

SENSORIAMENTO REMOTO MULTIANGULAR NO ESTUDO DO PARQUE ESTADUAL DO TURVO – RS

MULTIANGULAR REMOTE SENSING FOR THE STUDY OF PARQUE ESTADUAL DO TURVO – RS

Fábio Marcelo Breunig¹
Lênio Soares Galvão²
Rafaelo Balbinot³
William Gaida⁴
Thiago Sousa Teles⁵

¹Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Departamento de Engenharia Florestal - DEF
e-mail: fabiobreunig@gmail.com

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Divisão de Sensoriamento Remoto - DSR
e-mail: lenio@dsr.inpe.br

³Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Departamento de Engenharia Florestal - DEF
e-mail: rafaelo.balbinot@gmail.com

⁴Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências - PPGGEO
e-mail: williamgaida@yahoo.com.br

⁵Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto - PGSER
e-mail: ts.teles@hotmail.com

RESUMO

O uso de imagens adquiridas por sensores com diferentes geometrias de visada (estéreo-pares) é consolidado na perspectiva da reconstrução do espaço tridimensional através da visão estereoscópica. Por outro lado, a utilização de imagens adquiridas com distintas geometrias de visada e de iluminação ainda é pouco comum quanto à exploração das informações espectrais, especialmente no Brasil. Nesse contexto, o trabalho visa fazer uma avaliação espectral de um fragmento de floresta nativa no noroeste do Rio Grande do Sul com o uso de imagens multiangulares do sensor *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer* (MISR). O sensor MISR, a bordo da plataforma Terra, adquire imagens em nove diferentes ângulos de visada (quase simultaneamente), em quatro bandas (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo). A área de estudo é o Parque Estadual do Turvo (PET) com uma área de aproximadamente 17.500 ha. O PET é um dos maiores fragmentos de floresta nativa do sul do Brasil e apresenta uma área continua ao longo da província de Misiones (Argentina), se estendendo até a Floresta do Parque Nacional de Foz do Iguazu - PR. Os dados MISR foram adquiridos no servidor Langley Atmospheric Sciences Data Center da NASA. Para o estudo, foram utilizados os produtos MIL2ASLS (MISR Level 2 Land Surface Data - Bidirectional Reflectance Factor-BRF) referente a refletância bidirecional de superfície e o produto MIANCAGP (Ancillary Geographic Product) referente aos parâmetros de localização para o georreferenciamento utilizando os aplicativos MISR_viewer e ENVI. Um total de até

44 pixels (amostras) foram extraídos da área do PET, respeitando aproximadamente um quilômetro da borda da floresta para evitar mistura espectral. Os dados de reflectância bidirecional (BRF) das quatro bandas do MISR foram analisados em função da direção e do ângulo de observação (visada). Além disso, foram analisados complementarmente os padrões de índices de vegetação como o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e o *Enhanced Vegetation Index* (EVI). A fim de permitir uma base comparativa entre todas as bandas e entre os índices de vegetação, os dados foram normalizados para a aquisição ao nadir. Os resultados mostraram que na direção do retroespalhamento a reflectância de todas as bandas é maior do que na direção do espalhamento frontal. Com relação ao ângulo de visada, à medida que o ângulo aumenta na direção do retroespalhamento, o valor da reflectância também aumenta. Um padrão contrário foi observado na direção do espalhamento frontal. Quando normalizado para o nadir, as bandas do verde e do vermelho apresentaram maior anisotropia. Cabe destacar que esse padrão de anisotropia é maior no inverno do que no verão devido ao aumento do ângulo zenital solar nos meses de inverno e a perda de folhas por parte das espécies dominantes. Em relação aos índices de vegetação, o NDVI apresentou maior isotropia ao longo do ano e para todas as direções de espalhamento do que o EVI. O EVI, devido a sua forte correlação com a banda do infravermelho próximo e com a fração sombra, apresentou forte anisotropia, especialmente no inverno. Deste modo, os resultados mostram a importância de se considerar o padrão de resposta espectral-angular da vegetação quando estimativas de parâmetros biofísicos (índice de área foliar) e bioquímicos (clorofila, conteúdo de água) da vegetação são objeto de estudo, com base em sensores com capacidade de apontamento ou com campo largo campo de visada, a fim de se evitar erros nas estimativas.

Palavras chaves: MISR, ângulo zenital de visada, ângulo zenital solar, floresta decidual, monitoramento.

ABSTRACT

The use of images acquired by sensors at different view geometries (stereo-pairs) is consolidated considering the reconstruction of three-dimensional space by stereoscopic vision. On the other hand, the use of images acquired at different view and illumination angles is still unusual regarding the spectral information extraction, especially in Brazil. In this context, the work aims to make a spectral evaluation of a native forest fragment in northwestern Rio Grande do Sul State, in South of Brazil, using multi-angle images of the Multi-angle Imaging Spectroradiometer (MISR) sensor. The MISR sensor, onboard the Terra platform, acquires images in nine different view angles (almost simultaneously) and in four multispectral bands (blue, green, red and near infrared). The study area is the *Parque Estadual do Turvo* (PET), which has an area of approximately 17,500 ha. The PET is one of the largest native forest fragments of southern Brazil and has a great continuity in the province of Misiones (Argentina), extending to the *Parque Nacional de Foz do Iguaçu* forest – Parana, Brazil. The MISR data were acquired from the Langley Atmospheric Sciences Data Center at NASA. For the evaluation, the MISR products MIL2ASLS (MISR Level 2 Land Surface Data - Bidirectional Reflectance Factor-BRF) and MIANCAGP (Ancillary Geographic Product) were used. We used the following softwares: MISR_viewer and ENVI. A total of up to 44 pixels (samples) were extracted from the PET area. To avoid spectral mixture, we defined a one kilometer buffer from the forest boundary. Bidirectional reflectance factor data (BRF) of the four MISR bands were analyzed as a function of the view direction and angle. Furthermore, we additionally analyzed the patterns of vegetation indices such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Enhanced Vegetation Index (EVI). In order to allow a comparative basis among all the bands and among the vegetation indexes, the data were normalized to nadir viewing. Results showed that the backscattering direction reflectance of all the bands was higher than in the forward scattering direction. As the view angle increased toward the backscattering direction, the reflectance value increased. The opposite pattern was observed in the forward scattering direction. When normalized to the nadir viewing, the bands of green and red showed higher anisotropy. This anisotropic pattern relates to the higher solar zenith angle in the winter combined to the litter-fall of the forest dominant species. NDVI showed higher isotropy throughout the year in all view directions, when compared to the EVI. Due to its strong correlation with the near-infrared band and the shadow fraction, the EVI showed strong anisotropy, especially in the winter. Results showed the importance of considering the spectral and angular response pattern of vegetation when biophysical (Leaf Area Index) and biochemical (chlorophyll, water content) parameters estimates are object of study using data acquired by pointing-capability or large field-of-view sensors are used.

