

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

JOSUÉ PAOLI REIS

EFEITOS DA GEOMETRIA DE ILUMINAÇÃO DO TERRENO SOBRE
ÍNDICES HIPERESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO: IMPLICAÇÕES PARA
ANÁLISE FENOLÓGICA DE FITOFISIONOMIAS NO BIOMA CERRADO

VIÇOSA – MINAS GERAIS
2020

JOSUÉ PAOLI REIS

EFEITOS DA GEOMETRIA DE ILUMINAÇÃO DO TERRENO SOBRE
ÍNDICES HIPERESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO: IMPLICAÇÕES PARA
ANÁLISE FENOLÓGICA DE FITOFISIONOMIAS NO BIOMA CERRADO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de Magister Scientiae.

Orientadora: Cibele Hummel do Amaral

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2020

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

R375e
2020

Reis, Josué Paoli, 1991-
Efeitos da geometria de iluminação do terreno sobre índices
hiperespectrais de vegetação : implicações para análise
fenológica de fitofisionomias no bioma Cerrado / Josué Paoli
Reis. – Viçosa, MG, 2020.
46 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Cibele Hummel do Amaral.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 40-46.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Vegetação - Mapeamento.
3. Fenologia. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento
de Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em
Ciência Florestal. II. Título.

CDD 22. ed. 634.91134

JOSUÉ PAOLI REIS

**EFEITOS DA GEOMETRIA DE ILUMINAÇÃO DO TERRENO SOBRE
ÍNDICES HIPERESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO: IMPLICAÇÕES PARA
ANÁLISE FENOLÓGICA DE FITOFISIONOMIAS NO BIOMA CERRADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de outubro de 2020

Assentimento:



Josué Paoli Reis
Autor



Cibele Hummel do Amaral
Orientadora

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, aos meus pais, familiares e amigos por todo o apoio. Agradeço à Cibele pela Orientação, humana e inspiradora, e pelo conhecimento a mim transmitido, e agradeço todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

REIS, Josué Paoli, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2020. Efeitos da geometria de iluminação do terreno sobre índices hiperespectrais de vegetação: implicações para análise fenológica de fitofisionomias no bioma Cerrado. Orientadora: Cibele Hummel do Amaral.

O Cerrado brasileiro é a savana mais rica do mundo e desempenha papel importante nos ciclos biogeoquímicos regionais e globais. Assim, o monitoramento de sua fenologia é fundamental e deve ser aumentado com a disponibilidade de novos dados hiperespectrais obtidos a partir do espaço. Dessa forma, este estudo visou analisar a sensibilidade de nove índices hiperespectrais de vegetação aos efeitos da geometria de iluminação do terreno para seis fitofisionomias em áreas declivosas no Cerrado brasileiro, utilizando dados Hyperion adquiridos durante as estações chuvosa (Fevereiro) e seca (Agosto) do ano de 2010. Esses dados foram pré-processados, com posterior aplicação da correção topográfica C-correction. Foram calculadas as diferenças estatísticas (teste de Wilcoxon, diferença relativa) e a magnitude do efeito da geometria de iluminação sobre bandas e índices, tanto antes como após a correção topográfica para ambas as datas, por fitofisionomia. Os resultados mostraram que, de maneira geral, os índices mais influenciados pela geometria de iluminação do terreno são o Enhanced Vegetation Index (EVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), Anthocyanin Reflectance Index (ARI), Photochemical Reflectance Index (PRI) e Plant Senescence Reflectance Index (PSRI). Já os menos influenciados são os índices biofísicos Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) e Simple Ratio (SR). A análise fenológica das fitofisionomias do Cerrado também é influenciada pela correção topográfica. Contudo, foi observado que as magnitudes dos efeitos de iluminação do terreno variam entre as diferentes fisionomias do bioma, não apresentando qualquer padrão. Com esse trabalho foi possível analisar a variação sazonal em resposta espectral de fisionomias savânicas a florestais, bem como indicar correção topográfica de dados hiperespectrais orbitais para o monitoramento de áreas declivosas do bioma Cerrado.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto. Vegetação – Mapeamento. Fenologia.

ABSTRACT

REIS, Josué Paoli, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2020. Effects of terrain illumination geometry on hyperspectral vegetation indices: implications for phenological analysis of phytophysiognomies in the Cerrado biome. Advisor: Cibele Hummel do Amaral.

The Brazilian Cerrado is the richest savanna in the world and plays an important role in regional and global biogeochemical cycles. Thus, monitoring its phenology is essential and should be increased with the availability of new hyperspectral data obtained from space. Therefore, this study aimed to analyze the sensitivity of nine hyperspectral vegetation indices to the effects of terrain illumination geometry for six phytophysiognomies in sloping areas of the Brazilian Cerrado, using Hyperion data acquired during the rainy (February) and dry (August) seasons of 2010. These data were pre-processed, with subsequent application of the topographic C-correction. Statistical differences were calculated (Wilcoxon test, relative difference) and the magnitude of the effect of lighting geometry on bands and indices, both before and after topographic correction for both dates, by phytophysiognomy. The results showed that, in general, the indices most influenced by the terrain illumination geometry are the Enhanced Vegetation Index (EVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), Anthocyanin Reflectance Index (ARI), Photochemical Reflectance Index (PRI) and Plant Senescence Reflectance Index (PSRI). The least influenced are the biophysical indices Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) and Simple Ratio (SR). Phenological analysis of Cerrado phytophysiognomies is also influenced by topographic correction. However, it was observed that the magnitudes of the terrain illumination effects vary between the different physiognomies of the biome, showing no pattern. With this work it was possible to analyze the seasonal variation in spectral response of savannic to forest physiognomies, as well as to indicate topographic correction of orbital hyperspectral data for the monitoring of sloping areas of the Cerrado biome.

Keywords: Remote Sensing. Vegetation – Mapping. Phenology.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	MATERIAL E MÉTODOS	10
	2.1 Área de estudo.....	10
	2.2 Aquisição das imagens	12
	2.3 Pré-processamento dos dados	12
	2.4 Cálculo dos índices de vegetação.....	14
	2.5 Extração dos dados por fisionomia e análise dos dados.....	14
3	RESULTADOS.....	16
	3.1 Efeito do cosseno de i e da correção topográfica na reflectância dos dados hiperespectrais	16
	3.2 Efeito das classes de iluminação e da correção topográfica entre as fitofisnomias e datas.....	19
	3.3 Sensibilidade dos índices hiperespectrais aos efeitos topográficos	25
	3.4 Efeito da correção topográfica na análise fenológica dos dados	37
4	DISCUSSÃO	38
5	CONCLUSÃO	43
6	APÊNDICES	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1 INTRODUÇÃO

O Cerrado brasileiro é a savana mais rica do mundo em termos de biodiversidade (KLINK & MACHADO, 2005). Desempenha um papel importante no que diz respeito aos ciclos da água, energia e carbono, tanto em escala regional quanto global (COLLI & DIANESE, 2020; FERREIRA et al., 2006; LIMA & SILVA, 2007). É o segundo maior bioma em extensão territorial do Brasil (BRIDGEWATER et al. 2004) e possui mais de 4.800 espécies de plantas e vertebrados endêmicos (STRASSBURG et al., 2017). Sua vegetação é caracterizada por formações campestres, savânicas e florestais, que ocorrem em diferentes proporções ao longo de sua extensão (SANO & FERREIRA, 2005). Dessa forma, esse bioma é considerado um hotspot mundial de biodiversidade (MYERS et al., 2000).

Apenas 19,8% das suas áreas com vegetação nativa permanecem intactas (STRASSBURG et al., 2017). Levando em consideração que a pressão antrópica no bioma Cerrado vem aumentando (ESPÍRITO-SANTO et al. 2016), é importante determinar as características relacionadas à vegetação desse bioma de uma forma contínua, para posteriores avaliações de como as mudanças do uso e cobertura da terra e do clima afetam as funções fenológicas dos ecossistemas presentes (BECERRA et al., 2009).

Estudos recentes têm demonstrado que as variações globais no clima influenciam o crescimento e a fenologia de populações vegetais, como a produção e senescência foliar (WU et al., 2016; WHITECROSS et al., 2017; MAEDA et al., 2016; CHANG et al., 2019), afetando diretamente os serviços ambientais que promovem. Com isso, para se obter predições exatas das respostas da vegetação a essas variações, é necessário o entendimento dos ciclos fenológicos e suas relações com tais variáveis, como temperatura e precipitação (ZHANG et al., 2004). A precipitação é um dos principais fatores que determina a dinâmica sazonal da vegetação na região de savanas tropicais (BECERRA et al., 2009). A região do Cerrado apresenta duas estações bem definidas, uma seca e outra chuvosa, com aproximadamente 90% das chuvas ocorrendo entre os meses de outubro a março (FERREIRA & HUETE, 2004). Entre os anos 1977 e 2010, a precipitação média anual no Cerrado diminuiu cerca de 8,4% (125 mm) (CAMPOS & CHAVES, 2020), e a tendência é que essa diminuição continue, principalmente, durante a estação seca (DEBORTOLI et al., 2015).

Em função dessa sazonalidade, índices de vegetação (IVs) têm sido utilizados para o monitoramento da vegetação ao longo do tempo (JACON et al., 2017; TONIOL et al., 2017) e, com o advento dos sensores hiperespectrais, surgiu um novo grupo de IVs que incluem bandas estreitas, permitindo a detecção de propriedades específicas da vegetação com maior acurácia (CHO et al., 2009; GALVÃO et al., 2009). Esses índices podem ser divididos em três grupos, de acordo com os atributos da vegetação a que estão relacionados, são eles: 1) biofísicos (ou estruturais, que tem relação com o índice de área foliar e outras variáveis biofísicas da vegetação); 2) bioquímicos (que se relacionam a compostos bioquímicos presentes na vegetação, como antocianinas, carotenóides, lignina, celulose, água, etc.) e 3) fisiológicos (relacionados à eficiência do uso de luz, stress e senscência foliar) (ROBERTS et al., 2016).

O sensor Hyperion foi o primeiro sensor hiperespectral a bordo de um satélite, o Earth Observing One (EO-1). Embora decomissionado recentemente, esse sensor gerou uma série histórica única de imagens hiperespectrais de 2000 a 2017. Orbitando a 705 km de altitude, adquiriu dados do espectro entre 426 a 2395 nm em 242 bandas estreitas e contíguas, com resolução espacial de 30 metros e faixa de imageamento de 7,7 km (PEARLMAN et al., 2003).

Contudo, para o uso adequado desse conjunto rico de dados, principalmente a partir de áreas declivosas, deve-se considerar que a resposta espectral dos alvos imageados também resulta de efeitos da geometria de iluminação do terreno (DE OLIVEIRA et al., 2019; GALVÃO et al., 2013). Nessas áreas, a correção topográfica é um passo importante no pré-processamento de dados obtidos por sensoriamento remoto (TAN et al., 2013). O objetivo dessa correção é compensar as diferenças na irradiância solar entre os locais com inclinação e faces de exposição (aspectos) variados e, dessa forma, calcular os valores de radiação que o sensor teria obtido no caso de uma superfície plana (SOLA et al. 2016).

No Cerrado, o relevo é caracterizado pela presença de planaltos, planícies e depressões, sendo os planaltos e planícies áreas majoritariamente planas ou levemente onduladas (AB'SÁBER, 1981). Nas depressões e em certos locais desse bioma (como nas áreas onde se encontram afloramentos rochosos), o relevo se apresenta de forma mais acentuada (MOTA et al., 2014; LENZA et al., 2011; LIMA, 2008). No estado de Goiás, esses locais de relevo acentuado, que possuem maiores valores de altitude e declividade, são observados em uma faixa que corta o território do estado numa direção diagonal

sudoeste-nordeste (DE OLIVEIRA, 2014). Nesses locais, a aplicação de alguma correção topográfica durante o pré-processamento de dados hiperespectrais pode ser uma etapa necessária para uma correta interpretação de tais dados.

Vários métodos de correção topográfica foram criados para corrigir os efeitos topográficos na radiância medida por sensores, entre os mais comuns estão os métodos C-Correction (TEILLET et al., 1982), Sun-Canopy-Sensor + C (SOENEN et al., 2005), Statistical-Empirical (TEILLET et al., 1982) e Minnaert (MINNAERT, 1941). Hantson e Chuvieco (2011) compararam diferentes resultados de correções topográficas em dados multitemporais Landsat ETM + e mostraram que, para uma única imagem, os modelos de correção C e Minnaert foram mais apropriados, enquanto para dados multitemporais, o modelo C-correction sozinho teve melhor desempenho e, além disso, esse modelo foi mais eficaz quando os parâmetros associados a ele foram estimados separadamente para diferentes classes de cobertura da superfície. Outros trabalhos também mostram o método C-correction como satisfatório para a correção topográfica em áreas com cobertura vegetal (VINCINI & FRAZZI, 2003; EDIRIWEERA et al., 2013; RICHTER et al., 2009; PARK et al., 2017). Se tratando de estudos fenológicos da vegetação em terrenos declivosos, a correção topográfica tem se mostrado uma etapa necessária no pré-processamento dos dados (GALVÃO et al., 2016; FAN et al., 2015; SESNIE et al., 2012).

Embora já se tenha sido comprovada a efetividade do método C-correction para correção topográfica de dados Hyperion a fim de se obter uma correta interpretação de índices hiperespectrais em floresta Neotropical (OLIVEIRA et al., 2019), parecem faltar na literatura estudos que observem sua aplicabilidade sobre dados hiperespectrais multitemporais, com elevada amplitude sazonal em ângulo zenital solar, tão quanto seus efeitos sobre diferentes formações vegetais.

Assim, diante da relevância do bioma Cerrado para os ciclos globais, como o de carbono, e sua sazonalidade sinérgica com a precipitação, o monitoramento intra e interanual de suas fisionomias é fundamental para balizar a influência das tendências climáticas no oferecimento de serviços ambientais. Além disso, a compreensão da funcionalidade dessas fisionomias deverá ser impulsionada pelas novas missões orbitais de sensores hiperespectrais, como o DESIS (DLR Earth Sensing Imaging Spectrometer) da agência espacial alemã, o PRISMA (Precursore Iperspettrale della Missione

Applicativa) da agência espacial italiana e o HISUI (Hyperspectral Imager Suite) da agência espacial japonesa, em órbita desde 2019. Adicionalmente, ainda não são observados na literatura estudos que investiguem o efeito sazonal de iluminação do terreno no monitoramento remoto dessas fisionomias vegetais, que apresentam elevada variabilidade florística e estrutural.

