

Análise do ângulo de visada no comportamento espectral de imagens modis em áreas de floresta amazônica e cerrado

Analysis of the angle of view in the spectral behavior of modis images in areas of amazon forest and cerrado

Níckolas Castro Santana^I, Osmar Abílio de Carvalho Júnior^{II}, Roberto Arnaldo Trancoso Gomes^{III}, Renato Fontes Guimarães^{IV}

RESUMO

As variações da geometria de aquisição de imagens de sensoriamento remoto influenciam a resposta espectral dos alvos superficiais. O sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), contendo uma das maiores coleções de dados de superfície da terra da última década, é profundamente influenciado pela geometria de aquisição devido a sua larga faixa de imageamento e alta periodicidade. A presente pesquisa possui como objetivo avaliar a influência dos ângulos de visada no comportamento espectral das diferentes bandas espectrais MODIS e índices de vegetação nas regiões da Amazônia e do Cerrado. As faixas espectrais do infravermelho de ondas curtas e infravermelho próximo apresentaram alta dependência do ângulo de aquisição. As áreas da Amazônia apresentaram maior interferência do ângulo de aquisição em comparação com o Cerrado. A aplicação do índice NDVI atenua as alterações espectrais a longo prazo.

Palavras-chave: Zênite; Azimute; Reflectância; Vegetação, Índice espectral

ABSTRACT

Variations in the acquisition geometry of remote sensing images influence the spectral response of surface targets. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor, containing one of the most extensive land surface data collection of the last decade, is profoundly influenced by the acquisition geometry due to its wide view range and high periodicity. The present research aims to evaluate the influence of the angle of view on the spectral behavior of the different MODIS spectral bands and vegetation indices in the Amazon and Cerrado regions. The spectral bands of short-wave infrared and near-infrared showed a high dependence on the angle of acquisition. The areas of the Amazon presented greater interference of the angle of acquisition in comparison with the Cerrado. The application of the NDVI index attenuates the long-term spectral changes.

Keywords: Zenith; Azimuth; Reflectance; Vegetation; Spectral index

^IDoutorando em Geografia, na Universidade de Brasília. E-mail: nickolasantana2011@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6133-6753>

^{II}Professor do departamento de Geografia da Universidade de Brasília. E-mail: osmarjr@unb.br ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0346-1684>

^{III}Professor do departamento de Geografia da Universidade de Brasília. E-mail: robertogomes@unb.br ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4724-4064>

^{IV}Professor do departamento de Geografia da Universidade de Brasília. E-mail: renatofg@unb.br ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9555-043X>

INTRODUÇÃO

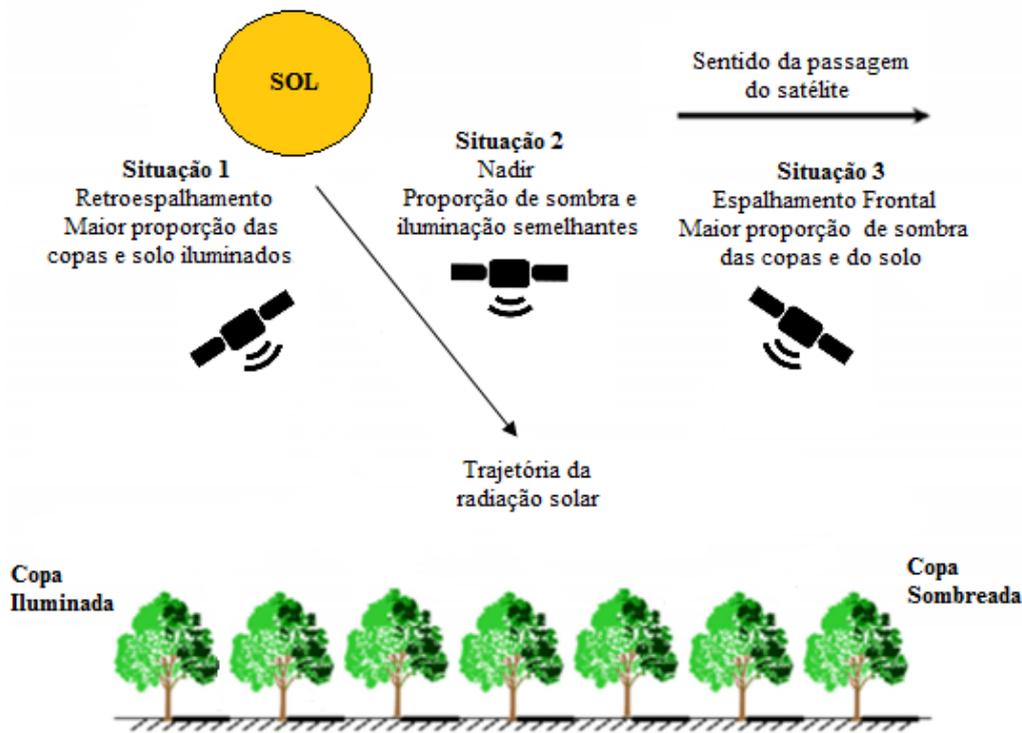
Os ciclos naturais de desenvolvimento da vegetação podem ser definidos como o seu padrão fenológico. Esse padrão é determinado principalmente pelas condições climáticas anuais de insolação, temperatura e precipitação, além de fatores biológicos (BRADLEY et al., 2011; RICHARDSON et al., 2013). A utilização de séries temporais de sensoriamento remoto possibilita a análise dos fatores que regem a variabilidade sazonal da vegetação. A reflectância medida por sensores orbitais, tais como o MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), tem sido utilizada para revelar padrões fenológicos da vegetação em diferentes escalas (HUETE et al., 2006; SALESKA et al., 2007). Entretanto, as variações da geometria sol-sensor para o sensor MODIS com ampla faixa de imageamento pode afetar diretamente na reflectância observada de cada alvo (SIMS et al., 2011). Medidas feitas em direções e horários diferentes resultam em alterações na resposta espectral devido à anisotropia e geometria sol-sensor.

A variação no ângulo de iluminação solar é responsável por alterações espectrais sazonais (RANSON et al., 1985), sendo relativamente constante em períodos curtos, nos sensores com horário de revisita similar (SIMS et al., 2011). A reflectância dos alvos da superfície é modificada de acordo com a forma de aquisição do sensor e da alteração na direção e espalhamento da luz solar, limitando a habilidade de monitorar as dinâmicas da vegetação (LATIFOVIC; CIHLAR; CHEN, 2003). Áreas com maior cobertura de dossel são conseqüentemente mais influenciadas pelo ângulo de aquisição do sensor devido principalmente ao seu sombreamento (LOBELL et al., 2002). A Figura 1 exemplifica as diferentes formas de aquisição de informações da superfície de acordo com a posição do sol e do sensor.