Keywords: MISR, view zenith angle, solar zenith angle, deciduous forest, monitoring

1. INTRODUÇÃO

Recentemente, diversos estudos têm sido reportados na literatura com foco na avaliação dos efeitos direcionais

e angulares sobre os espectros de reflectância da vegetação. A discussão havia sido abordada com propriedade nos anos 70 e 80 com estudos versando sobre alvos agrícolas (cultivares e substrato/solo), florestais, geológicos e água. Contudo, boa parte desses estudos refere-se a avaliações em laboratório ou com alvos de campo, enquanto que as avaliações a partir de imagens de satélite tiveram maior ênfase com o lançamento do sensor multiangular *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer* (MISR)/Terra.

A radiância detectada pelo sensor depende da geometria de iluminação e visada, da arquitetura dos dosséis, espessura da atmosfera, heterogeneidade dos pixels (mistura espectral interna), escala de observação e dos efeitos do substrato. Como a maioria dos alvos terrestres não é isotrópica ou Lambertiana, diferenças na reflectância podem estar associadas à geometria de iluminação e de visada (Myneni e Williams, 1994; Diner et al., 1999). As variações na reflectância que estão associadas à geometria de iluminação (ângulos zenital e azimutal de iluminação) e visada (ângulo zenital e azimutal de visada) são definidas por efeitos direcionais. Nesse contexto, na direção do retroespalhamento (*backscattering*) predominam elementos iluminados, enquanto que na direção do espalhamento frontal (*forward scattering*) a sombra é mais significativa. Assim, a vegetação pode apresentar, mesmo que para alvos homogêneos como grandes áreas florestais, um padrão de reflectância diferenciado, de acordo com o ângulo e direção de observação, conferindo ao alvo uma resposta espectral anisotrópica.

A anisotropia dos dosséis florestais é controlada pelas propriedades óticas dos elementos da cena e pela estrutura física e química do alvo e é determinada pela função de distribuição da reflectância bidirecional (BRDF). A radiância detectada depende do ângulo de iluminação; das características fisiológicas e morfológicas das plantas e dos dosséis; da contribuição do solo; do tipo de sensor; das características da atmosfera e da escala de coleta dos dados. Assim, compreender como esses fatores influenciam a resposta espectral de alvos florestais é importante para permitir a correta interpretação de imagens e evitar erros em estimativas de parâmetros biofísicos e bioquímicos da vegetação (p. ex. Índice de área foliar - IAF) (Kumar, 1972; Colwell, 1974; Goel, 1988; Kumar et al., 2001; Ponzoni e Shimabukuro, 2007).

Os efeitos bidirecionais em folhas têm sido estudados com medidas de laboratório (Kumar, 1972; Walter-Shea et al., 1989; Combes et al., 2007) e em dosséis através de espectralradiometria de campo (Jackson et al., 1979; Kimes et al., 1984; Ranson et al., 1985; Shibayama e Wiegand, 1985; Epiphany e Huete, 1995; Walter-Shea et al., 1997) e imagens orbitais (Pinter Jr. et al., 1990; Leroy e Roujean, 1994; Meyer et al., 1995; Privette et al., 1996; Asner et al., 1998; Hu et al., 2000; Gobron et al., 2002; Baret et al., 2007b; Galvão et al., 2009) com diferentes abordagens. Com base nesses estudos, alguns autores propuseram novos índices de vegetação, modelos de interação da radiação eletromagnética (REM) nos elementos da vegetação (folhas, hastes, troncos, substrato, etc.) e dosséis, e modelos para estimar parâmetros biofísicos da vegetação. As variações na reflectância dos dosséis agrícolas e florestais associadas à geometria de iluminação e de visada podem ser vistas como uma fonte auxiliar de informações ou como um problema que requer correção.

Com o advento de sensores com amplo campo de visada com foco no monitoramento e na estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação, as características dos sensores e a geometria de iluminação e visada (efeitos bidirecionais) passaram a interferir de forma significativa na resposta espectral do alvo (Ranson et al., 1985). O tempo de revisita é um importante parâmetro para o monitoramento da vegetação, principalmente em áreas com alto recobrimento de nuvens. Aplicações agrícolas e florestais geralmente requerem um tempo de revisita adequado à dinâmica fenológica da vegetação (tipicamente entre uma e duas semanas). Para reduzir o tempo de revisita, a resolução espacial geralmente é degradada de forma a obter uma faixa de imageamento mais ampla (Walter-Shea et al., 1997). Sensores com amplo campo de visada como o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR)/NOAA e o *Satellite Pour l'Observation de la Terre* (SPOT) – *Vegetation*, permitem imagear toda superfície terrestre em um ou dois dias. Contudo, devido ao amplo campo de visada, as distintas partes da mesma cena apresentam condições de iluminação e visada diferenciadas (Meyer et al., 1995; Diner et al., 1999; Kumar et al., 2001). Efeitos direcionais são facilmente visíveis em cenas adquiridas por sensores multiangulares como o MISR/Terra e o *Compact High Resolution Imaging Spectrometer* (CHRIS/PROBA).