Portanto, o objetivo desse estudo é verificar a influência da geometria de iluminação do terreno sobre nove índices hiperespectrais de vegetação obtidos por imagens do sensor Hyperion/EO-1, para seis fitofisionomias do bioma Cerrado em duas datas no ano de 2010, uma durante a estação chuvosa e outra durante a estação seca. Adicionalmente, são avaliadas as diferenças estatísticas e a magnitude do efeito entre os dados nas superfícies mais iluminadas e menos iluminadas, antes da correção e após a correção topográfica C-correction. Também são avaliadas as diferenças relativas entre os valores dos índices antes e após a correção. Por fim, é feita a análise fenológica das fitofisionomias em questão, para os dados antes e depois da correção.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área do presente estudo está localizada entre as coordenadas 15,4° e 16,3° S e entre 48,8° e 48,9° O, somando 73.967 hectares (Figura 1). Compreende parte dos municípios de, Anápolis, Campo Limpo de Goiás, Pirenópolis e Vila Propício, no estado de Goiás, centro-oeste brasileiro. Alguns desses municípios fazem parte do Ecomuseu do Cerrado, criado em 1998 para contribuir à conservação ambiental da região e dos divisores de águas das bacias hidrográficas presentes (INSTITUTO HUAH DO PLANALTO CENTRAL, 2003). Possuindo tipo climático tropical com estação seca (Aw), segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, a região é caracterizada por temperatura média mensal superior a 18°C para todos os meses do ano (SANO et al., 2007) e uma estação seca que dura de cinco a sete meses. Nos meses chuvosos, a precipitação oscila de 1.400 a 1.500 mm (SEPLAN GO, 1995). A área apresenta um relevo relativamente acidentado, com altitudes variando de 667 a 1291 metros.

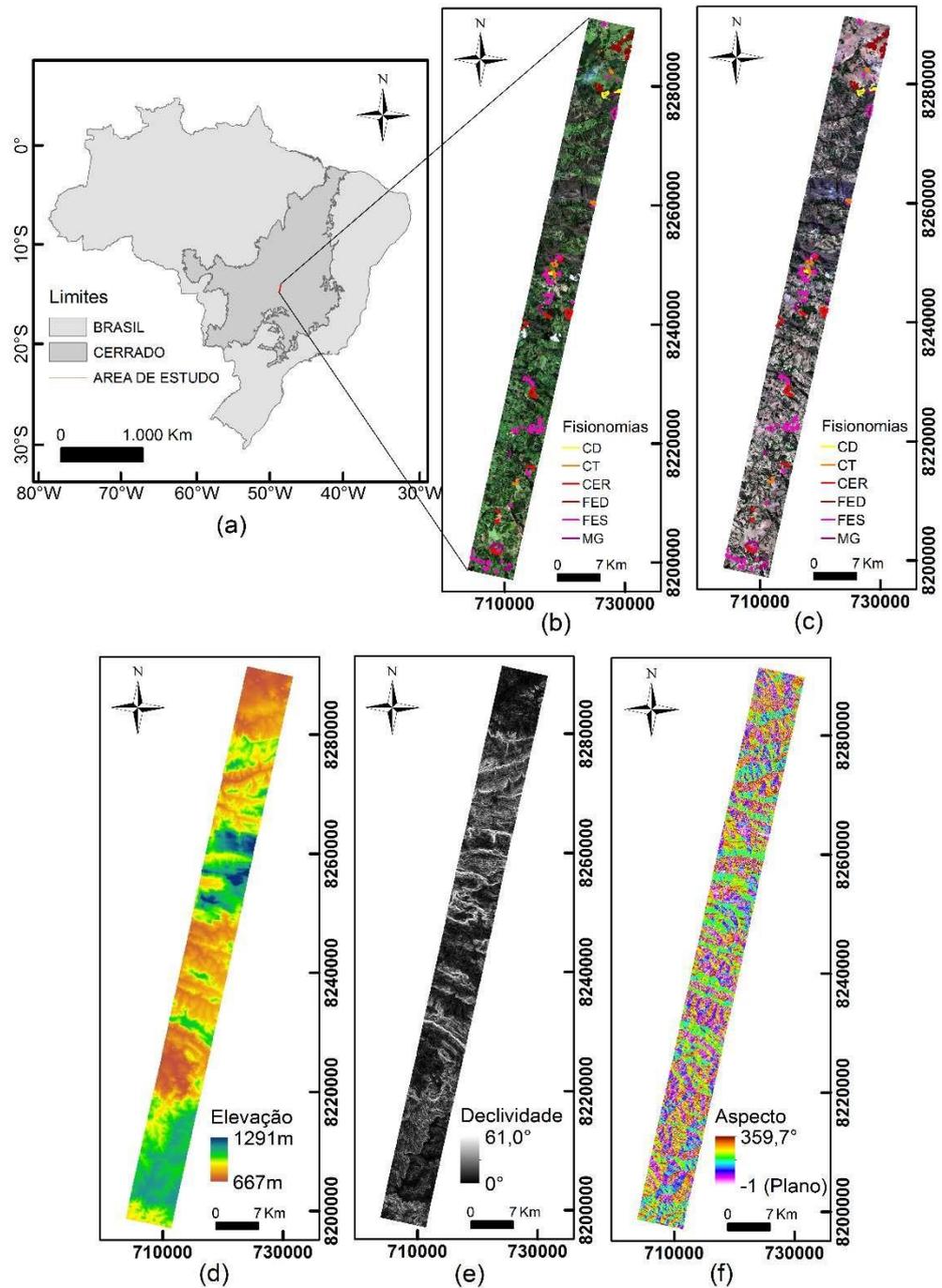


Figura 1 - Área de estudo. (a) – Localização da área no Cerrado brasileiro; (b) – Composição em cores reais da área durante a estação chuvosa (fevereiro), CT = Cerrado Típico, CD = Cerrado Denso, CER = Cerradão, FED = Floresta Estacional Decidual, FES = Floresta Estacional Semidecidual, MG = Mata de Galeria; (c) – Composição em cores reais da área durante a estação seca (agosto), CT = Cerrado Típico, CD = Cerrado Denso, CER = Cerradão, FED = Floresta Estacional Decidual, FES = Floresta Estacional Semidecidual, MG = Mata de Galeria; (d) – Modelo digital de elevação da área (metros); (e) – Declividade da área (graus); (f) – Aspecto (faces de exposição do terreno) da área (graus).

2.2 Aquisição das imagens

As imagens geradas pelo sensor Hyperion (EO-1) foram obtidas pela plataforma EarthExplorer (NASA/USGS), uma durante o período chuvoso (04/02/2010) e outra durante o período seco (01/08/2010), com nível de processamento L1Gst (radiométrica e geometricamente corrigidas). Um modelo digital de elevação (Shuttle Radar Topography Mission) também foi obtido nessa mesma fonte. Ambos os dados possuem resolução espacial de 30 m. Algumas características das imagens hiperespectrais adquiridas estão descritas na tabela a seguir (Tabela 1). Galvão et al. (2011) consideram que ângulos de visada menores que 10° não influenciam significativamente na reflectância dos alvos captada pelo sensor Hyperion, dessa forma, considera-se esses ângulos como nadir. Para o presente estudo, as imagens foram adquiridas pelo sensor com ângulos de visada fora do nadir, porém, a influência dessa angulação é baixa e semelhante para as duas imagens (com apenas 1° de diferença entre elas).

Tabela 1 - Características das duas imagens Hyperion adquiridas para o estudo.

Data de aquisição	04/02/2010	01/08/2010
Hora início da aquisição	13:09:57	13:10:25
Hora fim da aquisição	13:14:17	13:14:45
Azimute solar	$95,19^\circ$	$44,62^\circ$
Elevação solar	$56,94^\circ$	$43,48^\circ$
Ângulo de visada do sensor	12.127°	13.174°
Nível de processamento da imagem	L1Gst	L1Gst

2.3 Pré-processamento dos dados

Foi utilizado o software ENVI 4.7 (Exelis Visual Information Solutions – Boulder, CO, EUA) para o pré-processamento das imagens. Para a correção dos “strippings” e do efeito “smile” foi usada a extensão Hyperion Tools (WHITE, 2011). Os valores de radiância dos pixels foram convertidos em reflectância de superfície usando o método de correção atmosférica FLAASH (Fast Line-ofSight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes). O algoritmo se baseia no modelo de transferência radiativa MODTRAN4 para remover efeitos de espalhamento e absorção atmosférica (FELDE et al., 2003). O

modelo atmosférico utilizado foi o tropical, com tipo de aerossol rural e 70 Km de visibilidade. A quantidade de vapor d'água foi estimada pixel-a-pixel com base na feição espectral de 940 nm.

A partir da imagem SRTM (modelo digital de elevação) do local, foram geradas imagens do aspecto (faces de exposição do terreno) e da declividade para a área, por meio do software ArcGis 10.3 (ESRI – Redlands, CA, EUA). Utilizando esses produtos e os ângulos zenital e azimutal solar do local em ambas as datas, foram criadas duas imagens contendo os valores do cosseno do ângulo de incidência ($\cos(i)$) em cada pixel.

O $\cos(i)$ está relacionado à intensidade de iluminação e de sombra em um local, resultante das variações de relevo e posição solar (TEILLET et al., 1982). Ele pode variar de -1 a 1, sendo que quanto mais próximo de -1, maior a intensidade de sombra no pixel. A fórmula do $\cos(i)$ utilizada foi a seguinte (Eq. 1):

$$\cos(i) = \cos(\Theta) * \cos(\alpha) + \sin(\Theta) * \sin(\alpha) * \cos(\phi - \phi_s) \quad (1)$$

em que: Θ = ângulo zenital solar, em radianos; α = declividade do terreno, em radianos; ϕ = ângulo azimutal solar, em radianos; ϕ_s = ângulo azimutal da face de exposição do terreno, em radianos.

Para a correção topográfica, foi aplicado o método C-correction (TEILLET et al., 1982) nos valores das bandas. A reflectância das bandas corrigidas (ρ_{tk}) foi obtida a partir da equação 2: (θ)

$$\rho_{tk} = \frac{\rho_k}{\cos(\theta)} \quad (2)$$

Em que ρ_k é a reflectância de superfície original de cada banda, θ_z é o ângulo zenital solar no momento da aquisição da imagem, i é o ângulo de incidência e C_k é um parâmetro específico de cada banda, calculado pela Equação 3:

$$C_k = \frac{\rho_{tk}}{\rho_k} \quad (3)$$

Onde b_k é o coeficiente linear e m_k é o coeficiente angular da regressão entre o $\cos(i)$ e a reflectância de cada banda utilizada.

2.4 Cálculo dos índices de vegetação

Com as imagens pré-processadas, corrigidas e não corrigidas topograficamente, foram calculados cinco índices de vegetação (Tabela 2). Tais índices se referem a características biofísicas (A), bioquímicas (B) e fisiológicas (C) da vegetação, o que possibilita uma análise da fenologia entre os fragmentos nesses aspectos. Os índices utilizados encontram-se na a seguir (Tabela 2).

Tabela 2 - Índices hiperespectrais de vegetação utilizados na análise sazonal das fisionomias de Cerrado. Grupo A: Índices biofísicos; Grupo B: Índices bioquímicos; Grupo C: Índices fisiológicos.

Índice	Fórmula ^a	Referência
NDVI	$(\rho_{864} - \rho_{671}) / (\rho_{864} + \rho_{671})$	ROUSE et al. (1973)
EVI A	$2,5 \cdot (\rho_{864} - \rho_{671}) / (1 + \rho_{864} + 6 \cdot \rho_{671} - 7,5 \cdot \rho_{467})$	HUETE et al. (2002)
SR	ρ_{864} / ρ_{671}	JORDAN (1969)
SAVI	$1,5 \cdot (\rho_{864} - \rho_{671}) / (\rho_{864} + \rho_{671} + 0,5)$	HUETE (1988)
ARI B	$(1/\rho_{550}) - (1/\rho_{700})$	GITELSON et al. (2001)
CRI	$(1/\rho_{508}) - (1/\rho_{701})$	GITELSON et al. (2002)
NDWI	$(\rho_{854} - \rho_{1245}) / (\rho_{854} + \rho_{1245})$	GAO (1996)
PRI C	$(\rho_{529} - \rho_{569}) / (\rho_{529} + \rho_{569})$	GAMON et al. (1997)
PSRI	$(\rho_{681} - \rho_{498}) / \rho_{752}$	MERZLYAK et al. (1999)

^a ρ é a reflectância no comprimento de onda central da banda Hyperion, mais próximo ao da equação original.

2.5 Extração dos dados por fisionomia e análise dos dados

Para a análise dos dados, foram coletadas as informações espectrais (bandas e índices) de 339 pontos (pixels completamente inseridos) na fisionomia Cerrado Típico, 236 pontos no Cerrado Denso, 743 pontos no Cerradão, 737 pontos na Floresta Estacional Decidual, 1338 pontos na Floresta Estacional Semidecidual e 219 pontos na Mata de Galeria, tais pontos foram distribuídos aleatoriamente, sistematizados por uma distância mínima de 30m, entre os fragmentos das fisionomias. A definição dessas fisionomias foi realizada em campo por Rodrigues (2018), com auxílio de imagens históricas obtidas pelo sensor Thematic Mapper e Operational Land Imager/ Landsat-5 e -8 e também de alta

resolução espacial, disponíveis na Plataforma GoogleEarth. Os fragmentos de vegetação amostrados foram aqueles nativos, que não sofreram perturbações significativas.

Foi calculada a relação (regressão linear) entre os valores das reflectâncias das bandas utilizadas e o $\cos(i)$ para todas as fisionomias nas duas datas. Os valores dos coeficientes linear e angular das regressões foram utilizados posteriormente na correção topográfica. Os p-valores, os coeficientes de Pearson das regressões e os coeficientes de variação de cada banda foram comparados antes e após a correção. Foram selecionados fragmentos de algumas fisionomias para demonstrar o efeito visual da correção sobre as bandas (composição em cores reais). Os índices de vegetação foram posteriormente calculados com as bandas não-corrigidas e corrigidas topograficamente.

Para a verificação estatística do efeito da correção sobre as bandas e índices, foi feita primeiramente a classificação dos pixels analisados em duas classes de iluminação: sombreada e iluminada. Para isso, foi analisada a distribuição dos valores do $\cos(i)$ nas fisionomias e o cosseno do ângulo zenital solar ($\cos(\theta_z)$) em cada data. Quando $\cos(i) > \cos(\theta_z)$, o pixel foi considerado da classe iluminada e quando $\cos(i) < \cos(\theta_z)$, o pixel foi considerado da classe sombreada. Analisando a equação da correção topográfica (equação 2), podemos inferir que, para as bandas, os pixels da classe sombreada terão seus valores aumentados após a correção e os pixels da classe iluminada terão seus valores diminuídos.

O teste estatístico de Wilcoxon–Mann–Whitney (MANN & WHITNEY, 1947) a 1% de significância foi utilizado a fim de comparar os valores entre as classes sombreada e iluminada, para as bandas e para os índices, em todas as fisionomias e datas, tanto antes quanto após a correção topográfica. Os p-valores dos testes foram comparados antes e após a correção. O teste de Wilcoxon–Mann–Whitney é um teste não-paramétrico que compara dois grupos independentes, a fim de verificar se pertencem ou não à uma mesma população.

Além disso, utilizando os valores Z advindos do teste de Wilcoxon–Mann–Whitney, foi calculado o coeficiente r de Cohen (COHEN 1988), que, nesse caso, indica a magnitude de efeito das classes de iluminação sobre os dados. O coeficiente r de Cohen varia de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, maior a magnitude do efeito. As classes de amplitude dos valores do coeficiente r de Cohen indicaram efeito nulo (0 – 0,1), pequeno (0,1 – 0,3), médio (0,3 – 0,5) e grande ($> 0,5$) das classes de iluminação.