A correção da geometria sol-sensor é essencial para demonstrar o real padrão fenológico da vegetação (MORTON et al., 2014). Portanto, diferentes estudos buscaram avaliar a sua influência (RANSON et al., 1985; SIMS et al., 2011) ou mesmo corrigi-las a partir da normalização da BRDF (bidirectional reflectance distribution function) (MOURA et al., 2015). Em sensores com alta resolução temporal há a possibilidade de redução dos efeitos da BRDF a partir de múltiplas medições de um mesmo pixel em

diferentes ângulos ou por técnicas de composições temporais, onde pode-se definir por exemplo, os pixels com menor variação do ângulo de zênite dentro de uma série temporal específica (LATIFOVIC; CIHLAR; CHEN, 2003).

Figura 1 - Variação da Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional (Bidirectional Reflectance Distribution Function - BRDF) na vegetação em relação à posição Sol-sensor.



Fonte: Adaptado de (LIESENBERG, 2006).

Os produtos MODIS possibilitam a utilização de diversas composições como de 8 e 16 dias, porém o principal critério utilizado nestes produtos é a livre presença de nuvens, o que pode acarretar em imagens compostas por pixels com aquisições em retroespalhamento e espalhamento frontal em diferentes datas. Existem outros produtos MODIS que se utilizam de composições temporais para amenizar os efeitos dos ângulos de visada e ângulo solar nos produtos de reflectância, como o BRDF MCD43 com observações de até 16 dias de ângulos de visada (SCHAAF et al., 2002). Outros algoritmos como o Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC) (LYAPUSTIN et al., 2011) também são dedicados a corrigir efeitos da geometria sol-sensor além de efeitos atmosféricos. Apesar destes produtos trazerem melhorias, e

serem indicados para análises temporais (BI et al., 2016), ainda há incertezas relacionadas com o padrão fenológico da vegetação e a geometria sol-sensor, especialmente em dados diários, visto que os dados diários são ponderados em relação a composições temporais de 16 dias (MORTON et al., 2014).

A aplicação de índices de vegetação como o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (ROUSE et al., 1973) pode atenuar os efeitos da BRDF na vegetação, porém quanto maior for a diferença observada nas diferentes faixas espectrais utilizadas no índice, essa atenuação pode não ser totalmente eficaz para a eliminação total destes efeitos (KAUFMANN et al., 2000; SIMS et al., 2011; BURKART et al., 2015)

Além dos efeitos da geometria sol-sensor, as características de cada tipo de vegetação, e a sua localização geográfica, são essenciais para a determinação do padrão da BRDF. Superfícies florestadas da Amazônia, por exemplo, têm padrões de insolação e sombreamento diferentes de florestas da Mata Atlântica ou do Cerrado, devido principalmente as diferenças entre o ângulo de zênite solar, topografia e estrutura da vegetação (GALVÃO et al., 2011; BREUNIG et al., 2015). Neste contexto, o presente estudo busca avaliar os padrões espectrais observados nos biomas da Amazônia e do Cerrado, e qual a influência dos parâmetros de aquisição de imagens de sensoriamento remoto, e do tipo de cobertura vegetal, florestal ou savânica. Foram selecionadas duas áreas para representação desta metodologia, uma no oeste do estado do Pará e outra no oeste do estado da Bahia.

O padrão espectral e a influência dos ângulos de aquisição dos sensores, de áreas da Amazônia e Cerrado, tem sido abordado em diversas pesquisas, entretanto a maioria dos estudos analisa áreas da Amazônia (XAVIER; GALVÃO, 2005; BREUNIG et al., 2012; GALVÃO et al., 2013; MOURA et al., 2015), e poucos se especializaram em áreas do Cerrado (LIESENBERG; GALVÃO; PONZONI, 2007), ou na comparação entre os dois biomas. O objetivo deste estudo foi avaliar a sensibilidade espectral das bandas MODIS e de dois índices de vegetação a partir das alterações no ângulo de visada em áreas de vegetação do bioma Amazônico e Cerrado.