Contudo, imagens multiangulares permitem a elaboração de composições coloridas falsa-cor de uma única banda (p. ex., vermelho) e vários ângulos de visada. Isto possibilita discriminar culturas com base nas informações estruturais e geométricas, estimar parâmetros biofísicos como o IAF (Chen et al., 2003). Além disso, muitos estudos sobre parâmetros da atmosfera fazem uso desses dados. Dessa forma, a geometria fora do nadir não deve ser encarada exclusivamente como um problema, mas sim também como uma fonte de informação. A partir de geometrias distintas para determinadas bandas (vermelho e infravermelho próximo), é possível alimentar modelos de transferência radiativa (modelando a radiação dentro do dossel e das folhas) para a estimativa do IAF de forma generalizada (Verhoef et al., 1984; Feret et al., 2008; Jacquemoud et al., 2008; Jacquemoud et al., 2009). Como exemplo, podemos citar o produto de IAF do MODIS e do MISR (Knyazikhin et al., 1998; Knyazikhin et al., 1999).

O Parque Estadual do Turvo, localizado no noroeste do Rio Grande do Sul, é um dos maiores fragmentos de floresta primária do sul do Brasil (SEMA, 2005; Breunig et al., 2012; Rosa et al., 2013). O PET possui uma área de aproximadamente 17.500 ha e corresponde a porção sul da floresta subtropical de Missiones – Argentina, que recobre

uma área de milhares de quilômetros quadrados no nordeste da Argentina. Dessa forma, um melhor entendimento da dinâmica dessa floresta pode contribuir significativamente para a qualificação de modelos de previsão de clima e tempo, estimativa de produtividade primária da floresta, estoque/fixação de carbono e para o próprio monitoramento desse ecossistema.

Esse trabalho visa fazer uma avaliação dos efeitos direcionais e angulares sobre a reflectância bidirecional da floresta estacional decidual do Parque Estadual do Turvo, utilizando dados do sensor MISR, MODIS e modelos de transferência radiativa de folhas e dosséis - PROSAIL.

2. METODOLOGIA

A área de estudo selecionada foi o Parque Estadual do Turvo, no noroeste do Rio Grande do Sul – Brasil (Fig. 1). O clima da região é do tipo Cfa (classificação de Köppen), denominado subtropical, com temperaturas médias do mês mais quente (janeiro) superiores a 22° C e no mês mais frio (julho) oscilando entre -3° C e 18° C. A precipitação anual é de aproximadamente 1.665 mm, bem distribuída ao longo do ano (SEMA, 2005). O relevo apresenta grandes variações de altitude (amplitude de mais de 300 m). A flora da floresta é composta por espécies como *Nectandra megapotamica*, *Alchornea triplinervia*, *Cupania vernalis*, *Luehea divaricata*, *Casearia sylvestris*, *Parapiptadenia rígida*, *Patagonula americana*, *Matayba elaeagnoides* e *Allophylus edulis* (Brack, 1985; Guadagnin, 1994; SEMA, 2005; 2010). A área é o refúgio de mamíferos ameaçados como o *Puma concolor* e o *Leopardus pardalis* (Kasper et al., 2007).