As diferenças relativas (%) entre os valores de cada pixel antes e após a correção, para as bandas e para os índices, foram calculadas e apresentadas, além disso, essas diferenças relativas foram classificadas em intervalos de amplitude, permitindo uma melhor comparação visual entre os erros. As imagens de alguns índices em certas fisionomias e datas, antes e após a correção, assim como suas diferenças relativas associadas, foram plotadas para comparação visual.

Por fim, foi verificado o efeito da correção topográfica na análise fenológica dos dados. Para isso, os valores reamostrados dos índices foram comparados entre as duas datas, em todas as fisionomias, antes e após a correção, pelo teste de Wilcoxon–Mann–Whitney a 1% de significância. Os p-valores de cada teste foram comparados antes e após a correção e os valores dos índices foram plotados em forma de boxplot para cada fisionomia e data.

3 RESULTADOS

3.1 Efeito do cosseno de i e da correção topográfica na reflectância dos dados hiperespectrais

Os valores das reflectancias das bandas tiveram relação direta com o $\cos(i)$ em todas as fisionomias e datas. Os p-valores das regressões entre essas variáveis foi significativo (< 0.01) para todas as bandas, exceto para a banda do azul (498 nm) na Floresta Estacional Semidecidual em fevereiro, as bandas do Red Edge (752 nm) e NIR (854nm e 864 nm) na Mata de Galeria em fevereiro e as bandas do azul (467 nm e 498 nm) e vermelho (671nm e 681 nm) na Mata de Galeria em agosto (Apêndice A). Após a correção, os p-valores de todas as regressões aumentaram, tornando-se não significativos, exceto para a banda do vermelho (681 nm) na Floresta Estacional Semidecidual em agosto (p-valor = 0.002), ao qual houve um aumento do p-valor, porém, ainda se manteve significativo. Houve uma diminuição no coeficiente de Pearson (r) das regressões em todas as fisionomias e datas após a correção. Para algumas bandas, esse coeficiente passou de positivo para negativo, como na banda do vermelho (671nm) nas fisionomias cerrado denso (+0,408 para -0.008) e Floresta Estacional Semidecidual (+0.416 para -0.054) (figura 2).

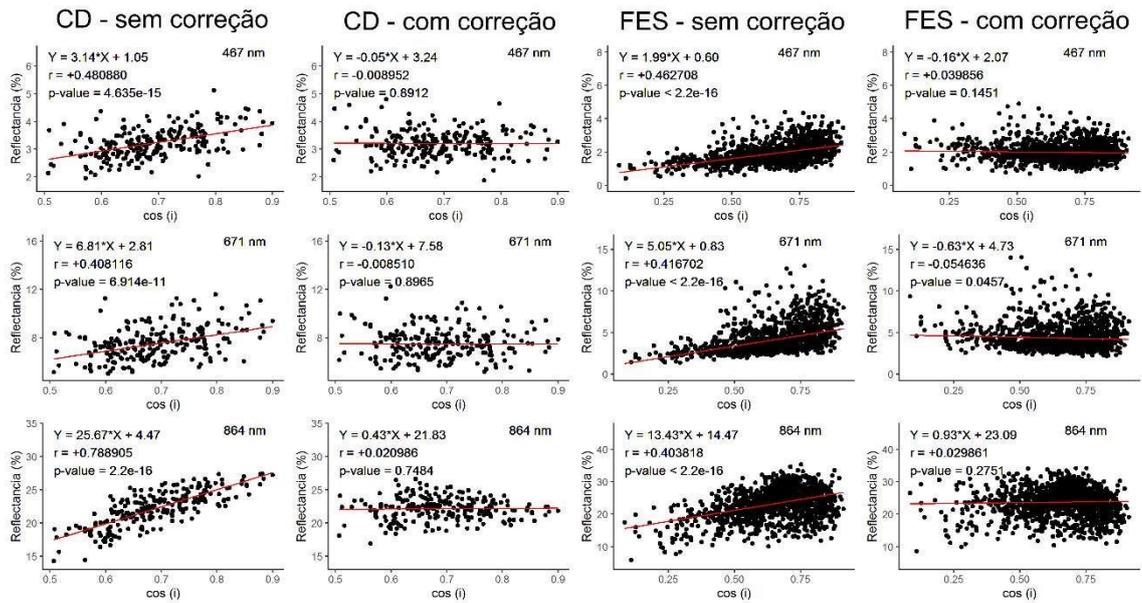


Figura 2 – Gráficos das regressões entre o $\cos(i)$ e a reflectância das bandas 12 (467 nm), 32 (671 nm) e 51 (864 nm) antes e após a correção topográfica, para as fisionomias Cerrado Denso (CD) e Floresta Estacional Semidecidual (FES) em agosto.

A correção topográfica diminuiu a variabilidade dos valores das reflectâncias das bandas Hyperion em todas as fitofisionomias e datas. Os coeficientes de variação dos valores dos pixels não corrigidos foram reduzidos após a correção (figura 3). Em fevereiro, houve uma diminuição relativa de até 30.6 % no coeficiente de variação (banda 1245nm na fisionomia Cerrado Denso) e em agosto, de até 36.6 % (banda 864nm no Cerrado Denso). No geral, as bandas do SWIR, NIR e verde tiveram as maiores reduções no coeficiente de variação em ambas as datas e as maiores variações aconteceram em agosto.

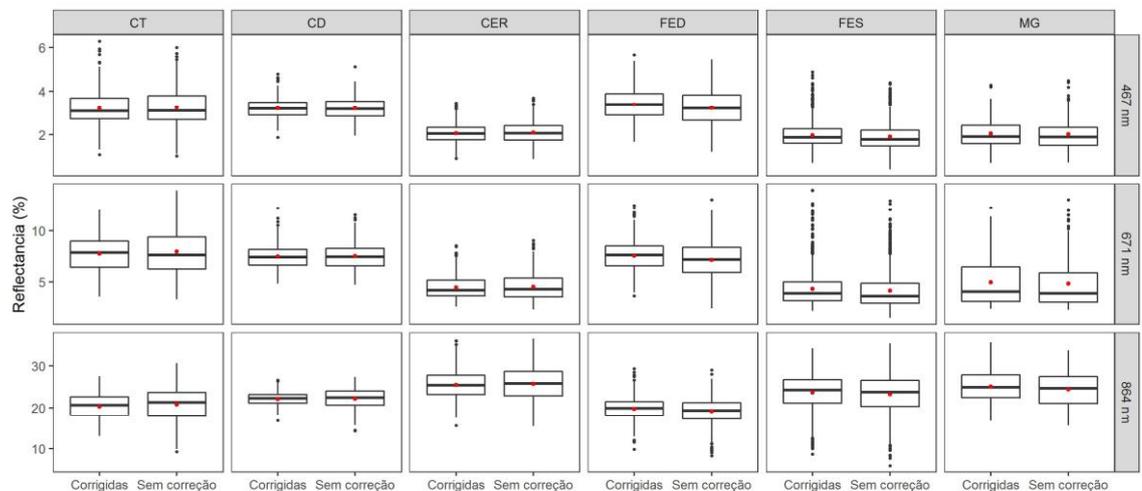


Figura 3 – boxplots com os valores das reflectâncias (%) para as bandas 12 (azul), 32

(vermelho) e 51 (NIR) antes e após a correção, para todas as fisionomias em agosto. Os pontos em roxo representam a média de cada conjunto de valores. CT = Cerrado Típico, CD = Cerrado Denso, CER = Cerradão, FED = Floresta Estacional Decidual, FES = Floresta Estacional Semidecidual, MG = Mata de Galeria.

Para a análise visual do efeito da correção, foram selecionados um fragmento de Floresta Estacional Decidual e um de Floresta Estacional Semidecidual em agosto. A composição em cores reais entre as bandas 15 (498 nm), 22 (569 nm) e 32 (671 nm) foi confeccionada e plotada ao lado da imagem do cos (i) de cada fragmento (Figura 4), evidenciando o efeito da iluminação do terreno e da correção topográfica sobre os dados. Podemos observar que as faces mais sombreadas das imagens sem correção estão de acordo com os menores valores do cos (i) em cada fragmento. Após a correção, essas nuances de sombra foram atenuadas.

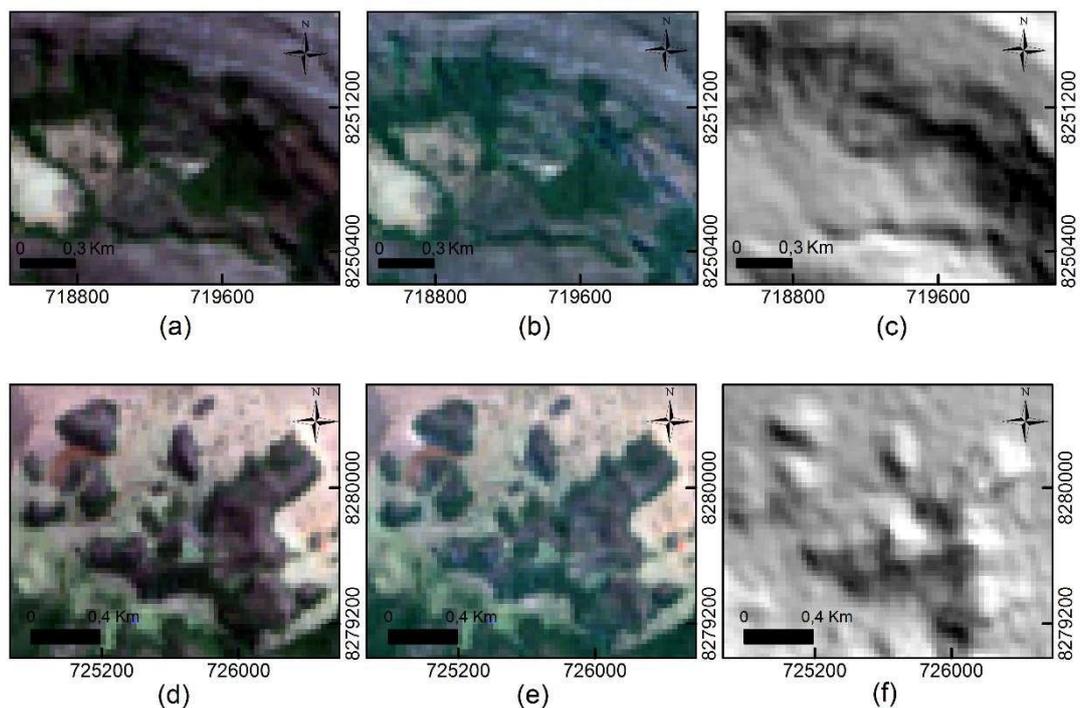


Figura 4 – Efeito da iluminação do terreno e da correção topográfica sobre a reflectância em algumas fitosifionomias. (a) – Composição RGB de um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual em agosto antes da correção; (b) – Composição RGB após a correção; (c) – imagem do cos (i) para a área em questão; (d) – Composição RGB de um fragmento de Floresta Estacional Decidual em agosto antes da correção; (e) – Composição RGB após a correção; (f) – imagem do cos (i) para a área em questão;

3.2 Efeito das classes de iluminação e da correção topográfica entre as fitofisionomias e datas

Para as análises posteriores, foi levada em consideração a distribuição dos valores da declividade e dos aspectos nos pixels ao longo das fisionomias e datas. Ao observar a Figura 5, verifica-se que a maioria dos pontos coletados possuem declividade inferior a 15° , além disso, algumas fisionomias não possuem pontos amostrados o suficiente ao longo dos aspectos (faces de exposição do terreno) nos locais onde a declividade é superior a 15° . Dessa forma, as análises seguintes foram feitas apenas nos locais onde a declividade é inferior a 15° . Isso faz com que a amplitude dos valores do $\cos(i)$ seja semelhante para todas as fisionomias em cada data. Além disso, foi feita uma reamostragem dos pontos nas classes sombreada ($n=90$) e iluminada ($n=73$) em todos os dados, a fim de evitar o enviesamento das análises. O número de pontos amostrados foi determinado pelo número mínimo de pontos coletados entre as fisionomias nas duas datas e classes de iluminação.

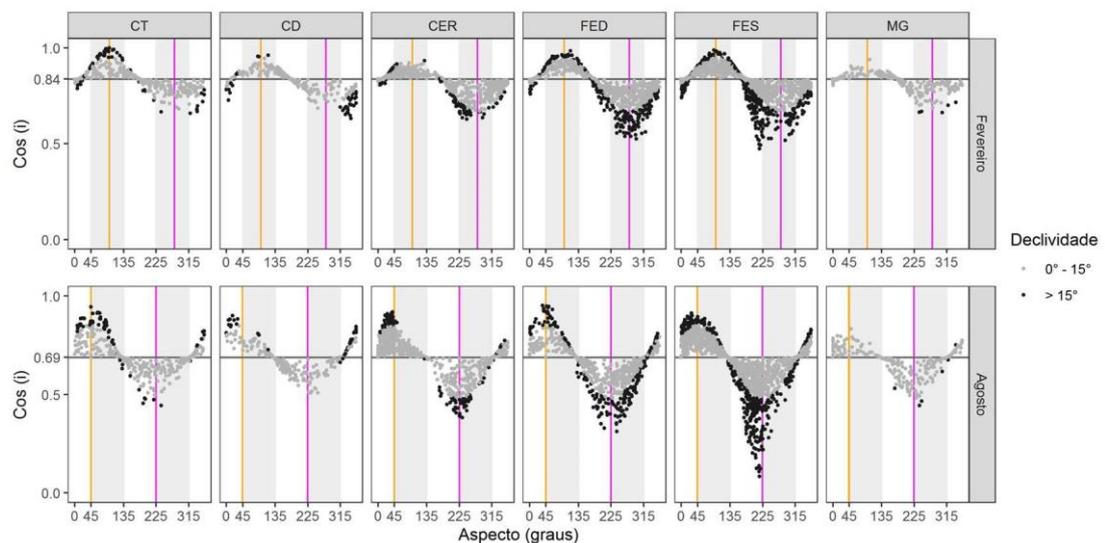


Figura 5 – Distribuição dos valores do $\text{Cos}(i)$ ao longo das faces de exposição (aspecto) para as fisionomias nas duas datas. As diferentes cores dos pontos indicam onde a declividade é maior ou menor que quinze graus. As linhas horizontais que separam as classes sombreada e iluminada representam onde $\text{cos}(i) = \text{cos}(\theta_z)$ em cada data. As linhas coloridas verticais representam os valores dos ângulos de azimute solar (ϕ) (laranja) e da face oposta ao azimute ($\phi + 180^\circ$) (magenta) em cada data.

O teste não-paramétrico de Wilcoxon mostrou que, para a maioria das bandas, foi rejeitada a hipótese nula em que não havia diferenças entre os valores das classes

sombreada e iluminada antes da correção a 1% de probabilidade (p -valor $< 0,01$) (Tabela 3). Isso ocorreu em ambas as datas e em todas as fisionomias, exceto na Floresta Estacional Semidecidual em fevereiro, onde foi aceita a hipótese nula para todas as bandas do espectro visível. Após a correção, os p -valores dos testes entre todos os dados analisados foram não significativos (p -valor $> 0,01$), indicando que a correção reduziu as diferenças nos valores das bandas entre as classes sombreada e iluminada, onde havia o efeito das classes de iluminação. As bandas do azul (467 nm e 498 nm), verde (528 nm) e vermelho (681 nm e 701 nm) na Floresta Estacional Semidecidual em fevereiro e as bandas do azul (467 nm e 498 nm) no Cerrado Típico em agosto não tiveram efeito significativo antes nem após a correção, porém, após a correção, tiveram seus p -valores diminuídos, indicando que para essas bandas, a correção aumentou as diferenças entre as classes de iluminação.