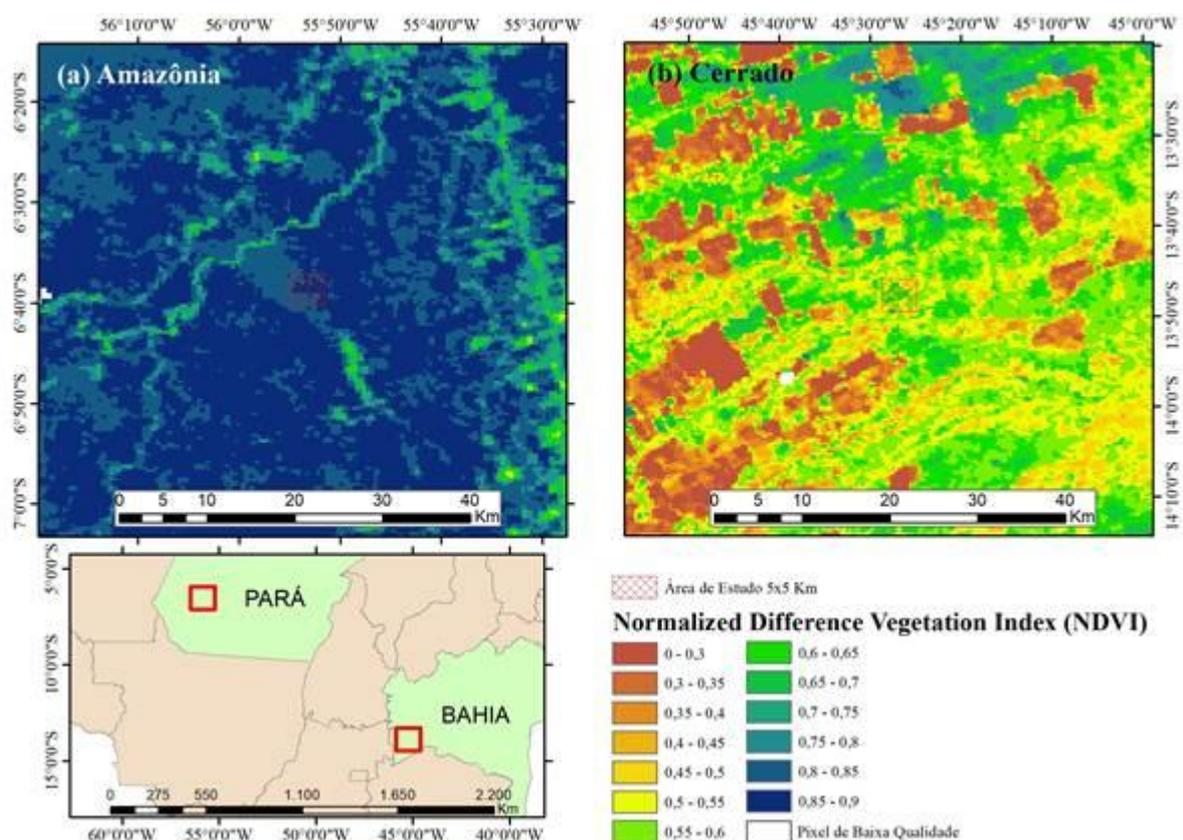
1. METODOLOGIA

1.1 Áreas de estudo

As duas áreas de estudo possuem uma dimensão de 5x5 km localizadas em dois tipos distintos de vegetação: (a) floresta Amazônica no Sudoeste Paraense, município de Novo Progresso (55,99W e 6,64S); e (b) Cerrado no Oeste da Bahia, município de Jaborandi (45,35W e 14,16S) (Figura 2). A definição de áreas de 5x5 km coincide com trabalhos como os de Sims et al., (2011) e Ulsig et al., (2017), onde foram selecionadas áreas de 3x3 km ao redor de torres de fluxos biogeoquímicos. Na análise do presente estudo, o dado por pixel é a principal variável analisada, sendo necessário apenas a seleção de áreas com baixa mistura espectral, neste caso optou-se por duas áreas extensas de vegetação natural, diminuindo a influência de mistura de outros alvos.

A região definida no Pará apresenta formações de floresta ombrófila aberta, com temperatura elevada (média de 25° C) e com alta/média pluviosidade (mais de 2 meses de seca), também conhecida como floresta-de-cipó do sul Paraense, essa vegetação tem árvores de alto porte influenciando no sombreamento da superfície (IBGE, 2012). A região definida no oeste da Bahia é composta por formações savânicas e campestres, especificamente a savana arborizada. Com temperatura elevada e média pluviosidade (mais de 4 meses de seca) a vegetação da savana arborizada é composta por um conjunto de gramíneas e árvores ou arbustos bem espaçados entre si, neste caso o sombreamento da superfície pela vegetação é menor do que na floresta ombrófila (IBGE, 2012). As condições climáticas e da geometria sol-sensor também são específicas em cada uma das regiões, resultando em diferentes padrões de respostas espectrais ao longo do ano.

Figura 2 – Localização das duas áreas de estudo: (a) Amazônia e (b) Cerrado. As imagens de índice NDVI são do dia 03 de julho de 2010.



1.2 Dados MODIS

A pesquisa utilizou as imagens diárias de reflectância da superfície do sensor MODIS (produto MOD09GA versão 6) com resolução espacial de 500m, para o ano de 2010, a partir do portal eletrônico da National Aeronautics and Space Administration (NASA): <<https://earthdata.nasa.gov/>>. Do produto MOD09GA foram extraídas as informações listadas na tabela 1. Além dos efeitos do ângulo de visada, cabe salientar a importância de efeitos atmosféricos como aerossóis na alteração da resposta espectral dos alvos principalmente nas bandas do visível (PEREIRA et al., 2009), portanto optou-se pela eliminação dos pixels que não se enquadraram no critério de máxima qualidade do produto de garantia de qualidade do MOD09GA, ou seja, com todas as correções atmosféricas. O segundo critério foi extraído do produto de sinalização de

qualidade, dele apenas os pixels sem cobertura de nuvens, sombras de nuvens, e com baixa presença de aerossóis foram considerados.

Foram selecionados três períodos de dados: (a) Dias consecutivos para representar cenários de retroespalhamento e espalhamento frontal (02 e 03 de Julho na Amazônia e 03 e 04 de Julho no Cerrado); (b) Análise no ano de 2010 para dias com pixels com alta qualidade, conforme definido anteriormente, resultando em 183 datas no Cerrado (94 em retroespalhamento e 89 em espalhamento frontal) e 44 datas na Amazônia (24 em retroespalhamento e 21 em espalhamento frontal); (c) Análise em um período de 15 dias, entre 21 de junho a 05 de julho na Amazônia e Cerrado (5 em retroespalhamento e 7 em espalhamento frontal na Amazônia, e 6 em retroespalhamento e 4 em espalhamento frontal no Cerrado).

Tabela 1: Camadas extraídas do produto MOD09GA v.6

Nome	Descrição
Banda 1	Reflectância superficial (0,620 e 0,670 micrômetros (μm))
Banda 2	Reflectância superficial (0,841 e 0,876 micrômetros (μm))
Banda 3	Reflectância superficial (0,459 e 0,479 micrômetros (μm))
Banda 4	Reflectância superficial (0,545 e 0,565 micrômetros (μm))
Banda 5	Reflectância superficial (1,230 e 1,250 micrômetros (μm))
Banda 6	Reflectância superficial (1,628 e 1,652 micrômetros (μm))
Banda 7	Reflectância superficial (2,105 e 2,155 micrômetros (μm))
Situação 1 km	Situação de cada pixel (Nuvens, sombra, água, aerossóis, fogo e neve)
Qualidade 500 m	Qualidade do processamento de cada pixel
Zênite do Sensor	Ângulo de zênite do sensor no momento da aquisição em cada pixel
Azimute do Sensor	Ângulo de azimute do sensor no momento da aquisição em cada pixel

1.3 Variações no ângulo de visada

Os dados de zênite (Ângulos de 0 a 60°) e azimute (Ângulos positivos e negativos) do sensor foram cruzados para estabelecimento do ângulo de visada do sensor e a sua direção em retroespalhamento ou espalhamento frontal. Pixels com ângulos entre 0 e 60° positivos foram enquadrados como espalhamento frontal e pixels com ângulos entre 0 e 60° negativos foram enquadrados como retroespalhamento.

1.4 Sensibilidade das bandas espectrais ao ângulo de visada

A partir dos dados das bandas espectrais e de ângulo de visada foram realizadas as seguintes análises para as áreas da Amazônia e do Cerrado : (a) Comparação entre a curva espectral média e o ângulo de visada em dois dias consecutivos, em cenários de retroespalhamento e espalhamento frontal; (b) Relação entre cada banda espectral e a variação anual do ângulo de visada a partir de regressão linear e R^2 ; (c) Relação entre cada banda espectral e a variação em curto prazo do ângulo de visada, a partir de regressão linear e R^2 ; e (d) Relação entre os índices de vegetação (NDVI e EVI) e a variação anual do ângulo de visada, a partir de regressão linear e R^2 .

1.5 Sensibilidade dos índices de vegetação ao ângulo de visada

A partir dos dados selecionados foram calculados os índices de vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (ROUSE et al., 1973): e o EVI (Enhanced Vegetation Index) (LIU; HUETE, 1995), expressos pelas seguintes equações:

$$(1) \quad NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}$$

$$(2) \quad EVI = 2,5 \frac{(NIR-RED)}{(NIR+6*RED-7,5*BLUE+1)}$$

Onde NIR, RED e BLUE são, respectivamente, os valores de reflectância nos canais espectrais do infravermelho próximo (0,841 a 0,876 μm), vermelho (0,620 a 0,670 μm) e azul (0,459 a 0,565 μm). Os dados de ângulo de visada (zênite) e azimute foram utilizados para definir o pixel em dois grupos: (a) retroespalhamento definido como negativo; e (b) espalhamento frontal definido como positivo (Figura 1).