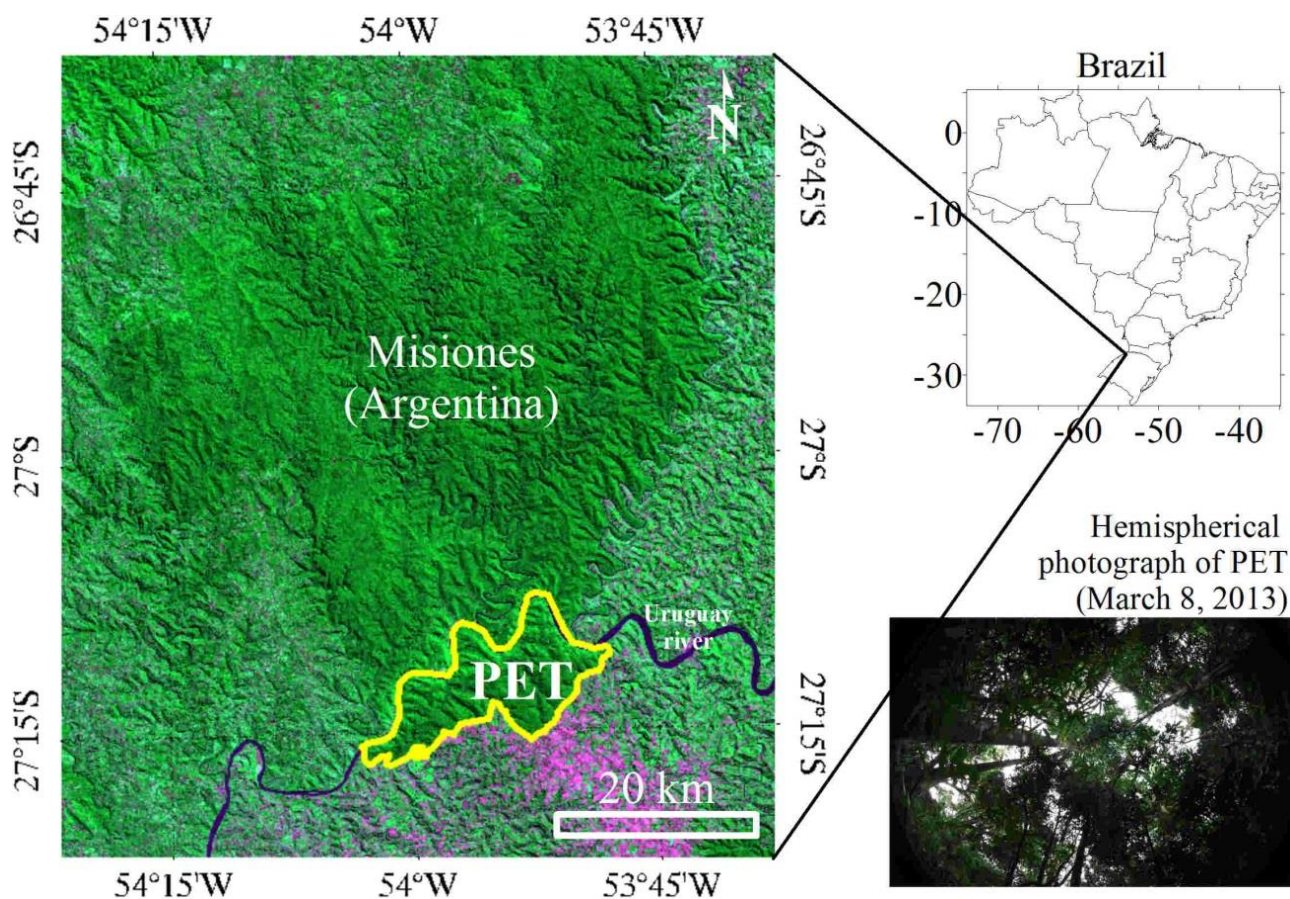


Fig. 1 - Localização da área de estudo no noroeste do Rio Grande do Sul, Brasil. Imagem do sensor OLI – Landsat-8 de 1 de junho de 2013 foi utilizada (falsa-cor). O polígono indica a área do Parque Estadual do Turvo (PET). No canto inferior direito é apresentada uma fotografia hemisférica que ilustra o tipo de dossel analisado com as imagens MISR e simulações.

Os dados do sensor MISR foram obtidos do Langley Atmospheric Sciences Data Center (<ftp://14ftl01.larc.nasa.gov>) para o período de 2000 a 2012. Os produtos MIL2ASLS (MISR Level 2 MIL2ASLS Land Surface Product) e MIANCAGP (Ancillary Geographic Product) foram utilizados e processados com o aplicativo MISR View 5.3 (JPL/NASA, 2012) e ENVI-IDL[®] (Excelis Vis, 2013). Como os dados do MISR são fornecidos para uma órbita completa, apenas o bloco 112 referente à área de estudo foi processado e corrigido geometricamente através do MIANCAGP. Dados de precipitação e temperatura foram utilizados em caráter complementar.

Para garantir que apenas pixels de boa qualidade fossem considerados, foi criada uma máscara com um *buffer* de aproximadamente dois pixels da borda. Além disso, uma inspeção visual foi feita para todas as imagens para eliminar aquelas com nuvens ou de baixa qualidade (de forma complementar ao controle de qualidade do produto).

Considerando a dinâmica sazonal da floresta, foram executadas duas campanhas de campo que incluíram a implantação de 13 parcelas de 20m x 100 m. Em sete dessas foi executado o inventário florestal de todas as árvores com mais de 10 cm de diâmetro a altura do peito (DAP > 10 cm). Para capturar a perda foliar (IAF), uma campanha foi realizada no final do inverno (setembro de 2012) onde ocorre um mínimo IAF e outra no período de maior IAF (março de 2013). Para estimar o IAF foram adquiridas fotografias hemisféricas (olho de peixe) a cada 20 metros ao longo do eixo principal das parcelas.

Como os dados do MISR são adquiridos em quatro bandas e nove ângulos de visada (Tabela 1) a análise foi executada utilizando gráficos, normalização dos dados para o nadir e cálculo de índices de vegetação como o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Rouse et al., 1972) e o Enhanced vegetation index (EVI) (Huete et al., 2002). O NDVI e EVI são calculados de acordo com as equações 1 e 2, respectivamente. A Tabela 1 ilustra as principais características de sensor MISR/Terra.

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{red}) \quad (Eq.1)$$

$$EVI = G \cdot ((\rho_{NIR} - \rho_{red})) / (\rho_{NIR} + C1 \cdot \rho_{red} - C2 \cdot \rho_{blue} + L) \quad (Eq.2)$$

onde G é um fator de escala; ρ é reflectância de superfície das bandas do MISR; L é um coeficiente de ajuste não linear do substrato, C1 e C2 representam os coeficiente de resistência dos aerossóis presentes na atmosfera. Os valores adotados no estudo foram: G = 2,5; L = 1; C1 = 6 e C2 = 7.5.

TABELA 1. CARACTERÍSTICAS DAS IMAGENS MULTIANGULARES DO SENSOR MISR/TERRA.

Fonte: Adaptado de Diner et al. (1998)

Câmera	Ângulo de visada	Direção de espalhamento	Abreviação	Resolução espacial
C1	-70,5°	Retroespalhamento	Df	1,1 km
C2	-60°	Retroespalhamento	Cf	1,1 km
C3	-45,6°	Retroespalhamento	Bf	1,1 km
C4	-26,1°	Retroespalhamento	Af	1,1 km
C5	0°	Nadir	Na	1,1 km
C6	26,1°	Espalhamento Frontal	Aa	1,1 km
C7	45,6°	Espalhamento Frontal	Ba	1,1 km
C8	60°	Espalhamento Frontal	Ca	1,1 km
C9	70,5°	Espalhamento Frontal	Da	1,1 km

As simulações para avaliar os efeitos da geometria de visada foram elaboradas com base no algoritmo PROSAIL (Verhoef et al., 1984; Feret et al., 2008; Jacquemoud et al., 2008; Jacquemoud et al., 2009). Os parâmetros de IAF e de visada do sensor foram modificados para simular as variações desempenhadas pelo MISR. Os resultados foram expressos na forma gráfica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Resultado das campanhas de campo – IAF

As estimativas de índice de área foliar (IAF) mostraram que a floresta apresenta perda de folhar na estação mais fria, conforme ilustra a Fig. 2. Para o período de máxima IAF, foi encontrado o valor médio de 3,06 ($\pm 0,93$) e para o período de perda de folhas o IAF foi de 2,75 ($\pm 0,74$). Por ser uma floresta decídua, no inverno, mais de 50% das árvores dominantes apresentam perda de folhas. A avaliação da precipitação mostrou que não existe um período seco definido na região em estudo.