O coeficiente r de Cohen calculado para os dados (Figura 6) mostrou resultados semelhantes aos do teste de Wilcoxon. As mesmas bandas que tiveram seus p -valores do teste de Wilcoxon aumentados após a correção, também tiveram o coeficiente r aumentados. Para as outras bandas, a magnitude do efeito diminuiu com a correção. Os maiores efeitos antes da correção, no geral, foram observados nas bandas do SWIR, NIR e verde. Em alguns casos, esse coeficiente atingiu magnitude de efeito grande ($> 0,5$). Em agosto os efeitos foram mais intensos do que em fevereiro na maioria das fisionomias e bandas e tal diferença pode ser relacionada ao ângulo zenital solar em cada data (Fevereiro = $33,1^\circ$, Agosto = $46,5^\circ$).

Considerando as diferenças relativas entre os pixels não-corrigidos e corrigidos das bandas (Figura 7), observamos que as maiores diferenças ocorreram em agosto, para todas as bandas e fisionomias, tanto na classe sombreada como iluminada. Entre as duas classes de iluminação, a sombreada foi a mais afetada nas duas datas, para todas as bandas e fisionomias, isso ocorreu porque a amplitude de variação entre os valores mínimos do $\cos(i)$ e do $\cos(\theta_z)$ na classe sombreada foi maior do que a amplitude do valor máximo entre o $\cos(i)$ e o $\cos(\theta_z)$ na classe iluminada. As menores diferenças relativas nas duas classes de iluminação aconteceram na floresta estacional semidecidual em fevereiro nas bandas do visível (valores entre -5 e 5%), o que está de acordo com o observado nos resultados do teste de Wilcoxon e do coeficiente r de Cohen antes da correção. As bandas mais afetadas em cada classe de iluminação variaram de acordo com a fisionomia e data.

Tabela 3 – P-valores dos testes de Wilcoxon entre as classes sombreada e iluminada para as bandas em todas as fisionomias e datas. Em negrito, estão realçadas as diferenças significativas.

	NÃO-CORRIGIDOS												CORRIGIDOS											
	Fevereiro						Agosto						Fevereiro						Agosto					
	CT	CD	CER	FED	FES	MG	CT	CD	CER	FED	FES	MG	CT	CD	CER	FED	FES	MG	CT	CD	CER	FED	FES	MG
467nm	0,05	7,1E-04	2,0E-03	0,02	0,86	4,6E-03	0,48	9,5E-05	6,6E-04	2,1E-05	1,7E-05	0,27	0,53	0,86	0,08	0,71	0,63	0,76	0,02	0,73	0,77	0,40	0,35	0,76
498nm	0,02	1,3E-04	4,8E-04	9,5E-03	0,95	1,1E-04	0,22	6,1E-06	3,0E-05	4,4E-07	6,7E-06	0,28	0,66	0,89	0,37	0,20	0,72	0,33	0,04	0,78	0,73	0,98	0,31	0,73
508nm	8,4E-03	9,8E-05	4,0E-06	1,6E-04	0,62	1,2E-03	0,07	7,3E-07	2,2E-06	2,6E-08	1,7E-06	0,08	0,51	0,65	0,19	0,57	0,96	0,86	0,07	0,71	0,78	0,85	0,18	0,75
528nm	7,4E-04	8,4E-06	3,9E-10	4,0E-08	0,73	8,0E-05	4,4E-03	5,0E-08	2,2E-09	4,3E-08	1,3E-05	9,2E-03	0,34	0,82	0,09	0,73	0,59	0,58	0,06	0,98	0,89	0,95	0,62	0,78
549nm	3,0E-04	2,3E-07	1,3E-11	2,9E-07	0,34	2,8E-04	7,7E-05	1,3E-10	4,6E-12	3,9E-09	4,9E-06	4,4E-04	0,27	0,47	0,02	0,37	0,69	0,63	0,05	0,97	0,78	0,87	0,50	0,83
569nm	4,0E-04	4,4E-07	2,1E-10	5,2E-07	0,14	1,8E-03	3,4E-05	2,7E-10	9,2E-11	2,9E-09	1,7E-07	2,2E-03	0,43	0,50	0,04	0,40	0,97	0,72	0,08	0,74	0,82	0,81	0,20	0,90
671nm	2,3E-03	5,0E-03	3,5E-05	2,9E-05	0,30	1,1E-04	4,5E-04	2,8E-04	1,1E-05	2,1E-09	4,3E-07	0,21	0,96	0,41	0,56	0,27	0,73	0,99	0,17	0,84	0,39	0,54	0,06	0,60
681nm	1,9E-03	7,4E-03	1,1E-05	2,0E-06	0,84	1,3E-05	3,9E-04	5,2E-04	2,3E-05	3,6E-09	2,7E-06	0,23	0,87	0,43	0,37	0,16	0,26	0,69	0,18	0,83	0,38	0,48	0,11	0,55
701nm	1,2E-05	1,5E-04	7,2E-10	1,7E-06	0,82	4,8E-06	1,7E-07	3,4E-06	1,9E-08	4,1E-11	5,9E-05	1,9E-03	0,60	0,73	0,11	0,90	0,45	0,38	0,32	0,74	0,06	0,44	0,21	0,88
752nm	1,4E-03	4,2E-09	5,1E-09	6,4E-09	2,2E-04	0,19	2,0E-08	2,9E-14	7,2E-04	1,0E-05	0,05	7,0E-03	0,05	0,71	0,12	0,06	0,26	0,62	0,97	0,88	0,83	0,76	0,69	0,48

854nm	1,9E -04	1,9E -08	3,4E -10	1,7E -08	4,3E -04	0,11	1,0E -09	7,7E -16	1,3E -05	1,9E -07	7,4E -03	4,4E -04	0,16	0,79	0,09	0,11	0,37	0,68	0,95	0,36	0,77	0,51	0,88	0,63
864nm	2,4E -04	2,1E -08	2,6E -10	9,8E -09	2,2E -04	0,13	2,7E -09	4,9E -16	6,5E -06	1,4E -07	5,7E -03	5,1E -04	0,12	0,83	0,10	0,08	0,31	0,67	0,79	0,55	0,68	0,51	0,83	0,55
1245nm	4,8E -11	3,6E -08	6,2E -13	1,6E -14	1,4E -05	1,4E -04	1,9E -13	2,8E -13	1,0E -15	4,4E -12	4,9E -10	1,7E -06	0,05	0,39	0,08	0,02	0,55	0,65	0,23	0,71	0,08	0,31	0,12	0,64



Figura 6 – Magnitude do efeito da geometria de iluminação sobre os valores reamostrados das bandas para as seis fisionomias durante as estações chuvosa (fevereiro) e seca (agosto), antes e após a correção. Valores abaixo da linha amarela ($< 0,1$) indicam efeito nulo, entre as linhas amarelo e vermelho ($0,1 - 0,3$) efeito pequeno, entre as linhas vermelho e vermelho escuro ($0,3 - 0,5$) efeito moderado e acima da linha vermelho escuro ($> 0,5$) efeito grande. CT = Cerrado Típico, CD = Cerrado Denso, CER = Cerradão, FED = Floresta Estacional Decidual, FES = Floresta Estacional Semidecidual, MG = Mata de Galeria.

A partir da Figura 7 podemos relacionar ainda o efeito do aspecto (e da declividade indiretamente com base na Figura 2) sobre as diferenças relativas entre os pixels não corrigidos e corrigidos. Quanto maior a declividade, maior poderá ser a amplitude entre os valores do $\cos(i)$ e do $\cos(\theta_z)$, o que resulta em uma maior diferença relativa (em módulo) na reflectância dos dados após a correção. Isso ocorre tanto para a classe sombreada quanto para a classe iluminada, sendo que na classe sombreada as diferenças relativas possuem valores positivos e na classe iluminada possuem valores negativos. Essa diferença entre os valores positivos e negativos das diferenças relativas acontece de forma homogênea entre as classes de iluminação, pois todas as bandas possuem correlação positiva entre os valores de reflectância e o $\cos(i)$ (regressão com linha de tendência positiva). Podemos observar ainda que, para as duas datas, os pixels com o aspecto (face de exposição) na mesma angulação do azimute solar (ϕ), irão apresentar as maiores variações relativas na classe iluminada, e os pixels com o aspecto oposto ao azimute solar ($\phi + 180^\circ$), irão apresentar as maiores variações relativas na classe sombreada após a correção.

3.3 Sensibilidade dos índices hiperespectrais aos efeitos topográficos

Para verificar o efeito da geometria de iluminação, os índices gerados com os dados espectrais antes e após a correção topográfica foram relacionados com o $\cos(i)$ por meio de regressão linear. Para os índices não corrigidos, a significância dos p-valores das regressões variou com a fisionomia e a data sem nenhum padrão definido, exceto na Floresta Estacional Semidecidual e no cerradão em agosto, onde todos os índices tiveram os p-valores das regressões significativos ($< 0,01$). Após a correção, os p-valores significativos das regressões iniciais foram não significativos ($> 0,01$) em todas as fisionomias e datas, exceto para o índice SR na Floresta Estacional Semidecidual em agosto, o qual teve o p-valor aumentado, mas ainda se manteve significativo (p-valor = 0,0008) (Apêndice B). O índice EVI foi o que teve as regressões com p-valores significativos em mais fisionomias antes da correção, seguido pelos índices NDWI, ARI,

PRI e PSRI. Os índices biofísicos NDVI e SAVI foram os menos influenciados pelo cos
(i) antes da correção, seguido pelo índice SR.

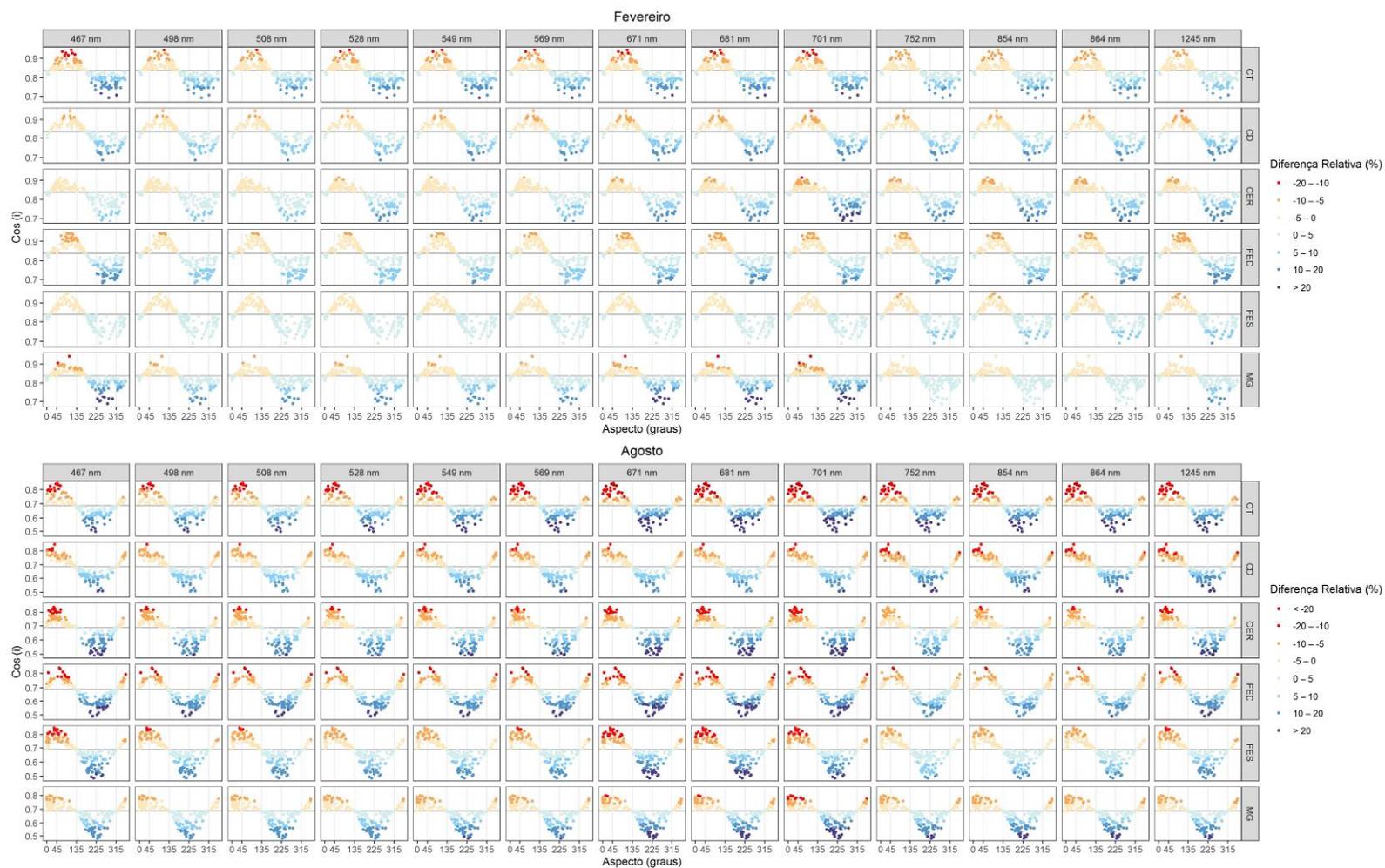


Figura 7 - Distribuição dos valores do $\text{Cos}(i)$ ao longo das faces de exposição (aspecto) para as bandas nas seis fisionomias durante as estações chuvosa (fevereiro) e seca (agosto). As diferentes cores dos pontos representam as amplitudes de diferenças relativas (%) entre os pixels não-corrigidos e corrigidos.

CT = Cerrado Típico, CD = Cerrado Denso, CER = Cerradão, FED = Floresta Estacional Decidual, FES = Floresta Estacional Semidecidual, MG = Mata de Galeria.

O teste de Wilcoxon entre as classes sombreada e iluminada, realizado sobre os índices com os dados reamostrados, mostrou resultados semelhantes aos das regressões entre o cos (i) e os índices antes e após a correção (Tabela 4). Antes da correção, o índice que apresentou diferenças significativas (p -valor $< 0,01$) em mais fisionomias nas duas datas foi o ARI, seguido por EVI, NDWI e PSRI. Os índices NDVI, SAVI e SR foram os que apresentaram diferenças significativas em menos fisionomias e datas, apenas na Mata de Galeria em fevereiro e na Floresta Estacional Semidecidual em agosto. Após a correção, todos os índices tiveram p -valor não significativo ($> 0,01$), exceto o NDWI no cerrado típico em fevereiro (p -valor = 0,002). Alguns índices, assim como nas bandas, tiveram o p -valor das regressões diminuído após a correção.

O coeficiente r de Cohen (Figura 8) mostrou que os efeitos das classes de iluminação diminuíram após a correção para a maioria dos índices. Alguns índices entre as fisionomias e datas tiveram o coeficiente de Cohen aumentado após a correção, igualmente aos que tiveram os p -valores do teste de Wilcoxon diminuídos também após a correção. Para o intervalo de declividade analisado ($< 15^\circ$), nenhum índice alcançou magnitude de efeito grande ($> 0,5$) antes da correção. Os maiores efeitos foram observados no ARI no Cerrado Típico em agosto, seguido pelo EVI no Cerradão em fevereiro, com magnitude de efeito moderado das classes de iluminação.