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

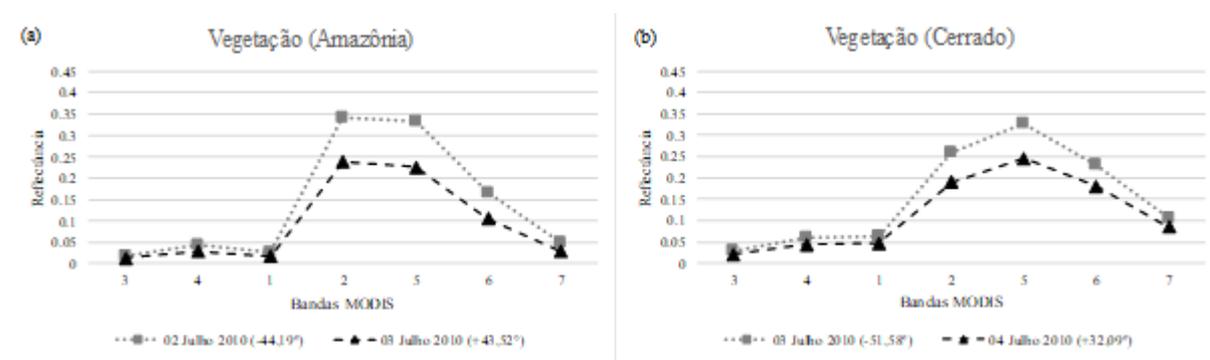
2.1 Variação Espectral Diária

Durante o ano analisado, variações significativas relacionadas a alterações no ângulo de visada foram observadas para todas as bandas espectrais, especialmente no Infravermelho. A Figura 3(a) exemplifica a alteração na reflectância da floresta Amazônica, para o dia 02 de julho de 2010, em um cenário de retroespalhamento, onde a maior parte do dossel é iluminado, e em um cenário de espalhamento frontal, no dia 03 de julho de 2010, onde a maior parte do dossel é constituído por sombras. A Figura 3(b) apresenta as variações espectrais na vegetação do Cerrado em um cenário de retroespalhamento (03 de julho) e em um cenário de espalhamento frontal (04 de julho).

O comportamento espectral variou conforme o ângulo de visada, onde no retroespalhamento apresentou valores maiores de reflectância, situação na qual as folhas da vegetação estão mais iluminadas, enquanto no espalhamento frontal, apresentou menores valores de reflectância, devido à maior constituição de sombras (SIMS et al., 2011). Esta influência do ângulo de visada também foi analisado em outras regiões da Amazônia, e mesmo áreas não florestadas, como lavouras de soja, apresentam o padrão de diminuição da resposta espectral no cenário de espalhamento frontal (GALVÃO et al., 2012).

Conforme destacado em outros trabalhos como Galvão et al. (2012) e Moura et al. (2015), as maiores mudanças absolutas foram observadas nas bandas do Infravermelho, 5 e 2 na Amazônia e Cerrado respectivamente. Esse padrão era esperado dada a maior reflectância da vegetação nestes canais, com o conseqüente maior espalhamento, enquanto as menores variações absolutas foram observadas nos canais com alta absorção, como o vermelho (MOURA et al., 2015). Percentualmente, os canais do infravermelho de ondas curtas (6 e 7) apresentaram a maior diferença entre os valores de reflectância, havendo aumento de até 42% na resposta espectral, entre dois dias consecutivos, na Amazônia, e até 29% no Cerrado. Os outros canais espectrais, como o do azul, apresentaram alterações de até 35% entre os dois cenários.

Figura 3 -Variação espectral nos cenários de retroespalhamento e espalhamento frontal para uma área de vegetação na Amazônia (a) e uma no Cerrado (b).



As áreas analisadas no Cerrado se apresentaram menos vulneráveis aos efeitos de variações no ângulo de visada do MODIS. A vegetação da Amazônia possui um maior impacto dos efeitos do ângulo de visada devido principalmente à diferença no dossel, implicando em áreas de sombras maiores e o maior impacto dos efeitos do espalhamento frontal do que nas áreas de savanas como o Cerrado (MOURA et al., 2015).

2.2 Variação por Banda Espectral no Período de 1 Ano

Considerando as imagens na Amazônia para o ano de 2010, as variações no ângulo de visada do sensor MODIS implicaram em uma influência significativa em todas as bandas espectrais (valor-p < 0,001), sendo maior nas bandas do infravermelho, explicando de 78% a 88% das variações espectrais no período, e menor na banda do azul, explicando 39% das variações (Figura 4). O mesmo padrão observado em datas consecutivas no tópico 2.1 foi observado para a série anual, confirmando a maior dependência dos canais do infravermelho quanto ao ângulo de visada do sensor.

É importante destacar a diferença na cobertura de dados para os dois ambientes selecionados: na Amazônia a alta cobertura de nuvens mesmo no período de seca dificulta a aquisição de séries de dados com boa qualidade, resultando em séries com menor continuidade em comparação com as áreas do Cerrado (ASNER, 2001; WYLIE et al., 2005).

Figura 4 – Reflectância da vegetação da Amazônia, nas diferentes bandas MODIS, em relação ao ângulo de zênite do sensor no ano de 2010.