Na Figura 3 são apresentadas fotografias hemisféricas obtidas no Parque Estadual do Turvo, mostrando que essa técnica pode auxiliar na caracterização de distintas formações florestais de unidades de conservação. Avaliando as

duas fotografias é evidente que o dossel irá interagir de forma distinta com a radiação eletromagnética que incidir nesses alvos. Dosséis mais homogêneos e com poucas aberturas (gaps; Fig. 3a) tendem a ser mais isotrópicos. Por outro lado, em dosséis muito abertos (Fig. 3b), com clareiras e falhas, o efeito da sombra será mais acentuado e, por consequência, mais anisotrópico. Nesse ponto é importante destacar a grande possibilidade de utilização das fotografias hemisféricas na análise dos dados de sensoriamento remoto numa perspectiva temporal. No inverno o dossel dessa área de estudo tende à apresentar maior presença de aberturas e uma redução do IAF (Fig. 2).

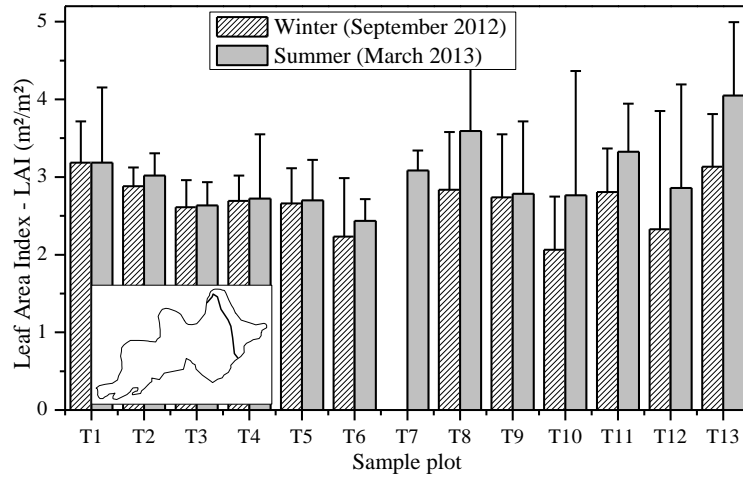


Fig. 2 - Comparação médio do índice de área foliar (LAI ou IAF) a partir de 13 parcelas fixas de 20x100 m entre as estações do verão (summer) e inverno (winter). O índice de área da planta foi estimado a partir de fotografias hemisféricas adquiridas em setembro de 2012 e março de 2013.

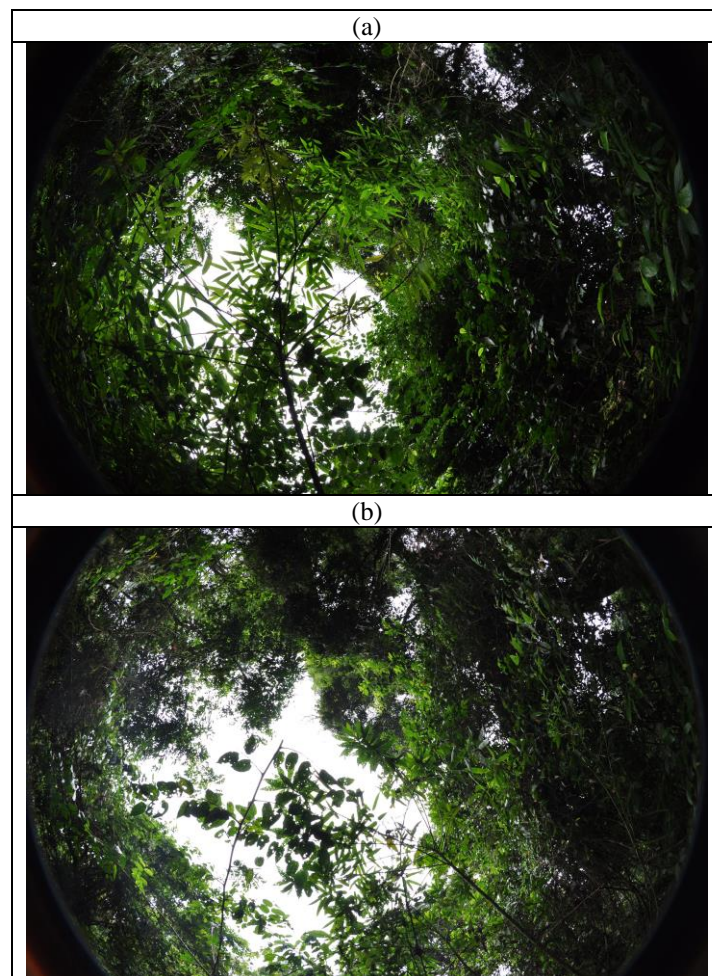


Fig. 3 - Fotografias hemisféricas obtidas no Parque Estadual do Turvo – PET, com distintas características de dossel, durante o período de (a) verão e (b) inverno.

3.2. Análise dos espectros de reflectância

A avaliação do valor absoluto do fator de reflectância bidirecional (BRF) em função do ângulo de visada mostrou que no inverno os efeitos direcionais e angulares são mais acentuados do que no verão (Figura 4). Estes resultados concordam com os maiores valores de IAF (ou LAI) estimados para o período de verão nas parcelas amostrais. Assim, à medida que o IAF aumenta, tende a ocorrer uma diminuição da anisotropia do dossel. No inverno os valores menores de BRF na direção do espalhamento frontal estão relacionados ao aumento do efeito da sombra (visto que a elevação solar é menor) (Galvão et al., 2011). Além disso, no inverno ocorre um efeito combinado da perda de folhas das espécies dominantes e aumento do ângulo zenital solar (SZA). Em todas as datas o valor do BRF na direção do retroespalhamento (ângulos negativos na Figura 4) foi maior devido a maior presença de elementos iluminados no dossel florestal em estudo.