As diferenças relativas (%) entre os valores dos índices não-corrigidos e corrigidos, para todos os pixels reamostrados nas fisionomias e datas, alcançaram maiores valores no índice NDWI, seguido pelo PSRI, em ambas as datas (Figura 9). Esses dois índices tiveram as maiores diferenças relativas em fevereiro para a maioria das fisionomias. Os índices biofísicos NDVI, SAVI e SR foram os menos influenciados de uma forma geral, em ambas as datas.

Para a visualização espacial das diferenças relativas dos valores dos índices antes e após a correção, foram calculadas as imagens de alguns dos índices mais afetados para a fisionomia Cerrado Denso e Floresta Estacional Semidecidual nas duas datas (Figuras 10 e 11). A partir das imagens é possível observar que as regiões delimitadas pelos erros relativos positivos e negativos nessas fisionomias são semelhantes para os índices numa mesma data, assim como ocorre nas bandas. As variações nas diferenças relativas (positivas ou negativas) entre as mesmas regiões em diferentes índices numa mesma data

Tabela 4 – P-valores dos testes de Wilcoxon entre as classes sombreada e iluminada para os índices em todas as fisionomias e datas. Em negrito, estão realçadas as diferenças significativas.

	NÃO-CORRIGIDOS												CORRIGIDOS											
	Fevereiro						Agosto						Fevereiro						Agosto					
	CT	CD	CER	FED	FES	MG	CT	CD	CER	FED	FES	MG	CT	CD	CER	FED	FES	MG	CT	CD	CER	FED	FES	MG
SR	0,55	0,96	0,40	0,13	0,07	2,4E-04	0,12	0,30	0,12	0,02	4,2E-03	0,96	0,94	0,52	0,75	0,09	0,38	0,46	0,07	0,94	0,63	0,75	0,10	0,97
NDVI	0,55	0,96	0,40	0,13	0,07	2,4E-04	0,12	0,30	0,12	0,02	4,2E-03	0,96	0,94	0,52	0,75	0,09	0,38	0,46	0,07	0,94	0,63	0,75	0,10	0,97
SAVI	0,61	0,85	0,27	0,07	0,04	3,8E-04	0,11	0,26	0,15	0,02	5,5E-03	0,99	0,92	0,51	0,70	0,08	0,36	0,43	0,07	0,95	0,65	0,73	0,11	0,99
EVI	0,13	7,0E-05	3,2E-07	9,6E-07	9,7E-04	0,91	2,1E-03	2,3E-05	0,13	0,70	0,92	0,38	0,42	0,47	0,16	0,11	0,38	0,91	0,17	0,87	0,69	0,67	0,32	0,49
ARII	1,4E-04	0,12	4,4E-05	0,03	0,57	1,4E-04	1,9E-08	0,25	2,3E-04	4,1E-07	3,7E-03	0,02	0,02	0,92	0,57	0,25	0,66	0,32	0,20	0,32	0,03	0,04	0,14	0,48
CRI	0,87	0,04	1,4E-03	0,94	0,46	0,03	0,18	2,0E-05	0,86	8,7E-04	1,4E-03	0,81	0,15	0,34	0,72	0,55	0,44	0,51	0,06	0,74	0,04	0,58	0,49	0,51
NDWI	0,09	0,09	0,25	8,1E-03	0,75	2,3E-04	0,56	0,88	3,1E-03	2,8E-03	1,0E-03	0,91	2,1E-03	0,58	0,43	0,78	0,35	0,82	0,44	0,24	0,16	0,41	0,09	0,75
PRI	0,88	0,10	0,04	0,98	0,16	0,16	6,5E-05	3,3E-03	0,15	0,76	5,7E-03	0,21	0,56	0,15	0,52	0,24	0,95	0,74	0,27	0,51	0,98	0,38	0,30	0,71
PSRI	0,04	0,84	0,02	2,9E-03	0,89	4,8E-03	0,04	0,66	3,3E-03	4,3E-05	2,4E-04	0,25	0,29	0,21	0,81	0,37	0,28	0,60	0,33	0,87	0,18	0,47	0,04	0,77



Figura 8 - Magnitude do efeito da geometria de iluminação sobre os valores reamostrados dos índices para as seis fisionomias durante as estações chuvosa (fevereiro) e seca (agosto), antes e após a correção. Valores abaixo da linha amarela ($< 0,1$) indicam efeito nulo, entre as linhas amarelo e vermelho ($0,1 - 0,3$) efeito pequeno, entre as linhas vermelho e vermelho escuro ($0,3 - 0,5$) efeito moderado e acima da linha vermelho escuro ($> 0,5$) efeito grande. CT = Cerrado Típico, CD = Cerrado Denso, CER = Cerradão, FED = Floresta Estacional Decidual, FES = Floresta Estacional Semidecidual, MG = Mata de Galeria.

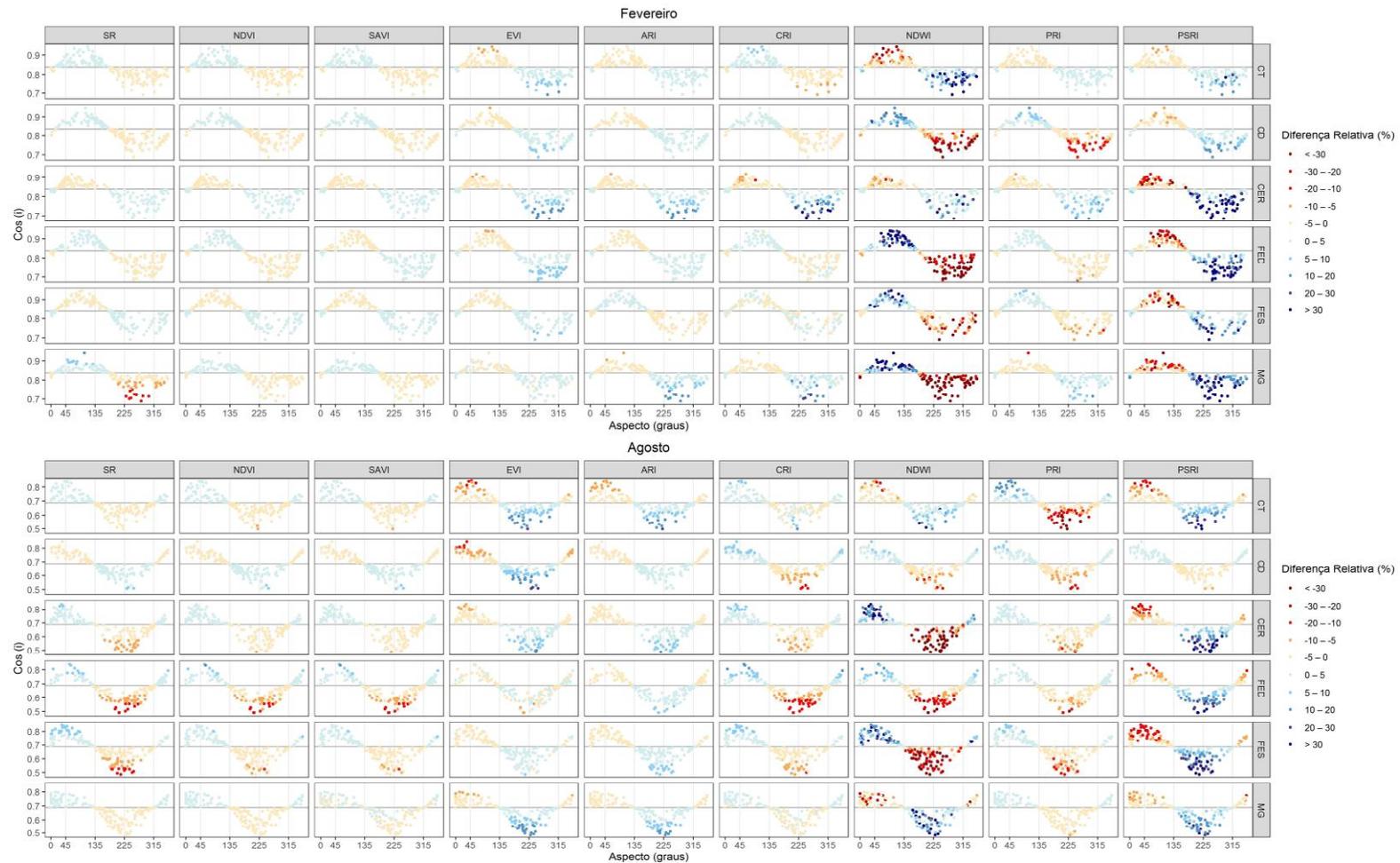
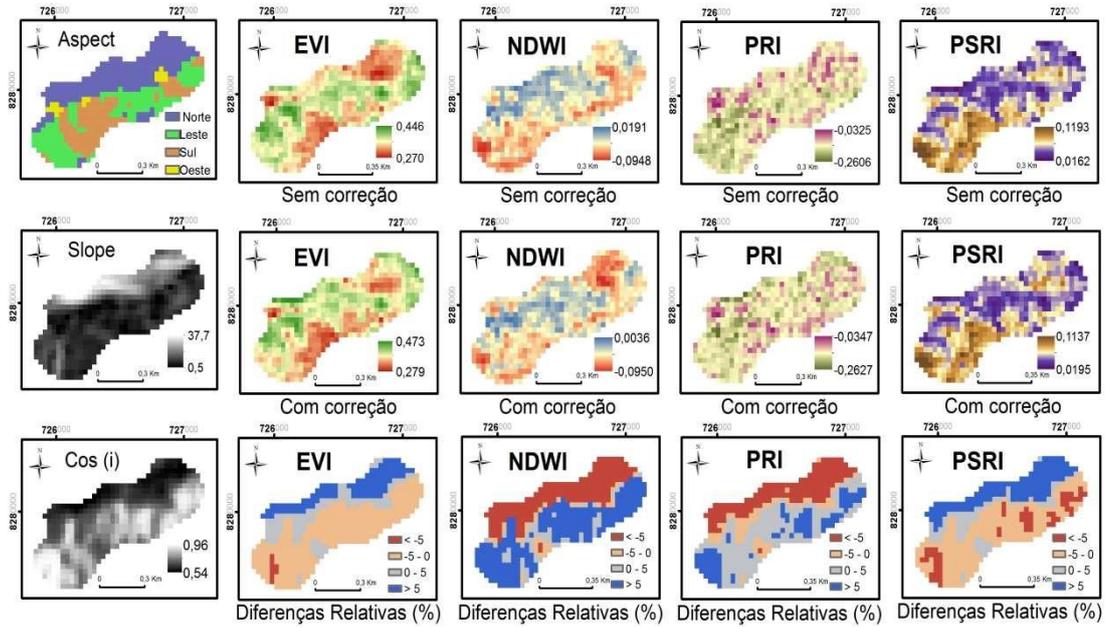


Figura 9 - Distribuição dos valores do Cos (i) ao longo das faces de exposição (aspecto) para os índices nas seis fisionomias durante as estações chuvosa (fevereiro) e seca (agosto). As diferentes cores dos pontos representam as amplitudes de diferenças relativas (%) entre os pixels não-corrigidos e corrigidos. CT = Cerrado Típico, CD = Cerrado Denso, CER = Cerradão, FED = Floresta Estacional Decidual, FES = Floresta Estacional Semidecidual, MG = Mata de Galeria.

Cerrado Denso - Estação chuvosa



Cerrado Denso - Estação seca

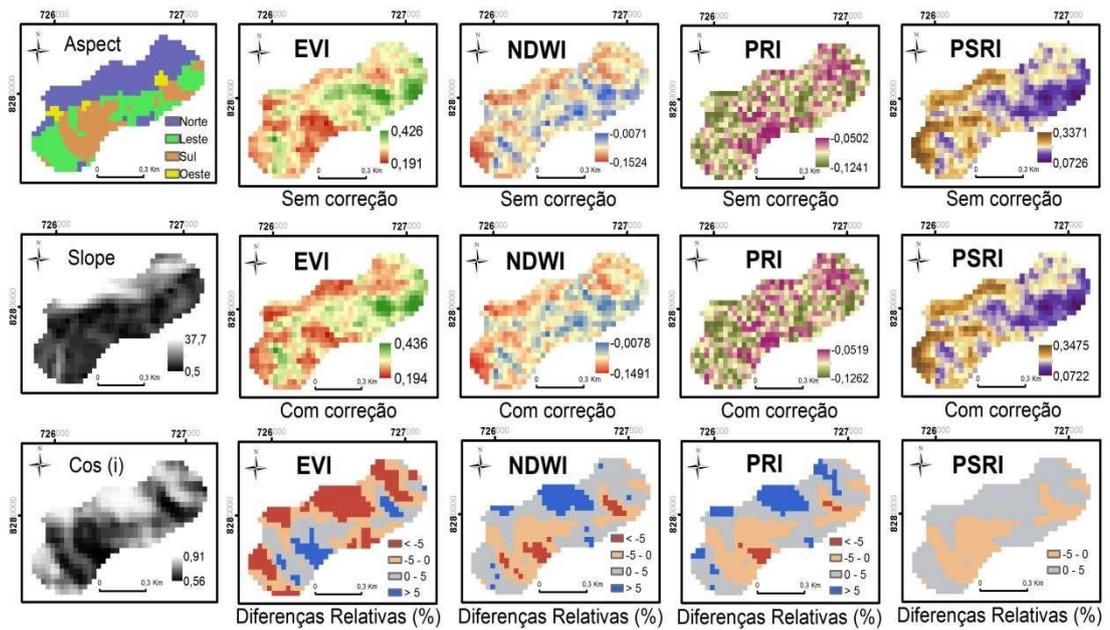
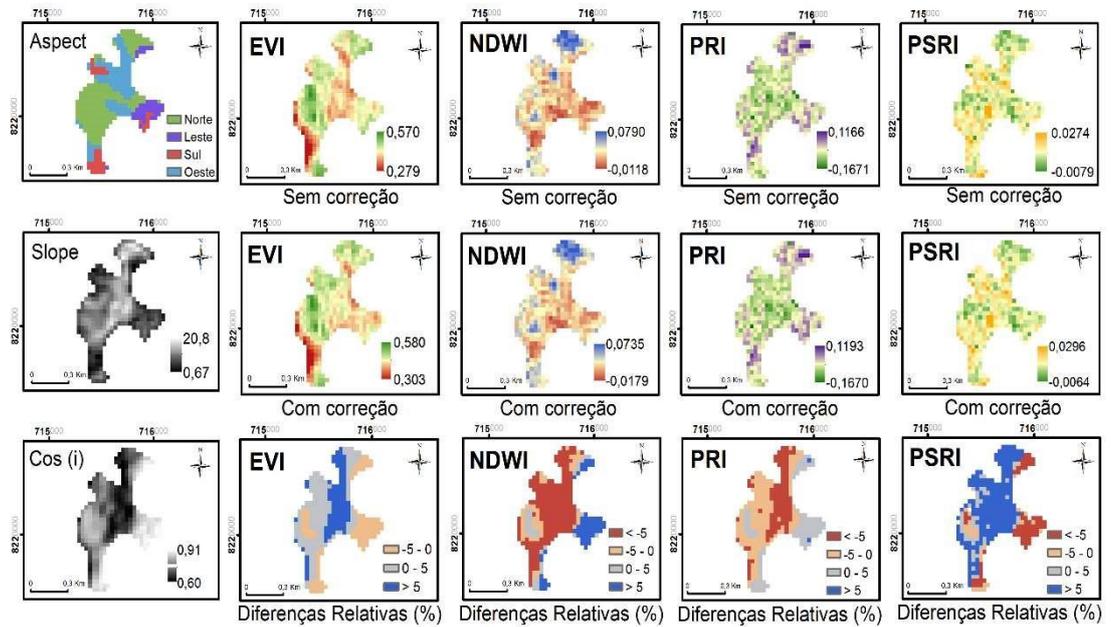


Figura 10 – Índices EVI, NDWI, PRI e PSRI corrigidos e não-corrigidos, e suas respectivas diferenças relativas em porcentagem para um fragmento de Cerrado Denso durante as estações chuvosa (fevereiro) e seca (agosto).

