correção deste efeito.

No que se refere a correção do efeito topográfico, a aplicação do algoritmo ATCOR-3 mostrou-se eficiente para a atenuação deste efeito na maior parte da área de estudo, resultando na redução significativa de oscilações nas medidas de reflectância de superfície do dossel florestal decorrentes da perda de radiação. Considerando as características topográficas locais, a aplicação da normalização topográfica proporcionou a compensação da perda de radiação nos pixels correspondentes as áreas dispostas em condição de sombreamento, com declividades entre 0° e 15°, que compreendem a maior parte da área de estudo.

Os resultados obtidos ressaltam a necessidade da aplicação de procedimentos para a atenuação da influência do efeito topográfico nos dados de sensoriamento remoto. Sendo de grande importância para aplicações de análise de alvos florestais em escala multitemporal.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Empresa Adami S/A Madeiras pela disponibilização de dados. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro na concessão de bolsa de doutorado (processo nº 88882.428254/2019-01). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processo n. 305084/2020-8). A *European Space Agency* (ESA) pela disponibilização dos dados da

missão Sentinel-2. E a *ReSe Applications LLC* pela disponibilização de uma licença do ATCOR.

Referências

- Adhikari, H., Heiskanen, J., Maeda, E. E., Pellikka, P. K. E., 2016. The effect of topographic normalization on fractional tree cover mapping in tropical mountains: an assessment based on seasonal Landsat time series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 52, 20-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.05.008>.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22, 6, 711-728. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- Chance, C. M., Hermosilla, T., Coops, N. C., Wulder, M. A., White, J. C., 2016. Effect of topographic correction on forest change detection using spectral trend analysis of Landsat pixel-based composites. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 44, 186-194. DOI: <https://org/10.1016/j.jag.2015.09.003>.
- Chen, R., Yin, G., Liu, G., Li, J., Verger, A., 2020. Evaluation and normalization of topographic effects on vegetation indices. *Remote Sensing* 12, 2290. DOI: 10.3390/rs12142290.
- Colby, J. D., 1991. Topographic normalization in rugged terrain. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 57, 531-537.
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., Bargellini, P., 2012. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25-36. DOI: <https://org/10.1016/j.rse.2011.11.026>.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2004. Solos do Estado de Santa Catarina. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos. 727.
- Fan, W., Chen, J. M., Ju, W., Zhu, G., 2018. GOST: A Geometric-Optical model for Sloping Terrains. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 52, 9, 5469-5482. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2289852>.
- Gillingham, S. S., Flood, N., Gill, T. K., Mitchell, R. M., 2012. Limitations of the dense dark vegetation method for aerosol retrieval under Australian conditions. *Remote Sensing Letters* 3, 67-76. DOI: <https://org/10.1080/01431161.2010.533298>.
- Gitelson, A. A., 2004. Wide Dynamic Range Vegetation Index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of Plant Physiology* 161, 165-173.
- Gitelson, A. A., Merzlyak, M., 1994. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology* 143, 286-292.
- Gomes, J. B. V., Bognola, I. A., Stolle, L., Santos, P. E. T., Maeda, S., Silva, L. T. M., Bellote, A. F. J., Andrade, G. C., 2016. Unidades de manejo para *pinus*: desenvolvimento e aplicação de metodologia em áreas de produção no oeste catarinense. *Scientia Forestalis* 44, 109, 191-204. DOI: 10.18671/scifor.v44n109.19.
- Hantson, S., Chuvieco, E., 2011. Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13, 691-700. DOI: <https://org/10.1016/j.jag.2011.05.001>.
- Henebry, G. M., Viña, A., Gitelson, A. A., 2004. The Wide Dynamic Range Vegetation Index and its potential utility for gap analysis. *Gap Analysis Bulletin* 12, 50-56.
- Harris Geospatial Solutions, 2018. Environment for Visualizing Images – ENVI. version 5.4. Melbourne: Harris Geospatial Solutions, Inc.
- Hovi, A., Raitio, P., Rautiainen, M., 2017. A spectral analysis of 25 boreal tree species. *Silva Fennica* 51, 4, 1-16. DOI: <https://org/10.14214/sf.7753>.
- Huete, A. R., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., Ferreira, L. G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83, 195-213. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2).
- IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores, 2020. Relatório anual 2020. São Paulo: Instituto Brasileiro de Economia, Fundação Getulio Vargas. 66 p. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>>. Acesso: 06 mar. 2021.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020. Produção da extração vegetal e da silvicultura 2019. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2019_v34_informativo.pdf>. Acesso: 05 mar 2021.
- Jafari, E. K., Naghavi, H., Adeli, K., Latifi, H., 2020. A nondestructive remote sensing-based estimation of the economic value of aboveground temperate forest biomass (case study: Hyrcanian forests, Nowshahr-Iran). *Journal of Sustainable Forestry* 7, 39, 750-770.