Comparando os valores médios (12 anos de BRF) das bandas, verifica-se que para a banda do infravermelho próximo os efeitos da iluminação e visada são destacados em função da alta reflectância da vegetação nessa faixa espectral. Ainda na direção do retroespalhamento, as bandas do visível apresentaram fortes mudanças relativas do verão para o inverno. Em geral, a reflectância de todas as bandas diminuiu do verão para o inverno em função da perda de folhas e do aumento do ângulo zenital solar.

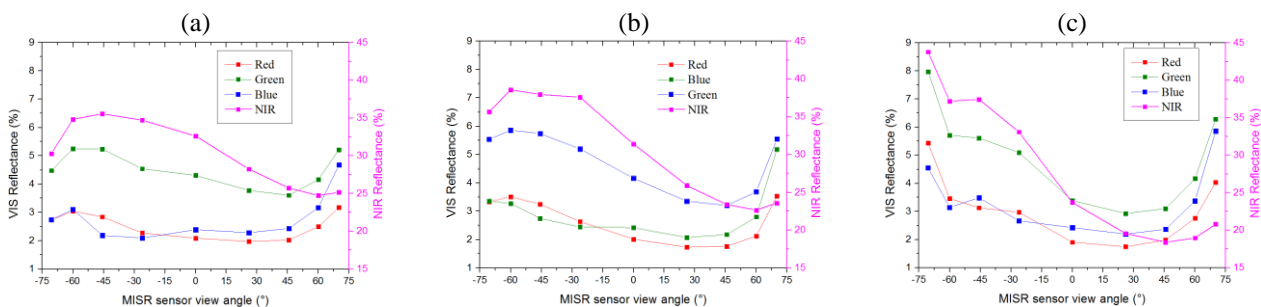


Fig. 4 – Valor médio do fator de reflectância bidirecional (BRF) do MISR para as bandas do visível (VIS) e do Infravermelho próximo (NIR) durante o (a) verão; (b) estações de transição e; (c) inverno. Os dados são referentes a média de 12 anos de imageamento do MISR na área do PET. Red = vermelho; Green = Verde; Blue=Azul ; NIR=Infravermelho próximo.

Analisando exclusivamente a reflectância da banda do infravermelho próximo (NIR) para os nove ângulos de visada do MISR durante dois anos selecionados em função da maior disponibilidade de imagens em todas as estações, verifica-se claramente a existência de dois grupos: espectros temporais do retroespalhamento e espectros temporais do espalhamento frontal (Figura 5). Nessa figura os dados de BRF obtidos em ângulos de visada extremos ($-70,5^\circ$; -60° ; 60° e; $70,5^\circ$) estão sujeitos à interferência atmosférica e a forte mistura espectral. Dessa forma, tendem a apresentar valores muito diferentes dos obtidos no nadir. Os espectros adquiridos ao nadir para os anos de 2003 (Figura 5a) e 2005 (Figura 5b) ilustram as variações do FBR ao longo do ano mediante fatores dinâmicos da floresta (perda de folhas) e variações do ângulo zenital solar. Ao analisar as imagens adquiridas ao nadir, os efeitos da geometria de visada *a priori* estariam eliminados.

A Figura 6 ilustra os dados normalizados para o nadir adquiridos em nove geometrias do MISR em função da variação do ângulo zenital solar – linha tracejada. A reflectância normalizada consiste na divisão dos valores de BRF das imagens adquiridas fora do nadir pelo BRF da imagem do nadir. Na figura os valores de reflectância normalizada para o nadir obtidos na direção do retroespalhamento estão marcados com símbolos preenchidos e os dados da direção do espalhamento frontal estão com os símbolos abertos. Os valores da reflectância normalizada para o nadir indicam o de forma relativa à variação de cada geometria de visada em relação ao nadir. *A priori*, se um espectro apresentar valores próximos a um, significa que apresenta um padrão semelhante à aquisição ao nadir.

Quando partimos para a análise, verifica-se novamente a existência de um agrupamento dos dados adquiridos na direção de retroespalhamento e do espalhamento frontal, especialmente para a banda do infravermelho próximo (NIR; Figura 6d). As bandas do azul (Blue; Figura 6a), verde (Green; Figura 6b) e vermelho (Red; Figura 6c) apresentaram maiores valores de anisotropia, visto que os valores da reflectância normalizada foram maiores. Esse resultado indica uma maior anisotropia para as bandas do visível, possivelmente a maior sensibilidade para o efeito da sombra, perda de folhas e a influência de elementos secos do dossel (por exemplo, galhos).

(a)

(b)

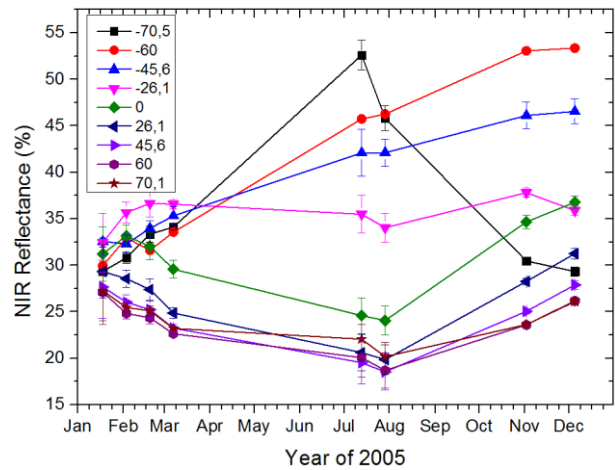
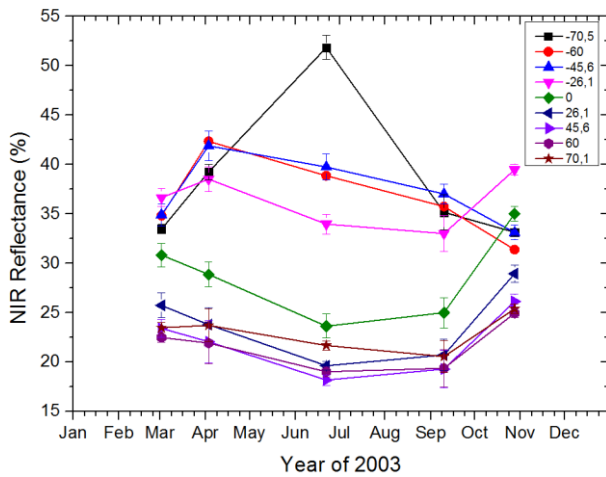