Floresta Estacional Semidecidual - Estação chuvosa



Floresta Estacional Semidecidual - Estação seca

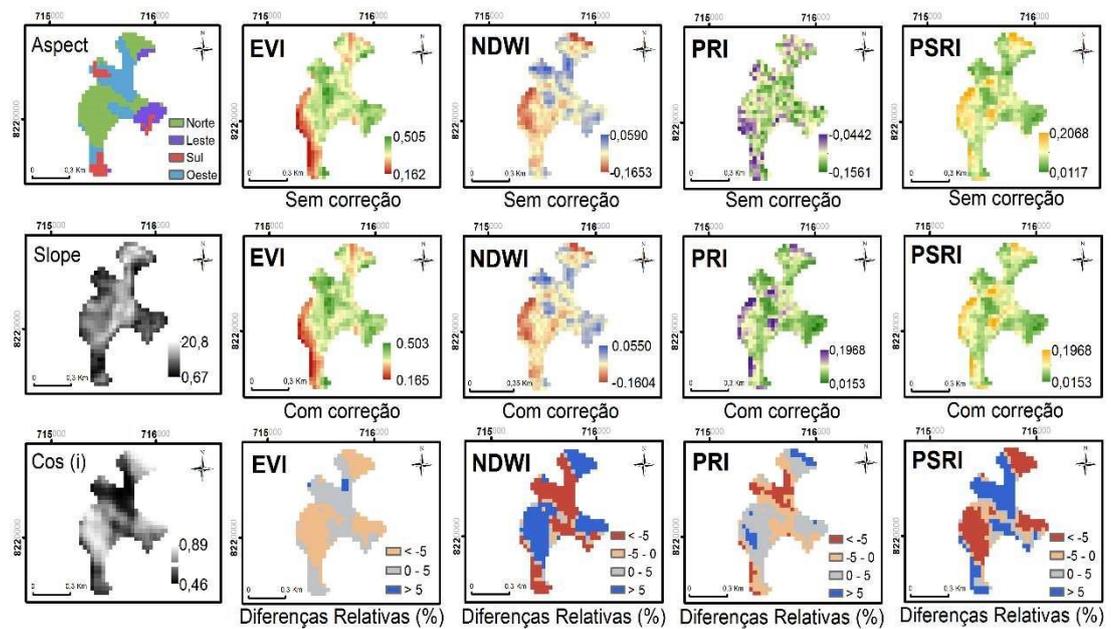


Figura 11 – Índices EVI, NDWI, PRI e PSRI corrigidos e não-corrigidos, e suas respectivas diferenças relativas em porcentagem para um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual durante as estações chuvosa (fevereiro) e seca (agosto).

advém das diferenças entre as linhas de tendências das regressões entre os valores dos índices e o cos (i) (crescentes ou decrescentes) para cada caso.

3.4 Efeito da correção topográfica na análise fenológica dos dados

Observando os valores dos índices antes e após a correção para cada fisionomia nas duas datas (Figura 12), vemos que esses valores apresentam diferenças sazonais em diferentes intensidades para cada fisionomia e índice. O teste de wilcoxon foi aplicado para verificar o efeito sazonal sobre os índices em cada fisionomia, antes e após a correção topográfica (Tabela 5). Foi verificado o aumento ou diminuição dos p-valores dos testes após a correção como forma de avaliar o efeito da correção sobre a sazonalidade dos índices.

Antes da correção, os p-valores dos testes indicaram efeito significativo ($< 0,01$) da sazonalidade para todos os índices, exceto para o PRI no Cerrado Típico (p-valor = 0,281) e para o CRI no Cerradão (p-valor = 0,023). Após a correção, o efeito sazonal foi intensificado para o PRI no Cerrado Típico, porém, ainda se manteve não-significativo (p-valor = 0,198) e passou a ser significativo para o CRI no Cerradão (p-valor = 0,00013). O aumento ou a diminuição dos p-valores dos outros testes após a correção variou com o índice e fisionomia. Para alguns, houve o aumento do p-valor, indicando que os efeitos sazonais nesses índices foram amenizados pela correção topográfica.

Após a correção, para os índices biofísicos (SR, NDVI, SAVI e EVI), as maiores diferenças sazonais ocorreram na Floresta Estacional Decidual (menores p-valores do teste de Wilcoxon), indicando alta influência da caducifolia dessa fisionomia em sua resposta espectral. As médias dos valores desses índices foram maiores durante a estação chuvosa, para todas as fisionomias. Seus valores foram maiores nas fisionomias florestais (Cerradão, Floresta Estacional Decidual, Floresta Estacional Semidecidual e Mata de Galeria) comparados às savânicas (Cerrado Típico e Cerrado Denso) durante a estação chuvosa. Durante a estação seca, os valores continuaram maiores para as fisionomias florestais, exceto a Floresta Estacional Decidual, que teve seus valores semelhantes as fisionomias savânicas. Para os índices bioquímicos ARI e NDWI, observamos que a Floresta Estacional Decidual também obteve as maiores diferenças sazonais. Para o índice CRI houve o mesmo comportamento, porém em menor intensidade. Comparando os valores desses índices entre as fisionomias savânicas e florestais nas duas datas, observamos um comportamento semelhante ao dos índices biofísicos anteriormente

citados, com valores mais altos para as fisionomias florestais. Os índices fisiológicos PRI e PSRI também apresentaram maiores variações sazonais na Floresta Estacional Decidual. Porém, o comportamento sazonal do índice PRI na Floresta Estacional Decidual foi o oposto do observado nas demais fisionomias, apresentando valores maiores durante a estação seca comparado à chuvosa.

De uma forma geral, os índices que apresentaram menores variações sazonais (maiores p-valores do teste de Wilcoxon) nas fisionomias após a correção topográfica foram o PRI, NDWI e CRI, sucessivamente, e os que apresentaram maiores variações foram os índices biofísicos SR, NDVI e SAVI.

4 DISCUSSÃO

Nesse estudo, comprovamos e avaliamos o efeito da geometria de iluminação do terreno sobre dados hiperespectrais orbitais para seis fisionomias do bioma Cerrado, em áreas de relevo acentuado, durante dois períodos sazonais (estações chuvosa e seca). A influência das classes de iluminação sobre os dados variou de acordo com a fisionomia e data. Pudemos observar a necessidade de correção topográfica em ambas as datas para correta utilização de dados hiperespectrais no monitoramento sazonal de diferentes fisionomias do Cerrado em áreas declivosas.

As bandas mais influenciadas pela geometria de iluminação do terreno entre as fisionomias e datas, de uma forma geral, foram as do SWIR, NIR e verde. Em agosto os efeitos foram mais intensos do que em fevereiro na maioria das fisionomias e bandas e tal diferença pode ser explicada pelas diferenças no ângulo zenital solar em cada data (Fevereiro = $33,1^\circ$, Agosto = $46,5^\circ$). Quanto maior o ângulo zenital solar, mais intensos serão os efeitos topográficos em terrenos declivosos (HAO et al., 2018). Essa mesma tendência foi mostrada por Galvão et al. (2016) no sul do Brasil, onde foi observado um aumento do efeito de iluminação do terreno do verão para inverno, com o aumento do ângulo zenital solar.

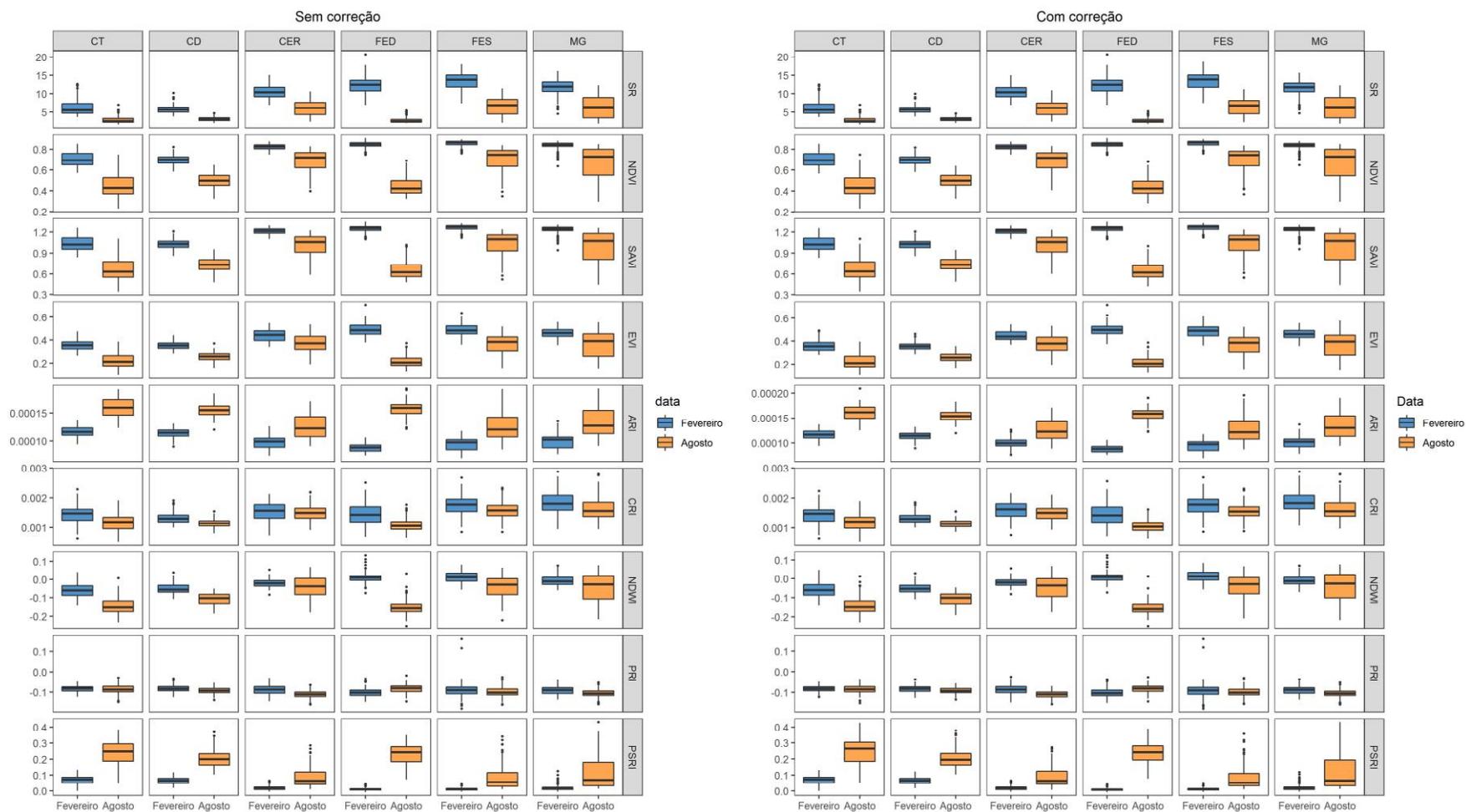


Figura 12 – Boxplot dos valores dos índices hiperespectrais nas estações chuvosa (fevereiro) e seca (agosto), em todas as fisionomias, antes e após a correção topográfica. CT = Cerrado Típico, CD = Cerrado Denso, CER = Cerradão, FED = Floresta Estacional Decidual, FES = Floresta Estacional Semidecidual, MG = Mata de Galeria.

Tabela 5 – P-valores dos testes de Wilcoxon entre as duas datas para os índices em todas as fisionomias, antes e após a correção topográfica . Em negrito, estão realçadas as diferenças significativas.

	NÃO-CORRIGIDOS						CORRIGIDOS					
	CT	CD	CER	FED	FES	MG	CT	CD	CER	FED	FES	MG
SR	2,58E-50	1,66E-54	6,16E-44	6,03E-55	4,82E-51	6,69E-40	3,31E-50	1,72E-54	4,60E-45	6,03E-55	2,41E-51	1,18E-38
NDVI	2,58E-50	1,66E-54	6,16E-44	6,03E-55	4,82E-51	6,69E-40	3,31E-50	1,72E-54	4,60E-45	6,03E-55	2,41E-51	1,18E-38
SAVI	2,87E-50	1,82E-54	4,59E-43	6,03E-55	9,62E-51	2,51E-39	3,74E-50	1,75E-54	2,71E-44	6,03E-55	4,49E-51	4,60E-38
EVI	1,09E-45	1,33E-48	2,04E-16	6,03E-55	1,82E-34	3,42E-19	4,34E-46	5,86E-51	2,63E-18	6,38E-55	5,35E-35	1,87E-18
ARII	5,55E-54	1,13E-54	1,98E-28	6,03E-55	8,37E-37	9,72E-35	2,07E-54	1,28E-54	9,66E-31	6,03E-55	1,39E-38	7,70E-35
CRI	8,64E-15	2,42E-20	0,023	1,76E-24	1,53E-07	3,20E-08	1,09E-13	1,70E-22	1,30E-04	5,70E-27	2,57E-08	3,64E-10
NDWI	3,11E-40	1,35E-39	2,29E-03	1,03E-53	2,47E-15	9,76E-05	2,17E-40	3,08E-39	2,20E-04	3,39E-54	7,68E-17	1,88E-03
PRI	0,281	8,89E-06	7,99E-17	3,37E-17	3,00E-03	5,56E-10	0,198	1,56E-05	1,96E-20	4,31E-17	1,60E-03	3,96E-12
PSRI	1,02E-51	7,25E-55	6,80E-40	6,03E-55	2,02E-47	1,47E-38	4,11E-52	8,56E-55	6,70E-42	6,03E-55	6,56E-49	7,37E-38

Antes da correção, o índice EVI foi o que teve efeito significativo para a geometria de iluminação (regressões com p-valores $< 0,01$) em mais fisionomias e datas, seguido pelos índices NDWI, ARI, PRI e PSRI. O teste de Wilcoxon e o coeficiente de Cohen apresentaram resultados semelhantes, porém, como eles foram realizados apenas onde a declividade era menor que 15° , o método da regressão foi mais sensível para detectar a influência da geometria de iluminação como um todo. O coeficiente de Cohen indicou maiores efeitos da geometria de iluminação para os índices EVI em fevereiro e ARI em agosto.