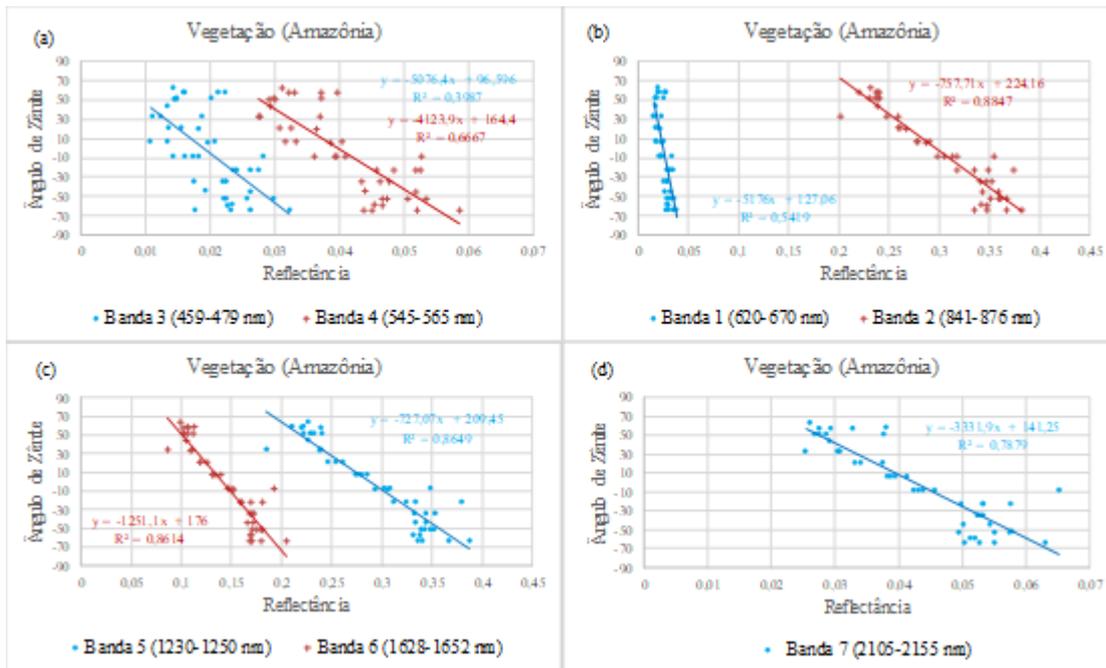
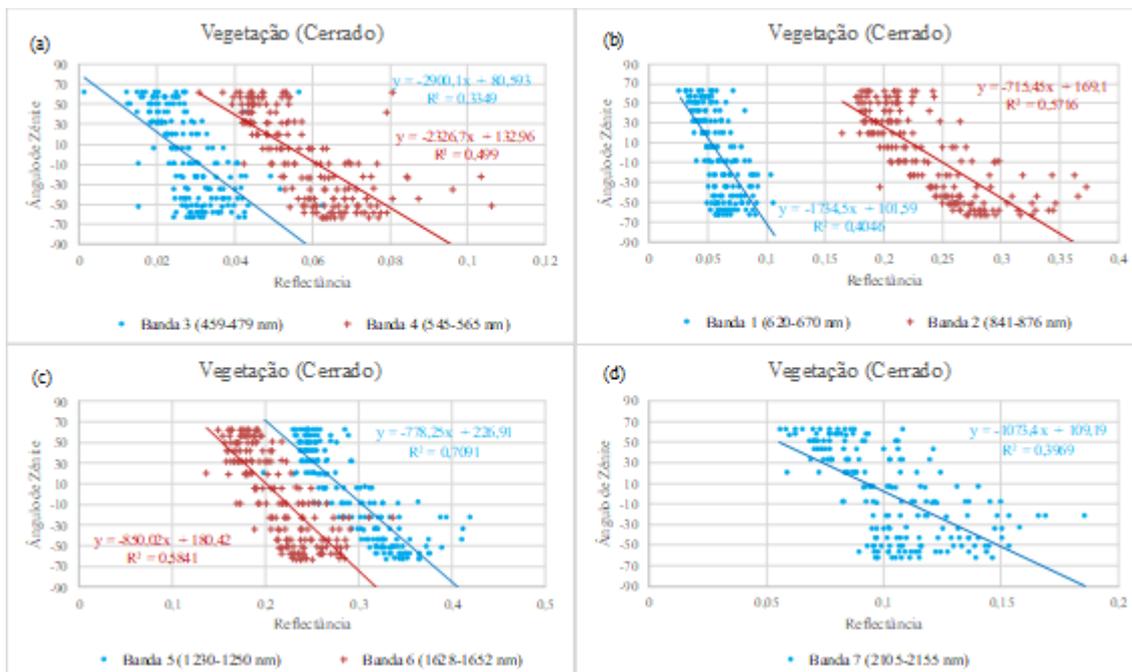


Figura 5 - Reflectância da vegetação do Cerrado, nas diferentes bandas MODIS, em relação ao ângulo de zênite do sensor no ano de 2010.



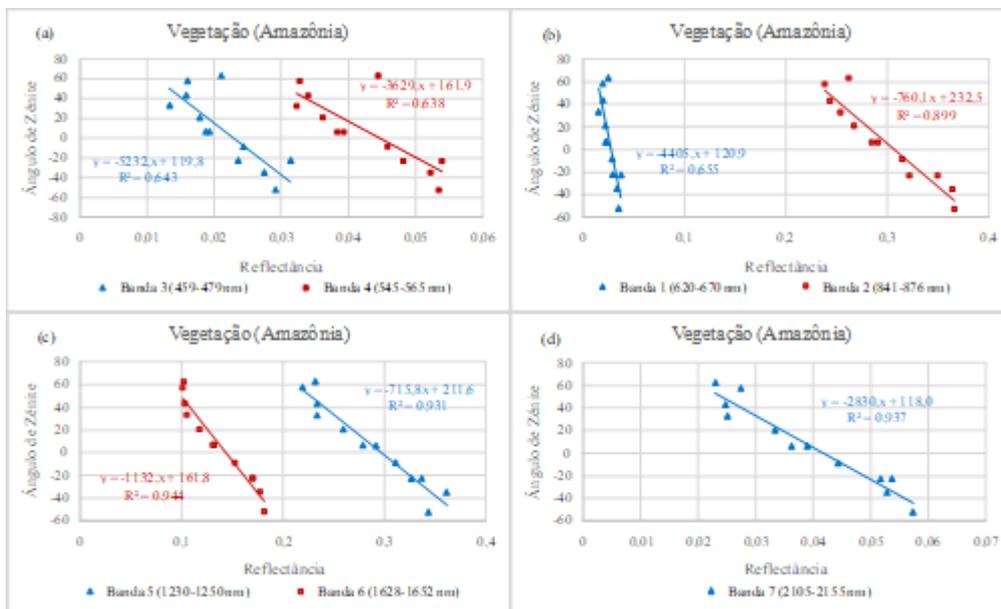
O Cerrado, em comparação com a Amazônia, apresentou menor influência dos efeitos do ângulo de visada. Apesar disso, o padrão de variação das bandas espectrais foi semelhante, com dependência significativa nas bandas do infravermelho 2, 5 e 6

(valor- $p < 0,001$), sendo as variações de reflectância explicadas, de 57% a 70%, pelas variações do ângulo de visada. A menor dependência foi observada na banda 3 do azul e na banda 7 do infravermelho de ondas curtas, explicando de 33% até 39% das variações de reflectância (Figura 5).

2.3 Variações Espectrais em Curto Prazo

Para um período de 15 dias na Amazônia (entre 21 de junho a 05 de julho), sendo eliminados três em razão da presença de nuvens (23, 25 e 29 de Junho), foi observada uma influência significativa do ângulo de visada na variação espectral de todas as bandas, principalmente no infravermelho de ondas curtas ($R^2 > 0,93$) (Figura 6). As bandas do visível apresentaram $R^2 > 0,63$ indicando serem menos influenciadas por estas variações (Figura 6).