Fig. 5 – Reflectância da banda do infravermelho próximo ao longo dos anos de (a) 2003 e (b) 2005 para as distintas geometrias de aquisição do MISR. O valor zero (0) refere-se à aquisição ao nadir. Valores negativos da legenda identificam os espectros obtidos na direção do retroespalhamento.

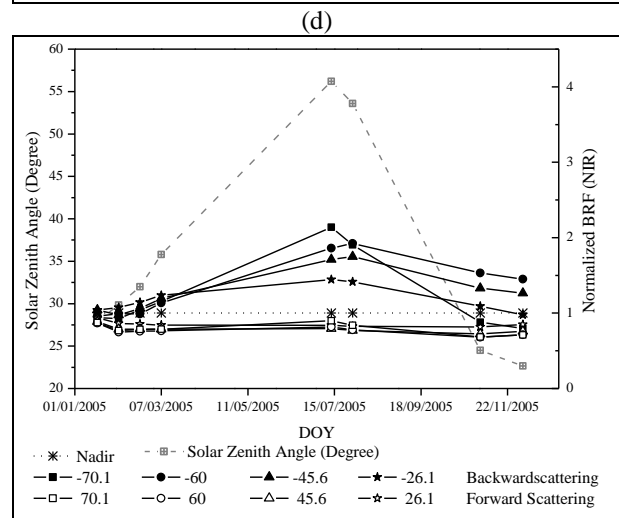
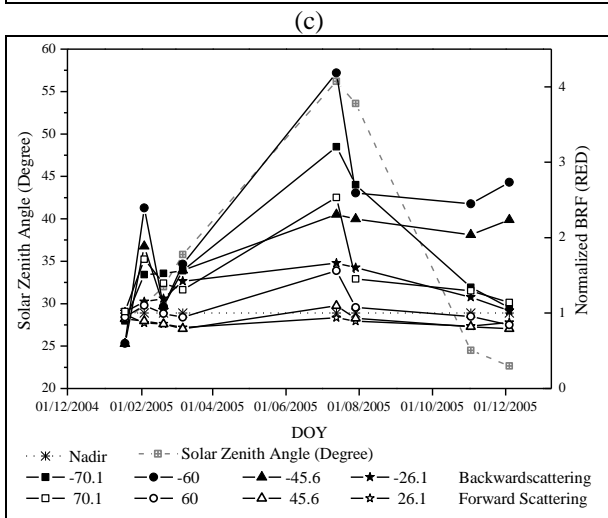
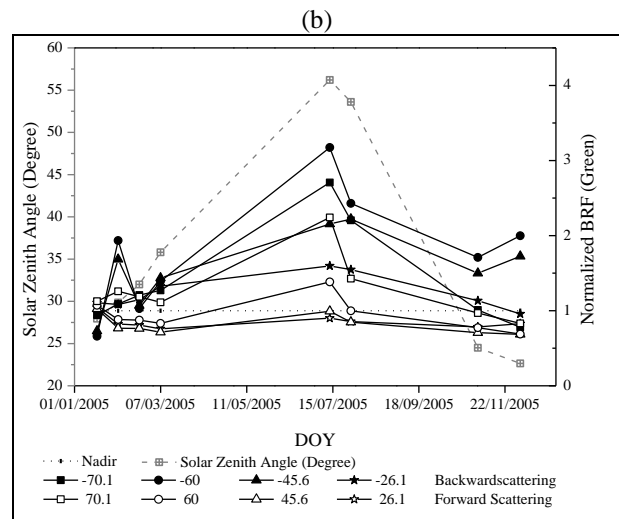
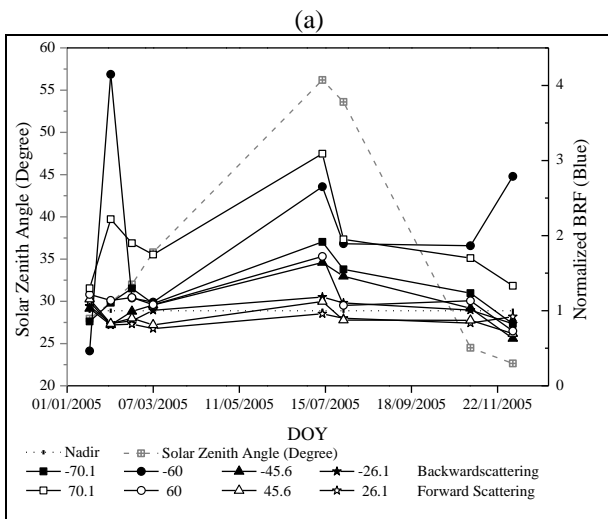


Fig. 6 – Variação do fator de reflectância bidirecional normalizado para o nadir em função do ângulo zenital solar, considerando as bandas do (a) azul; (b) verde; (c) vermelho e; (d) infravermelho próximo – NIR do MISR. O ano de 2005 foi selecionado por apresentar maior disponibilidade de imagens MISR de boa qualidade sobre a área do Parque Estadual do Turvo.