O EVI é um índice desenvolvido inicialmente para o sensor MODIS de forma complementar ao NDVI (HUETE et al., 2002), sendo que o NDVI é mais sensível ao conteúdo de clorofilas e o EVI tem relação com os atributos estruturais, como o índice de área foliar e arquitetura do dossel. Dentre os índices biofísicos, vários estudos indicam o EVI como altamente anisotrópico (MATSUSHITA et al., 2007; GALVÃO et al., 2013; EMRAN et al., 2018; CHEN et al. 2020), isso pode ser explicado pela alta dependência desse índice com a banda do infravermelho próximo (NIR) (GALVÃO et al., 2016). O fato do EVI ter sido considerado mais influenciado pelas classes de iluminação durante a estação chuvosa do que na seca, para algumas fisionomias, pode ter relação com a quantidade de material fotossinteticamente ativo presente nessas fisionomias nesse período, principalmente na Floresta Estacional Decidual e Floresta Estacional Semidecidual.

O NDWI é um índice relacionado ao conteúdo de água foliar presente na vegetação (GAO, 1996). Ele utiliza uma banda do NIR (854nm) e uma do SWIR (1245nm), esta última centrada em uma das feições de absorção por água, o que faz com que esse índice seja sensível às variações do conteúdo hídrico de um dossel (GAO & GOETZ, 1994), permitindo o monitoramento dos períodos de secas na vegetação ao longo do tempo (JACKSON et al., 2004; GU et al., 2007; WANG et al., 2011; ZHANG et al., 2011). Os efeitos topográficos sobre o NDWI ainda não foram amplamente investigados. De uma forma geral, estudos abordando os efeitos topográficos sobre índices hiperespectrais ainda são escassos na literatura. Galvão et al. (2013) confirmaram a sensibilidade do NDWI aos efeitos topográficos sobre uma floresta semidecídua na Amazônia utilizando também o sensor Hyperion.

O ARI foi desenvolvido para estimar o conteúdo de antocianina presente em folhas senescentes e sob algum estresse, ele utiliza uma banda do verde (550nm) centrada na feição de absorção das antocianinas e uma banda no NIR para balancear o efeito de absorção por clorofilas também na faixa do verde (GITELSON et al. 2001). Em um estudo que avaliou a sensibilidade de certos índices aos efeitos de iluminação e visada utilizando o Compact High Resolution Imaging Spectrometer (CHRIS/PROBA) sobre uma floresta de Pinus e uma formação campestre na Suíça, Verrelst et al. (2008) encontraram o ARI como um dos índices mais afetados, juntamente com o PRI.

O índice PRI é um índice relacionado a eficiência do uso da radiação pela fotossíntese, por sua relação com o ciclo das xantofilas (GAMON et al., 1997). A partir dele é possível também estimar o sequestro de carbono realizado pela vegetação (GARBUSKY et al, 2011, FILELLA et al., 2004). A alta sensibilidade desse índice aos efeitos topográficos foi reportada por Petri & Galvão (2019) e por Galvão et al. (2013), durante a estação seca na Amazônia, utilizando os sensores MODIS e Hyperion, respectivamente. De Oliveira et al. (2019) em um estudo similar com uma imagem Hyperion de um fragmento de Mata Atlântica concluiu que os índices ARI, EVI e PRI foram os mais sensíveis aos efeitos topográficos, o que tem relação com os resultados observados nesse trabalho.

O índice PSRI está relacionado com a taxa entre o conteúdo de carotenoides e clorofilas presentes na vegetação, sendo usado como uma medida indireta de senescência foliar (MERZLYAK et al., 1999). Assim como o NDWI, o PSRI não foi amplamente estudado em relação aos efeitos topográficos. No trabalho de De Oliveira et al. (2019), o PSRI sofreu efeito da geometria de iluminação, porém não foi considerado entre os índices mais afetados, como observado no presente estudo para as fisionomias de Cerrado.

Nesse estudo, os índices biofísicos NDVI e SAVI foram os menos influenciados pelo cos (i) antes da correção, seguido pelo índice SR. As diferenças relativas (%) entre os valores não-corrigidos e corrigidos topograficamente foram maiores para os índices NDWI e PSRI, em ambas as datas. Contudo, isso pode estar relacionado ao intervalo de amplitude dos valores desses índices (e das bandas que os constituem) observados para as fisionomias além da própria fórmula do índice, que fazem com que as diferenças relativas sejam extrapoladas quando os índices tendem a certos valores. No caso do PSRI, aqui analisado, as diferenças relativas são extrapoladas quando os valores do índice tendem a zero. Os índices biofísicos NDVI, SAVI e SR foram os que apresentaram

menores diferenças relativas entre os valores dos pixels antes e após a correção, de uma forma geral, em ambas as datas.

Sendo esse um estudo preparatório para as novas missões hiperespectrais orbitais, enfatiza-se que os índices de vegetação EVI, NDWI, ARI, PRI e PSRI sofrem influência dos efeitos topográficos nas fisionomias do Cerrado ao longo do ano, mesmo em locais onde a declividade não é tão acentuada. Considerando o monitoramento desse ecossistema a partir desses índices, a correção topográfica das imagens é altamente recomendada. É necessário ainda analisar a efetividade de outros métodos de correção topográfica sobre os dados hiperespectrais, bem como a influência de diferentes ângulos de visada dos sensores durante a aquisição das imagens.

5 CONCLUSÃO

No geral, todas as bandas e todos os índices analisados sofreram alguma influência da geometria de iluminação, mesmo que mínima para alguns casos. A correção topográfica diminuiu as diferenças entre os valores das bandas e dos índices nos locais sombreados e iluminados, onde havia efeito significativo da geometria de iluminação. As bandas mais afetadas, no geral, foram as do SWIR, NIR e verde, e os maiores efeitos foram observados em agosto comparados a fevereiro. Os índices EVI, NDWI, ARI, PRI e PSRI, nessa ordem, foram influenciados significativamente pela geometria de iluminação em mais fitofisionomias do Cerrado nas duas datas. O teste de Cohen indicou maiores efeitos da iluminação do terreno no índice EVI em fevereiro e ARI em agosto entre as fisionomias. Os índices que foram influenciados em menos fisionomias e também menos afetados pela correção topográfica foram os índices biofísicos NDVI e SAVI, seguidos pelo SR. A variação sazonal dos índices para as fisionomias também foi influenciada pela correção topográfica. Contudo, foi observado que tanto o efeito das classes de iluminação do terreno como o da correção topográfica variam entre as diferentes fisionomias do bioma e período de aquisição das imagens. Assim, a correção topográfica é um pré-processamento indicado para monitoramento fenológico e funcional das fitofisionomias de Cerrado em áreas declivosas a partir de dados hiperespectrais.

6 APÊNDICES

Apêndice A - P-valores das regressões entre as bandas e o cos (i) antes e após a correção nas seis fisionomias para fevereiro e agosto. Em negrito, estão realçadas as diferenças significativas. CT = Cerrado Típico, CD = Cerrado Denso, CER = Cerradão, FED = Floresta Estacional Decidual, FES = Floresta Estacional Semidecidual, MG = Mata de Galeria.

	Fevereiro						Agosto					
	CT	CD	CER	FED	FES	MG	CT	CD	CER	FED	FES	MG
NÃO-CORRIGIDOS												
b12	1.4e-12	2.3e-13	3.8e-09	4.6e-15	1.1e-05	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	0.00029	2.2e-16	8.4e-06	0.0122
b15	8.9e-13	2.2e-16	8.3e-13	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	0.0279	2.2e-16	2.8e-05	0.0119
b16	4.1e-14	2.2e-16	1.5e-13	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	0.00657	2.2e-16	0.00013	0.00128
b18	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	0.00023	2.2e-16	3.6e-05	6.9e-06
b20	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	1.3e-07	2.2e-16	7.3e-05	1.5e-08
b22	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	7.8e-10	2.2e-16	0.00098	1.6e-06
b32	1.1e-11	2.2e-16	1.2e-11	6.9e-11	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	1.8e-07	2.2e-16	0.00017	0.0134
b33	2.8e-11	2.2e-16	4.2e-11	3.9e-10	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	5.7e-07	2.2e-16	0.00019	0.0232
b35	2.2e-16	2.2e-16	4.2e-15	1.6e-15	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	0.00737	2.2e-16	2.4e-07	1.4e-05
b40	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	0.199	1.4e-09
b50	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	0.0458	2.3e-13
b51	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	0.0693	2.9e-13
b110	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.8e-08	8.6e-16
CORRIGIDOS												
	CT	CD	CER	FED	FES	MG	CT	CD	CER	FED	FES	MG
b12	0.8254	0.8476	0.9669	0.8912	0.9952	0.6783	0.6599	0.8689	0.9557	0.1451	0.8961	0.9004
b15	0.8725	0.8095	0.9564	0.8725	0.9857	0.8261	0.7551	0.898	0.9964	0.2833	0.8661	0.8996
b16	0.831	0.8025	0.9917	0.911	0.998	0.8085	0.7839	0.8605	0.9934	0.3918	0.8919	0.8667
b18	0.6863	0.8171	0.9775	0.9332	0.9581	0.8285	0.933	0.8481	0.9959	0.8318	0.8612	0.8768
b20	0.6699	0.8082	0.9862	0.9538	0.9982	0.7728	0.8944	0.8059	0.9944	0.8878	0.89	0.8757
b22	0.7282	0.837	0.9707	0.9058	0.945	0.764	0.7284	0.7088	0.9968	0.9912	0.8968	0.8719
b32	0.8554	0.5401	0.9427	0.8965	0.887	0.8764	0.7339	0.8041	0.9798	0.0457	0.8097	0.809
b33	0.8718	0.562	0.9446	0.8996	0.8669	0.8506	0.7911	0.843	0.9798	0.0026	0.7983	0.8022
b35	0.6977	0.4891	0.9216	0.9419	0.6986	0.6064	0.8354	0.8073	0.9771	0.2096	0.7264	0.7556
b40	0.7823	0.6584	0.9159	0.7206	0.8963	0.9698	0.7348	0.7515	0.6482	0.2703	0.9833	0.8219
b50	0.8082	0.7189	0.9082	0.7247	0.9263	0.9082	0.6653	0.8012	0.6359	0.2813	0.9721	0.8369
b51	0.8217	0.7058	0.8991	0.7484	0.94	0.9134	0.6642	0.7778	0.6317	0.2751	0.9746	0.8359
b110	0.8349	0.5512	0.9474	0.9555	0.9499	0.847	0.6629	0.5626	0.6766	0.851	0.9539	0.9931

Apêndice B - P-valores das regressões entre os índices e o cos (i) antes e após a correção nas seis fisionomias para fevereiro e agosto. Em negrito, estão realçadas as diferenças significativas. CT = Cerrado Típico, CD = Cerrado Denso, CER = Cerradão, FED = Floresta Estacional Decidual, FES = Floresta Estacional Semidecidual, MG = Mata de Galeria.

	Fevereiro						Agosto					
	CT	CD	CER	FED	FES	MG	CT	CD	CER	FED	FES	MG
	NÃO-CORRIGIDOS											
SR	0.0208	0.2098	0.00543	0.2924	2.2e-16	0.00016	0.540	0.0764	2.9e-05	6.8e-08	1.2e-09	0.1264
NDVI	0.282	0.227	0.186	0.4061	2.2e-16	0.00088	0.701	0.0318	5.3e-05	3.7e-05	1.5e-15	0.9592
SAVI	0.398	0.3551	0.0274	0.888	2.2e-16	0.00116	0.553	0.0201	0.00032	8.7e-07	1.5e-13	0.8834
EVI	3.0e-10	4.7e-11	2.2e-16	2.2e-16	0.217	0.695	2.3e-10	7.6e-16	1.3e-15	2.2e-16	9.0e-08	0.00272
ARII	0.00016	0.00475	2.2e-16	0.00025	2.2e-16	2.9e-08	2.2e-16	0.671	6.2e-16	0.277	2.2e-16	0.0156
CRI	0.00021	0.0135	2.2e-16	0.01514	2.2e-16	0.00836	0.0536	7.2e-13	6.7e-09	0.656	2.2e-16	0.4018
NDWI	0.00051	2.0e-07	0.4904	2.2e-16	2.2e-16	5.4e-09	0.00030	0.148	1.8e-14	5.0e-05	2.2e-16	0.3821
PRI	0.205	2.8e-08	7.7e-10	9.0e-06	4.7e-10	0.0174	2.2e-16	5.9e-05	8.1e-08	1.6e-09	2.2e-16	0.1206
PSRI	0.0749	0.00695	5.7e-10	4.2e-14	2.2e-16	0.00886	1.4e-08	0.109	2.1e-09	1.7e-05	2.2e-16	0.1945
	CORRIGIDOS											
	CT	CD	CER	FED	FES	MG	CT	CD	CER	FED	FES	MG
SR	0.204	0.8998	0.3966	0.6373	0.0638	0.346	0.9004	0.9718	0.7266	0.9727	0.0008	0.095
NDVI	0.8177	0.9197	0.5882	0.7382	0.5341	0.625	0.1897	0.756	0.9624	0.7338	0.0461	0.840
SAVI	0.8257	0.9196	0.5909	0.7465	0.536	0.635	0.1921	0.7523	0.9553	0.7247	0.0444	0.83
EVI	0.8906	0.8943	0.8821	0.7483	0.9364	0.923	0.3772	0.7494	0.9649	0.6638	0.0489	0.656
ARII	0.7438	0.8068	0.6001	0.5908	0.7104	0.445	0.1924	0.9246	0.3875	0.9286	0.0356	0.49
CRI	0.8925	0.7063	0.9948	0.8383	0.3255	0.627	0.4405	0.8933	0.221	0.496	0.1725	0.136
NDWI	0.8692	0.956	0.487	0.9836	0.9213	0.994	0.9955	0.6193	0.9996	0.7502	0.3075	0.974
PRI	0.8866	0.8959	0.8236	0.3671	0.5819	0.858	0.9183	0.8221	0.9976	0.9316	0.1118	0.859
PSRI	0.6926	0.986	0.5056	0.9832	0.1681	0.589	0.0995	0.6622	0.7533	0.8907	0.0488	0.871

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SÁBER, A. N. Domínios morfoclimáticos e províncias fitogeográficas do Brasil. *Orientação*, São Paulo, v. 3, n. 1, p. 45-48, 1967.

BECERRA, J. A. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; ALVALÁ, R. C. S. Relação do padrão sazonal da vegetação com a precipitação na região do cerrado usando índices espectrais de vegetação. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São José dos Campos, v. 24, n. 2, p. 125-134, 2009.

BRIDGEWATER, S.; RATTER, J. A.; RIBEIRO, J. F. Biogeographic patterns, β diversity and dominance in the cerrado biome of Brazil. *Biodiversity & Conservation*, v. 13, n. 12, p. 2295-2317, 2004.

CAMPOS, J. O. & CHAVES, H. M. L. Tendências e Variabilidades nas Séries Históricas de Precipitação Mensal e Anual no Bioma Cerrado no Período 1977-2010. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 35, n. 1, p. 157-169, 2020.

CHANG, Q.; XIAO, X.; JIAO, W.; WU, X.; DOUGHTY, R.; WANG, J.; DU, L.; ZOU, Z.; QIN, Y. Assessing consistency of spring phenology of snow-covered forests as estimated by vegetation indices, gross primary production, and solar-induced chlorophyll fluorescence. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 275, p. 305-316, 2019.