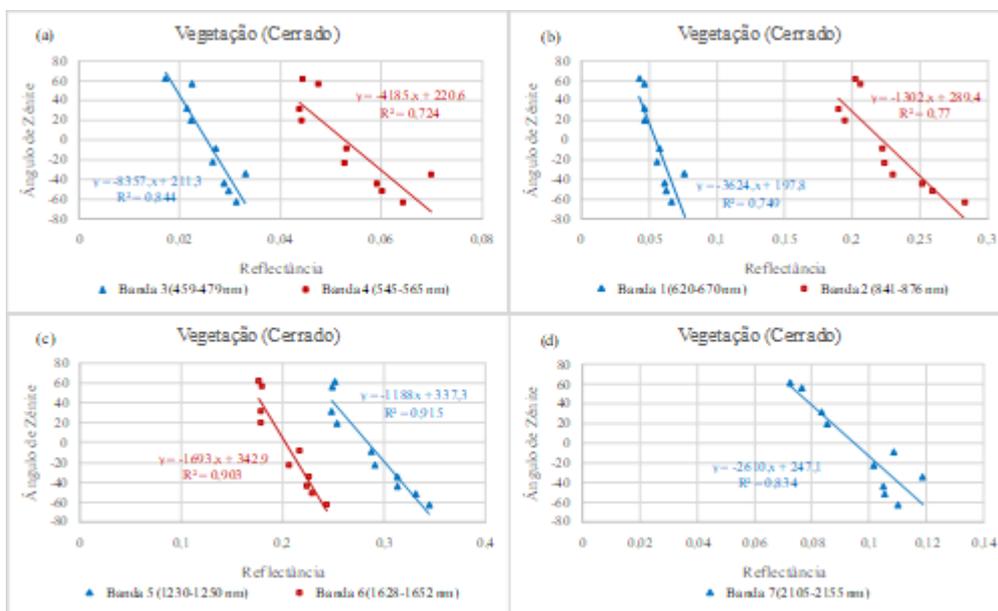
Figura 6 - Reflectância da vegetação da Amazônia, nas diferentes bandas MODIS, em relação ao ângulo de zênite do sensor em 15 dias.



A análise nas áreas de Cerrado foi realizada para o mesmo período de 15 dias (de 21 de junho a 05 de julho), sendo eliminadas cinco datas da análise (21, 25, 26 e 28 de junho e 02 de julho), em virtude da baixa qualidade atmosférica das cenas. O Cerrado apresentou-se menos susceptível a influência do ângulo de visada nas alterações no

infravermelho (Figura 7), contudo pode-se observar que as bandas do visível são mais dependentes destes efeitos em comparação com a vegetação da Amazônia ($R^2 > 0,72$; $P < 0,001$). Como a presença de aerossóis e nuvens na atmosfera da Amazônia é maior que a do Cerrado no mesmo período do ano (PEREIRA et al., 2009), espera-se que estes efeitos sejam responsáveis pela diferença na influência do ângulo de visada nas bandas do visível.

Figura 7 - Reflectância da vegetação do Cerrado, nas diferentes bandas MODIS, em relação ao ângulo de zênite do sensor em 15 dias.



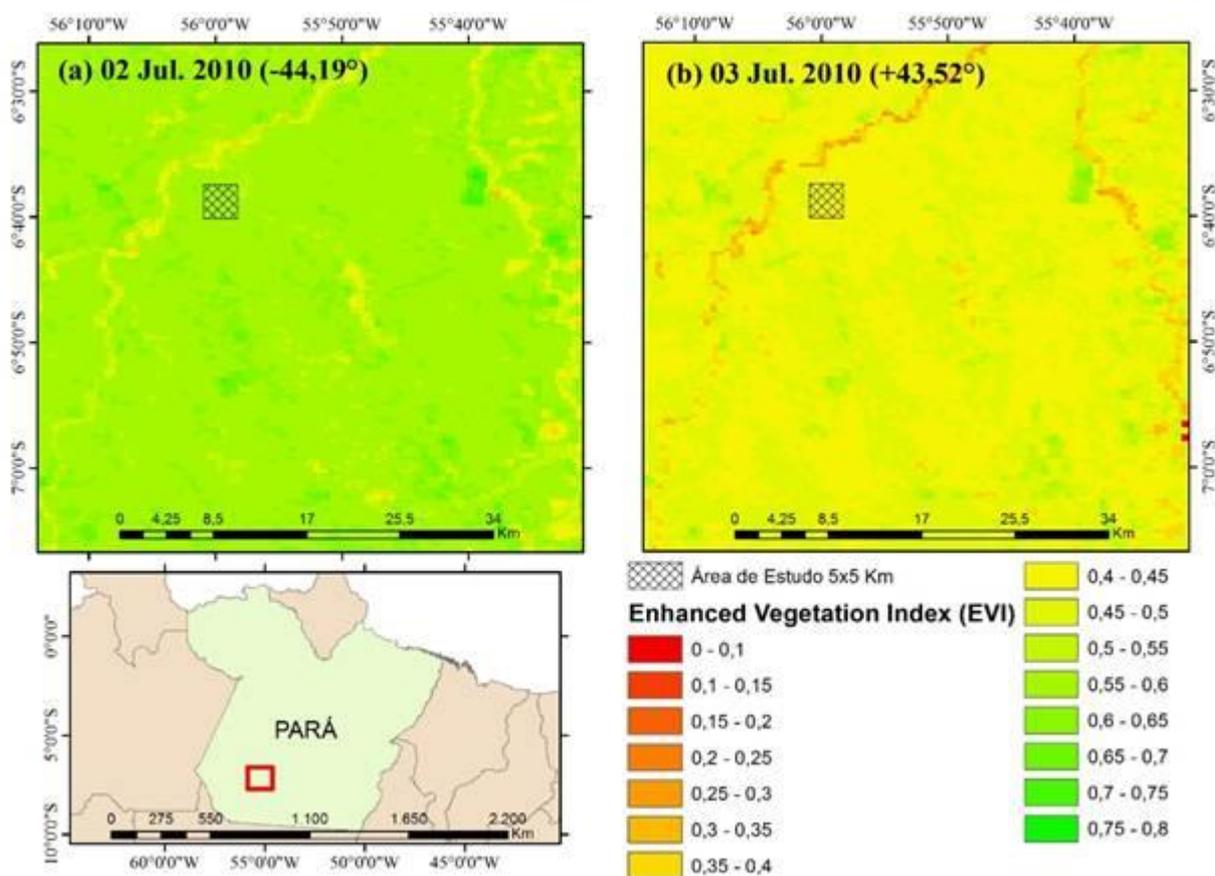
2.3 Aplicação de índices para análise temporal da vegetação

A Figura 8 ilustra as alterações no índice EVI para a área da Amazônia em dois dias consecutivos. Observa-se o aumento dos valores de EVI, na aquisição por retroespalhamento (Figura 8a) em comparação com o espalhamento frontal (Figura 8b). O maior sombreamento da vegetação, no cenário de espalhamento frontal, acarreta na diminuição dos valores do EVI nos dias analisados.