- DOI: <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1723645>.
- Käfer, P. S., Rex, F. E., Breunig, F. M., Balbinot, R., 2018. Modeling *Pinus elliotti* growth with multitemporal Landsat data: a study case in Southern Brazil. *Boletim de Ciências Geodésicas* 24, 286-299. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1982-21702018000300019>.
- Koukal, T., Atzberger, C., Schneider, W., 2014. Evaluation of semi-empirical BRDF models inverted against multi-angle data from a digital airborne frame camera for enhancing forest type classification. *Remote Sensing of Environment* 151, 27-43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.12.014>.
- Levy, R. C., Mattoo, S., Munchak, L. A., Remier, L. A., Sayer, A. M., Patadia, F., Hsu, N. C., 2013. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmospheric Measurement Techniques* 6, 11, 2989-3034, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5194/amt-6-2989-2013>.
- Li, H., Xu, L., Shen, H., Zhang, L., 2016. A general variational framework considering cast shadows for the topographic correction of remote sensing imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 117, 161-171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.021>.
- Luciano, A. C. S., Valeriano, M. M., 2016. Mapeamento da distribuição de radiação solar devida ao relevo em diferentes períodos, latitudes e condições atmosféricas. *Revista Brasileira de Cartografia* 68, 5, 945-956.
- Martín-Ortega, P., García-Montero, L. G., Sibelet, N., 2020. Temporal patterns in illumination conditions and its effect on vegetation indices using Landsat on Google Earth Engine. *Remote Sensing* 12, 211. DOI: [doi:10.3390/rs1202021](https://doi.org/10.3390/rs1202021).
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., Qiu, G., 2007. 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* 7, 11, 2636-2651. DOI: <https://doi.org/10.3390/s7112636>.
- Moreira, E. P., Valeriano, M. M., Sanches, I. D. A., Formaggio, A. R., 2016. Topographic effect on spectral vegetation indices from Landsat TM data: is topographic correction necessary? *Boletim de Ciências Geodésicas* 22, 95-107. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702016000100006>.
- Perrando, E. R., Breunig, F. M., Galvão, L. S., Bostelmann, S. L., Martarello, V., Straube, J., Conte, B., Sestari, G., Burgin, M. R. B., De Marco, R., 2020. Evaluation of the effects of pine management on the water yield and quality in Southern Brazil. *Journal of Sustainable Forestry*, 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1746916>.
- Rautiainen, M., Lukeš, P., Homolová, L., Hovi, A., Pisek, J., Möttus, M., 2018. Spectral properties of coniferous forests: a review of in situ and laboratory measurements. *Remote Sensing* 10, 2, 207. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10020207>.
- Rautiainen, M., Stenberg, P., 2005. Application of photon recollision probability in coniferous canopy reflectance simulations. *Remote Sensing of Environment* 96, 1, 98-107. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.02.009>.
- Richter, R., Schläpfer, D., 2019. Atmospheric/topographic correction for satellite imagery: ATCOR-2/3 user guide. *Langeeggweg: Rese Applications LLC*. 211.
- Roberts, D. A., Ustin, S. L., Ogunjemiyo, S., Greenberg, J., Dobrowski, S. Z., Chen, J., Hinckley, T. M., 2004. Spectral and structural measures of northwest forest vegetation at leaf to landscape scales. *Ecosystems* 7, 5, 545-562. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-004-0144-5>.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, 3, Washington-DC, Proceedings... Washington – DC.
- Schulmann, T., Katurji, M., Zawar-Reza, P., 2015. Seeing through shadow: modelling surface irradiance for topographic correction of Landsat ETM+ data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 99, 14-24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.10.004>.
- Shimizu, J. Y., 2008. *Pinus na silvicultura brasileira*. Colombo: EMBRAPA Florestas. 223.
- Smolander, S., Stenberg, P., 2005. Simple parameterizations of the radiation budget of uniform broadleaved and coniferous canopies. *Remote Sensing of Environment* 94, 3, 355-363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.010>.
- Waldhoff, G., Lussem, U., Bareth, G., 2017. Multi-data approach for remote sensing-based regional crop rotation mapping: a case study for the Rur catchment, Germany. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 61, 55-69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.04.009>.