CHEN, R.; YIN, G.; LIU, G.; LI, J.; VERGER, A. Evaluation and Normalization of Topographic Effects on Vegetation Indices. *Remote Sensing*, v. 12, n. 14, p. 2290, 2020.

CHO, M. A.; SKIDMORE, A. K.; SOBHAN, I. Mapping beech (*Fagus sylvatica* L.) forest structure with airborne hyperspectral imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 11, n. 3, p. 201-211, 2009.

COLLI, G. R.; VIEIRA, C. R.; DIANESE, J. C. Biodiversity and conservation of the Cerrado: recent advances and old challenges. *Biodiversity and Conservation* 29, 1465–1475, 2020.

DEBORTOLI, N. S.; DUBREUIL, V.; FUNATSU, B.; DELAHAYE, F.; DE OLIVEIRA, C. H.; RODRIGUES-FILHO, S.; SAITO, C. H.; FETTER, R. Rainfall patterns in the Southern Amazon: a chronological perspective (1971–2010). *Climatic Change*, v. 132, n. 2, p. 251-264, 2015.

DE OLIVEIRA, L. M.; GALVÃO, L. S.; PONZONI, F. J. Topographic effects on the determination of hyperspectral vegetation indices: a case study in southeastern Brazil. *Geocarto International*, p. 1-18, 2019.

DE OLIVEIRA, I. J. Chapadões descerrados: relações entre vegetação, relevo e uso das terras em Goiás. *Boletim Goiano de Geografia*, v. 34, n. 2, p. 311-336, 2014.

EDIRIWEERA, S.; PATHIRANA, S.; DANAHER, T.; NICHOLS, D.; MOFFIET, T. Evaluation of different topographic corrections for Landsat TM data by prediction of foliage projective cover (FPC) in topographically complex landscapes. *Remote Sensing*, v. 5, n. 12, p. 6767-6789, 2013.

EMRAN, A.; ROY, S.; BAGMAR, M. S. H.; MITRA, C. Assessing topographic controls on vegetation characteristics in Chittagong Hill Tracts (CHT) from remotely sensed data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 11, p. 198-208, 2018.

ESPIRITO-SANTO, M. M.; LEITE M. E.; SILVA, J. O.; BARBOSA, R. S.; ROCHA, A. M.; ANAYA, F. C.; DUPIN, M. G. V. Understanding patterns of land-cover change in

the Brazilian Cerrado from 2000 to 2015. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 371, n. 1703, p. 20150435, 2016.

FAN, H.; FU, X.; ZHANG, Z.; WU, Q. Phenology-based vegetation index differencing for mapping of rubber plantations using Landsat OLI data. *Remote Sensing*, v. 7, n. 5, p. 6041-6058, 2015.

FELDE, G. W.; ANDERSON, G. P.; ADLER-GOLDEN, S. M.; MATTHEW, N. W.; BERK, A. Analysis of Hyperion data with the FLAASH atmospheric correction algorithm. In: *INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS)*, 2003, Toulouse. *Proceedings...* Toulouse, pp. 90–92, 2003.

FERREIRA, L. G.; HUETE, A. R. Assessing the seasonal dynamics of the Brazilian Cerrado vegetation through the use of spectral vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, Londres, v. 25, n. 10, p. 1837– 1860, 2004.

FERREIRA, M. E.; FERREIRA, L. G.; HUETE, A. R.; PECCININI, A. A. Análise comparativa dos produtos MODIS Ecologia para o monitoramento biofísico ambiental do bioma Cerrado. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 251-260, 2006.

FILELLA, I.; PEÑUELAS, J.; LLORENS, L.; ESTIARTE, M. Reflectance assessment of seasonal and annual changes in biomass and CO₂ uptake of a Mediterranean shrubland submitted to experimental warming and drought. *Remote Sensing of Environment*, v. 90, n. 3, p. 308-318, 2004.

GALVÃO, L. S.; BREUNIG, F. M.; DOS SANTOS, J. R.; DE 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, p. 291-300, 2013.

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 & Remote Sensing*, v. 53, n. 3, p. 360-381, 2016.

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.; SANTOS, J. R.; BREUNIG, F. M.; MOURA, Y. M. Avaliação da influência da geometria de iluminação e visada na determinação do EVI de florestas tropicais a partir de dados Hyperion/EO-1. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 15., 2011, Curitiba. *Anais...* Curitiba: INPE, 2011. p.8528.

GAO, B. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, v. 58, n. 3, p. 257-266, 1996.

GAO, B. & GOETZ, A. F. H. Extraction of dry leaf spectral features from reflectance spectra of green vegetation. *Remote Sensing of Environment*, v. 47, n. 3, p. 369-374, 1994.

GARBULSKY, M. F.; PEÑUELAS, J.; GAMON, J.; INOUE, Y.; FILELLA, I. The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies: A review and meta-analysis. *Remote Sensing of Environment*, v. 115, n. 2, p. 281-297, 2011.

GITELSON, ANATOLY A.; MERZLYAK, MARK N.; CHIVKUNOVA, O. B. Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. *Photochemistry and Photobiology*, v. 74, n. 1, p. 38-45, 2001.

GU, Y.; BROWN, J. F.; VERDIN, J. P.; WARDLOW, B. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, v. 34, n. 6, 2007.

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.

HAO, D.; WEN, J.; XIAO, Q.; WU, S.; LIN, X.; DOU, B.; YOU, D.; TANG, Y. Simulation and analysis of the topographic effects on snow-free albedo over rugged terrain. *Remote Sensing*, v. 10, n. 2, p. 278, 2018.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, Amsterdã, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X., & FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, Amsterdã, v. 83, n. 1, p. 195-213, 2002.

INSTITUTO HUAH DO PLANALTO CENTRAL. Almanaque Ecomuseu do Cerrado. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2003. 4.4 p.

JACKSON, T. J.; CHEN, D.; COSH, M.; LI, F.; ANDERSON, M.; WALTHALL, C.; DORIASWAMY, P.; HUNT, E. R. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sensing of Environment*, v. 92, n. 4, p. 475-482, 2004.

JACON, A. D.; GALVÃO, L. S.; DOS 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.

KLINK, A.; MACHADO, B. Conservation of the Brazilian cerrado. *Conservation C. R. Biology*, v. 19, n. 3, p. 707-713, 2005

LENZA, E.; PINTO, J. R. R.; PINTO, A. D. S.; MARACAHIPES, L.; BRUZIGUESSI, E. P. Comparação da vegetação arbustivo-arbórea de uma área de cerrado rupestre na Chapada dos Veadeiros, Goiás, e áreas de cerrado sentido restrito do Bioma Cerrado. *Brazilian Journal of Botany*, v. 34, n. 3, p. 247-259, 2011.

LIMA, C.P. O cerrado rupestre no estado de Goiás com base em imagens Landsat ETM+. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

LIMA, J. E. F. W.; DA SILVA, E. M. Estimativa da contribuição hídrica superficial do Cerrado para as grandes regiões hidrográficas brasileiras. In: *Simpósio brasileiro de recursos hídricos*, 17., 2007, São Paulo. Anais... São Paulo: ABRhidro, 2007.

MAEDA, E. E.; MOURA, Y. M.; WAGNER, F.; HILKER, T.; LYAPUSTIN, A. I.; WANG, Y.; CHAVE, J.; MÖTTUS, M.; ARAGÃO, L. E. O. C.; SHIMABUKURO, Y. Consistency of vegetation index seasonality across the Amazon rainforest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 52, p. 42-53, 2016.

MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On a Test of Whether One of Two Random Variables is Stochastically Larger Than the Other. *Annals of Mathematical Statistics*. 1947;18:50–60. MR0022058.

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

MINNAERT, M. The reciprocity principle in lunar photometry. *The Astrophysical Journal*, v. 93, p. 403-410, 1941.

MOTA, S. D. L. L.; PEREIRA, I. M.; MACHADO, E. L. M.; OLIVEIRA, M. L. R. D.; BRUZINGA, J. S.; FARNEZI, M. M. M.; MEIRA JUNIOR, M. S. Influência dos Afloramentos Rochosos sobre a Comunidade Lenhosa no Cerrado stricto sensu. *Floresta e Ambiente*, v. 21, n. 1, p. 8-18, 2014.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; DA FONSECA, G. A.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, Londres, v. 403, n. 6772, p. 853, 2000.

NASA/USGS; National Aeronautics and Space Administration, United States Geological Survey. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 27 out. 2017.

PARK, S. H.; JUNG, H. S.; CHOI, J.; JEON, S. A quantitative method to evaluate the performance of topographic correction models used to improve land cover identification. *Advances in Space Research*, v. 60, n. 7, p. 1488-1503, 2017.

PEARLMAN, J. S.; BARRY, P. S.; SEGAL, C. C.; SHEPANSKI, J.; BEISO, D.; CARMAN, S. L. Hyperion, a space-based imaging spectrometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Piscataway, v. 41, n. 6, p. 1160-1173, 2003.

PETRI, C. A. & GALVÃO, L. S. Sensitivity of seven MODIS vegetation indices to BRDF effects during the Amazonian dry season. *Remote Sensing*, v. 11, n. 14, p. 1650, 2019.

RICHTER, R.; KELLENBERGER, T.; KAUFMANN, H. Comparison of topographic correction methods. *Remote Sensing*, v. 1, n. 3, p. 184-196, 2009.

ROBERTS, Dar A.; ROTH, Keely L.; PERROY, Ryan L. 14 hyperspectral vegetation indices. *Hyperspectral remote sensing of vegetation*, v. 309, 2016.

RODRIGUES, I. Q. Consistência de dados sazonais Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) na caracterização de fitofisionomias do bioma Cerrado. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Viçosa, 2018.

ROUSE JR, J.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: ERTS SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. Proceedings... Washington: NASA, 1973. p.309-317.

SANO, E. E.; FERREIRA, G. E. Monitoramento semidetalhado (escala de 1:250.000) de ocupação de solos do Cerrado: considerações e proposta metodológica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. Anais... Goiânia: INPE, 2005. p. 3309-3316.

SANO, E. E.; FERREIRA, L. G.; ASNER, G. P.; STEINKE, E. T. Spatial and temporal probabilities of obtaining cloud-free Landsat images over the Brazilian tropical savanna. *International Journal of Remote Sensing*, Londres, v. 28, n. 12, p. 2739-2752, 2007.

SEPLAN GO. Zoneamento ecológico econômico da área do entorno do Distrito Federal. Goiânia: Secretaria de Planejamento e Coordenação. 216p, 1995.

- SESNIE, S. E.; DICKSON, B. G.; ROSENSTOCK, S. S.; RUNDALL, J. M. A comparison of Landsat TM and MODIS vegetation indices for estimating forage phenology in desert bighorn sheep (*Ovis canadensis nelsoni*) habitat in the Sonoran Desert, USA. *International Journal of Remote Sensing*, v. 33, n. 1, p. 276-286, 2012.
- SOENEN, S. A.; PEDDLE, D. R.; COBURN, C. A. SCS+ C: A modified sun-canopysensor topographic correction in forested terrain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 43, n. 9, p. 2148-2159, 2005.
- SOLA, I.; GONZÁLEZ-AUDÍCANA, M.; ÁLVAREZ-MOZOS, J. Multi-criteria evaluation of topographic correction methods. *Remote Sensing of Environment*, v. 184, p. 247-262, 2016.
- SOUZA, A. A.; GALVAO, L. S.; SANTOS, J. R. Relationships between Hyperion-derived vegetation indices, biophysical parameters, and elevation data in a Brazilian savannah environment. *Remote Sensing Letters*, v. 1, n. 1, p. 55-64, 2010.
- STRASSBURG, B. B. N.; BROOKS, T.; FELTRAN-BARBIERI, R.; IRIBARREM, A.; CROUZEILLES, R.; LOYOLA, R.; LATAWIEC, A. E.; FILHO, F. J. B. O.; SCARAMUZZA, C. A. M.; SCARANO, F. R.; FILHO, B. S.; BALMFORD, A. Moment of truth for the Cerrado hotspot. *Nature Ecology & Evolution*, Londres, v. 1, p. 1-3, 2017.
- TAN, B.; MASEK, J. G.; WOLFE, R.; GAO, F.; HUANG, C.; VERMOTE, E. F.; SEXTON, J. O.; EDERER, G. Improved forest change detection with terrain illumination corrected Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, v. 136, p. 469-483, 2013.
- TEILLET, P. M.; GUINDON, B.; GOODENOUGH, D. G. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Kanata, v. 8, n. 2, p. 84-106, 1982.
- TONIOL, A. C.; GALVÃO, L. S.; PONZONI, F. J.; SANO, E. E.; DE JESUS AMORE, D. Potential of hyperspectral metrics and classifiers for mapping Brazilian savannas in the rainy and dry seasons. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 8, p. 20-29, 2017.
- UNGAR, S.G.; PEARLMAN, J.S.; MENDENHALL, J.A.; REUTER, D. Overview of the Earth Observing One (EO-1) mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Piscataway, v. 41, n.6, p.1149-1159, 2003.
- 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.
- VINCINI, M. & FRAZZI, E. Multitemporal evaluation of topographic normalization methods on deciduous forest TM data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 41, n. 11, p. 2586-2590, 2003.

WANG, X.; FULLER, D. O.; O'REILLY, L. D. S. L.; MIRALLES-WILHELM, F. Foliar nutrient and water content in subtropical tree islands: A new chemohydrodynamic link between satellite vegetation indices and foliar $\delta^{15}\text{N}$ values. *Remote sensing of environment*, v. 115, n. 3, p. 923-930, 2011.

WHITE, D. "Hyperion Tools 2.0 Installation and User Guide". TRW Space, Defense & Information Systems, Redondo Beach, California, 2011.

WHITCROSS, M. A.; WITKOWSKI, E. T. F.; ARCHIBALD, S. Savanna tree-grass interactions: A phenological investigation of green-up in relation to water availability over three seasons. *South African Journal of Botany*, v. 108, p. 29-40, 2017.

WU, J.; ALBERT, L. P.; LOPES, A. P.; RESTREPO-COUBE, N.; HAYEK, M.; WIEDEMANN, K. T.; TAVARES, J. V.; GUAN, K.; STARK, S.C.; CHRISTOFFERSEN, B.; PROHASKA, N.; MAROSTICA, S.; KOBAYASHI, H.; FERREIRA, M., L.; CAMPOS, K. S.; DA SILVA, R.; BRANDO, P. M.; DYE, D. G.; HUXMAN, T. E.; HUETE, A. R.; NELSON, B. W.; SALESKA, S. R. Leaf development and demography explain photosynthetic seasonality in Amazon evergreen forests. *Science*, v. 351, n. 6276, p. 972-976, 2016.

ZHANG, L.; JI, L.; WYLIE, B. K. Response of spectral vegetation indices to soil moisture in grasslands and shrublands. *International Journal of Remote Sensing*, v. 32, n. 18, p. 5267-5286, 2011.

ZHANG, X.; FRIEDL, M. A.; SCHAAF, C. B.; STRAHLER, A. H. Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid and high latitudes inferred from MODIS data. *Global Change Biology*, Oxford, v. 10, p. 1133-1145, 2004.