Nas duas áreas selecionadas, o índice EVI apresentou sensibilidade as alterações no ângulo de visada MODIS. Conforme o comportamento das bandas espectrais isoladas, a floresta Amazônica foi mais afetada por estes efeitos ($R^2 > 0,87$; $P < 0,001$) do que a

área de vegetação no Cerrado ($R^2 > 0,27$; $P < 0,001$) (Figura 9). As diferenças fitofisionômicas entre as duas áreas influenciam nas taxas de crescimento de cada vegetação, aquelas com maior amplitude de crescimento entre o período seco e o período úmido, como as do Cerrado, tendem a apresentar maiores variações naturais nos índices de vegetação (LIESENBERG; GALVÃO; PONZONI, 2007). Nas áreas da Amazônia, há uma tendência de manutenção da estrutura da copa mesmo em períodos secos, podendo as variações na série temporal serem atribuídas as modificações do ângulo de visada do sensor e do ângulo solar (MORTON et al., 2014).

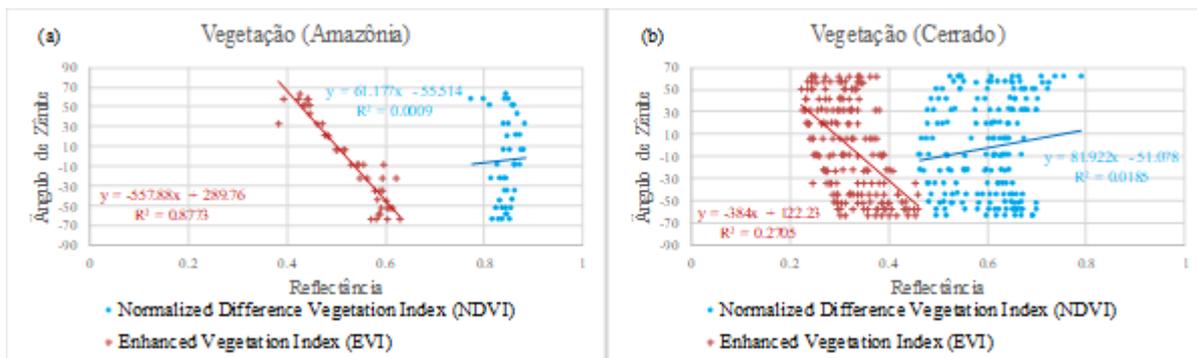
Figura 8 - Variação do índice de vegetação (EVI) nos cenários de retroespalhamento (a) e espalhamento frontal (b) para uma área de vegetação na Amazônia.



O índice NDVI não apresentou relação com as alterações no ângulo de visada, tanto para Amazônia ($R^2 < 0,00$; $P > 0,8$), quanto para o Cerrado ($R^2 < 0,02$; $P > 0,06$), indicando que a aplicação deste índice tende a atenuar ou eliminar os efeitos da BRDF em séries anuais (GOWARD; HUENNRICH, 1992; KAUFMANN et al., 2000; SIMS et al., 2011). A maior sensibilidade do índice EVI em comparação com o índice NDVI está na

formulação de cada índice. O índice EVI é altamente relacionado com a banda do Infravermelho Próximo, sendo a sua sensibilidade maximizada nos períodos com baixo ângulo de zênite solar (GALVÃO et al., 2011; BREDE et al., 2015). Os índices normalizados tendem a atenuar os efeitos do ângulo de visada do sensor, caso as bandas utilizadas no índice tenham sensibilidade semelhante, além disso, o índice NDVI tem a tendência de saturar em valores extremos de biomassa, neste caso a maior sensibilidade do EVI à biomassa o torna mais susceptível a variações nos ângulos de visada (SIMS et al., 2011). A utilização de produtos como o MAIAC (LYAPUSTIN et al., 2011) podem minimizar os efeitos da geometria sol-sensor nos índices de vegetação em séries temporais de 16 dias, sendo recomendado o seu uso para o monitoramento temporal da vegetação (ULSIG et al., 2017).

Figura 9 – Relação dos índices de vegetação NDVI e EVI em relação ao ângulo de zênite, na Amazônia e no Cerrado.



3. CONCLUSÕES

A presente pesquisa examinou os efeitos da variação no ângulo de visada do sensor MODIS na alteração dos padrões de reflectância da vegetação na Amazônia e no Cerrado. A vegetação da Amazônia apresentou maiores variações de reflectância entre retroesplhamento e espalhamento frontal provavelmente por causa da maior predominância de sombreamento do dossel, quando comparada a vegetação do Cerrado. A partir da análise de uma série anual e de curto prazo (15 dias), observou-se que o ângulo de visada do sensor influencia, principalmente, as bandas centradas nos

canais do infravermelho próximo e de ondas curtas, além de ser mais evidente em datas subsequentes. Considerando os índices de vegetação, o NDVI atenua a influência do ângulo de visada, enquanto o EVI apresenta alta sensibilidade a estas variações. Portanto, a análise de séries temporais de vegetação deve observar as variações inerentes daquelas ocasionadas por diferentes padrões de aquisição e iluminação. Trabalhos futuros podem comparar os produtos BRDF MODIS com dados não corrigidos para avaliar a sua eficácia quanto a eliminação de variações não-sazonais na reflectância dos alvos.

Referências

- ASNER, G. P. Cloud cover in Landsat observations of the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, v. 22, n. 18, p. 3855–3862, 2001.
- BI, J.; MYNENI, R.; LYAPUSTIN, A.; WANG, Y.; PARK, T.; CHI, C.; YAN, K.; KNYAZIKHIN, Y. Amazon forests' response to droughts: A perspective from the MAIAC product. *Remote Sensing*, v. 8, n. 4, p. 1–12, 2016.
- BRADLEY, A. V.; GERARD, F. F.; BARBIER, N.; WEEDON, G. P.; ANDERSON, L. O.; HUNTINGFORD, C.; ARAGÃO, L. E. O. C.; ZELAZOWSKI, P.; ARAI, E. Relationships between phenology, radiation and precipitation in the Amazon region. *Global Change Biology*, v. 17, n. 6, p. 2245–2260, 2011.
- BREDE, B.; SUOMALAINEN, J.; BARTHOLOMEUS, H.; HEROLD, M. Influence of solar zenith angle on the enhanced vegetation index of a Guyanese rainforest. *Remote Sensing Letters*, v. 6, n. 12, p. 972–981, 2015.
- BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; DOS SANTOS, J. R.; GITELSON, A. A.; DE MOURA, Y. M.; TELES, T. S.; GAIDA, W. Spectral anisotropy of subtropical deciduous forest using MISR and MODIS data acquired under large seasonal variation in solar zenith angle. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 35, p. 294–304, mar. 2015.
- BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N. Variation of MODIS reflectance and vegetation indices with viewing geometry and soybean development. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 84, n. 2, p. 263–274, 2012.

BURKART, A.; AASEN, H.; ALONSO, L.; MENZ, G.; BARETH, G.; RASCHER, U. Angular Dependency of Hyperspectral Measurements over Wheat Characterized by a Novel UAV Based Goniometer. *Remote Sensing*, v. 7, n. 1, p. 725–746, 12 jan. 2015.

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, n. 1, p. 291–300, 2012.

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, n. 1, p. 291–300, 2013.

GALVÃO, L. S.; DOS SANTOS, J. R.; ROBERTS, D. A.; BREUNIG, F. M.; TOOMEY, M.; DE MOURA, Y. M. On intra-annual EVI variability in the dry season of tropical forest: A case study with MODIS and hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, v. 115, n. 9, p. 2350–2359, 2011.

GOWARD, S. N.; HUEMMIRICH, K. F. Vegetation canopy PAR absorptance and the normalized difference vegetation index: An assessment using the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, v. 39, n. 2, p. 119–140, 1992.

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; SHIMABUKURO, Y. E.; RATANA, P.; SALESKA, S. R.; HUTYRA, L. R.; YANG, W.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophysical Research Letters*, v. 33, n. 6, p. 2–5, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Manual Técnico da Vegetação Brasileira*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2012.

KAUFMANN, R. K.; ZHOU, L.; KNYAZIKHIN, Y.; SHABANOV, N. V.; TUCKER, C. J. Effect of orbital drift and sensor changes on the time series of AVHRR vegetation index data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 38, n. 6, p. 2584–2597, 2000.

LATIFOVIC, R.; CIHLAR, J.; CHEN, J. A comparison of BRDF models for the normalization of satellite optical data to a standard sun-target-sensor geometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 41, n. 8, p. 1889–1898, 2003.

LIESENBERG, V. *Análise multi-angular de fitofisionomias do bioma cerrado com dados MISR/TERRA*. 2006. 120 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP.

LIESENBERG, V.; GALVÃO, L. S.; PONZONI, F. J. Variations in reflectance with seasonality and viewing geometry: Implications for classification of Brazilian savanna physiognomies with MISR/Terra data. *Remote Sensing of Environment*, v. 107, n. 1–2, p. 276–286, 2007.

LIU, H. Q.; HUETE, A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 33, n. 2, p. 457–465, mar. 1995.

LOBELL, D. B.; ASNER, G. P.; LAW, B. E.; TREUHAFT, R. N. View angle effects on canopy reflectance and spectral mixture analysis of coniferous forests using AVIRIS. *International Journal of Remote Sensing*, v. 23, n. 11, p. 2247–2262, jan. 2002.

LYAPUSTIN, A.; MARTONCHIK, J.; WANG, Y.; LASZLO, I.; KORKIN, S. Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 1. Radiative transfer basis and look-up tables. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 116, n. 3, 2011.

MORTON, D. C.; NAGOL, J.; CARABAJAL, C. C.; ROSETTE, J.; PALACE, M.; COOK, B. D.; VERMOTE, E. F.; HARDING, D. J.; NORTH, P. R. J. Amazon forests maintain consistent canopy structure and greenness during the dry season. *Nature*, v. 506, n. 7487, p. 1–16, 2014.

MOURA, Y. M.; HILKER, T.; LYAPUSTIN, A. I.; GALVÃO, L. S.; DOS SANTOS, J. R.; ANDERSON, L. O.; DE SOUSA, C. H. R.; ARAI, E. Seasonality and drought effects of Amazonian forests observed from multi-angle satellite data. *Remote Sensing of Environment*, v. 171, p. 278–290, 2015.

PEREIRA, G.; FREITAS, S. R.; MORAES, E. C.; FERREIRA, N. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; RAO, V. B.; LONGO, K. M. Estimating trace gas and aerosol emissions over South America: Relationship between fire radiative energy released and aerosol optical depth observations. *Atmospheric Environment*, v. 43, n. 40, p. 6388–6397, 2009.

RANSON, K. J.; DAUGHTRY, C. S. T.; BIEHL, L. L.; BAUER, M. E. Sun-view angle effects on reflectance factors of corn canopies. *Remote Sensing of Environment*, v. 18, n. 2, p. 147–161, 1985.

RICHARDSON, A. D.; KEENAN, T. F.; MIGLIAVACCA, M.; RYU, Y.; SONNENTAG, O.; TOOMEY, M. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 169, p. 156–173, 2013.

ROUSE, J. W.; HASS, R. H.; SCHELL, J. J. A.; DEERING, D. W. D. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) symposium, v. 1, p. 309–317, 1973.

SALESKA, S. R.; DIDAN, K.; HUETE, A. R.; DA ROCHA, H. R. Amazon Forests Green-Up During 2005 Drought. *Science*, v. 318, n. 5850, p. 612–612, 2007.

SCHAAF, C. B.; GAO, F.; STRAHLER, A. H.; LUCHT, W.; LI, X.; TSANG, T.; STRUGNELL, N. C.; ZHANG, X.; JIN, Y.; MULLER, J.-P.; LEWIS, P.; BARNSLEY, M.; HOBSON, P.; DISNEY, M.; ROBERTS, G.; DUNDERDALE, M.; DOLL, C.; D'ENTREMONT, R. P.; HU, B.; LIANG, S.; PRIVETTE, J. L.; ROY, D. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, n. 1–2, p. 135–148, nov. 2002.

SIMS, D. A.; RAHMAN, A. F.; VERMOTE, E. F.; JIANG, Z. Seasonal and inter-annual variation in view angle effects on MODIS vegetation indices at three forest sites. *Remote Sensing of Environment*, v. 115, n. 12, p. 3112–3120, 2011.

ULSIG, L.; NICHOL, C. J.; HUENNRICH, K. F.; LANDIS, D. R.; MIDDLETON, E. M.; LYAPUSTIN, A. I.; MAMMARELLA, I.; LEVULA, J.; PORCAR-CASTELL, A. Detecting inter-annual variations in the phenology of evergreen conifers using long-term MODIS vegetation index time series. *Remote Sensing*, v. 9, n. 1, 2017.

WYLIE, D.; JACKSON, D. L.; MENZEL, W. P.; BATES, J. J. Trends in Global Cloud Cover in Two Decades of HIRS Observations. *Journal of Climate*, v. 18, n. 15, p. 3021–3031, 2005.

XAVIER, A. S.; GALVÃO, L. S. View angle effects on the discrimination of selected Amazonian land cover types from a principal-component analysis of MISR spectra. *International Journal of Remote Sensing*, v. 26, n. 17, p. 3797–3811, 2005.