3.3. Dependência dos índices de vegetação da geometria de visada

Muitos índices de vegetação indicam uma redução dos efeitos externos devido à normalização que explora principalmente as bandas do vermelho e infravermelho. Contudo, os resultados encontrados para o NDVI (Figura 7) e EVI (Figura 8) indicam sensibilidade aos efeitos direcionais e angulares. O NDVI apresentou maior estabilidade até ângulos de visada de 46° (em ambas as direções de espalhamento). Por outro lado, para ângulos superiores, os efeitos da geometria de visada são bastante fortes. Considerando as variações anuais, verificou-se que o NDVI tende a apresentar uma anisotropia crescente do verão para o inverno.

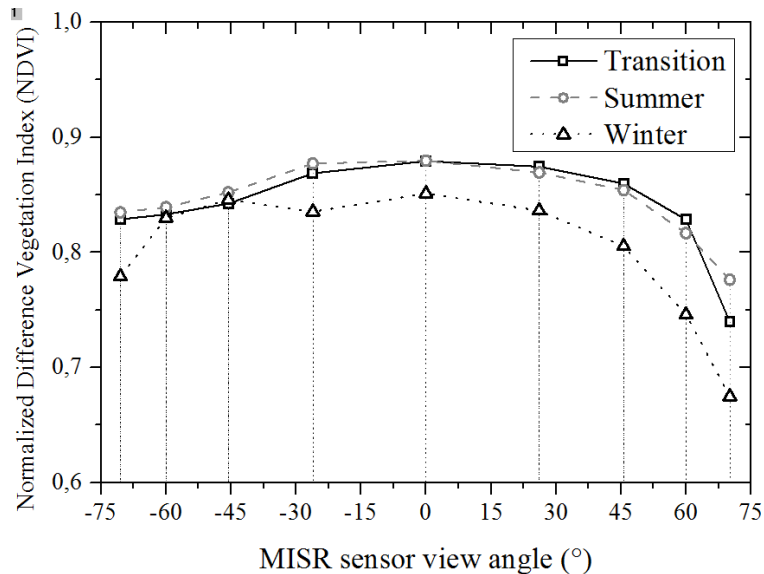


Fig. 7 – Variação do NDVI do verão para o inverno em função do ângulo zenital de visada do sensor MISR. Os dados se referem à média dos 12 anos em análise, para toda a área do Parque Estadual do Turvo (PET).

Diferente do NDVI, o EVI apresentou maior dependência do ângulo zenital de visada, conforme ilustra a Figura 8. Independente do período do ano avaliado verifica-se uma grande diferença para as direções do espalhamento. Na direção do retroespalhamento o EVI sempre foi maior que na direção do espalhamento frontal. Mesmo assim, é possível verificar que no verão, quando o ângulo zenital solar é menor e o IAF é maior, o dossel é mais isotrópico. A medida que se avança para o inverno, os efeitos combinados da perda de folhas pelo dossel e o aumento do ângulo zenital solar provocam uma aumento da anisotropia. Esse fato está relacionado especialmente à forte dependência do EVI da banda do infravermelho próximo e consequentemente da sombra.

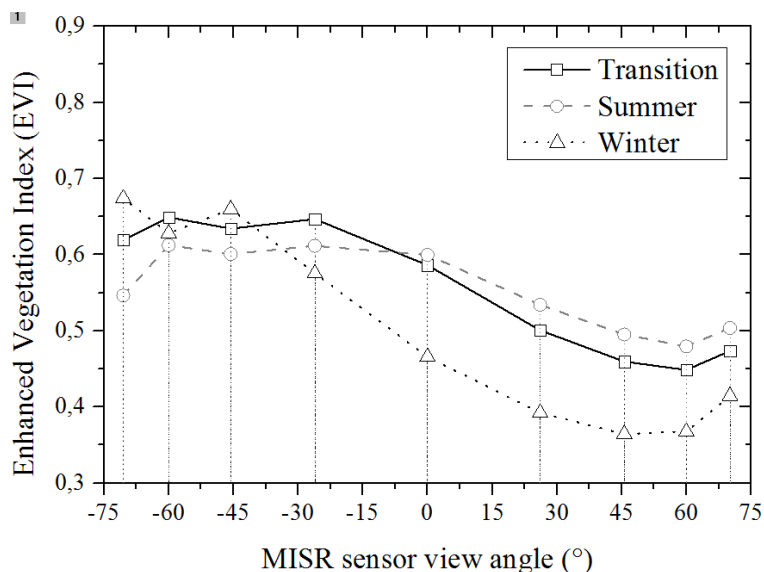


Fig. 8 - Variação do EVI do verão para o inverno em função do ângulo zenital de visada do sensor MISR. Os dados se referem à média dos 12 anos em análise, para toda a área do Parque Estadual do Turvo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados mostraram que a reflectância bidirecional da floresta do Parque Estadual do Turvo é maior na direção do retroespalhamento do que na direção do espalhamento frontal.

Em relação à anisotropia das bandas, o vermelho e verde apresentaram maior dependência da geometria de visa do que as bandas do azul e infravermelho próximo.

Na avaliação anual, verificou-se que os efeitos direcionais e angulares são mais significativos no inverno do que no verão. No inverno, o efeito combinado da perda de folhas do dossel (redução do IAF) e o aumento do ângulo zenital solar provocam alterações na quantidade de sombra “vista” pelo sensor, ocasionando uma maior anisotropia. Por outro lado, no verão, o dossel é mais isotrópico.

Em relação aos índices de vegetação, o NDVI apresentou menor sensibilidade aos efeitos do ângulo zenital de visada do que o EVI. O EVI ainda apresentou uma maior dependência da direção do espalhamento, sendo que sempre apresenta valores maiores de EVI na direção do retroespalhamento do que na direção do espalhamento frontal. Além disso, o EVI apresentou um aumento da anisotropia do verão para o inverno.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processo n° 478085/2013-3), à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (processo n° 2013/03908-3) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – bolsas de mestrado) pelo apoio financeiro. A Secretaria Estadual do Meio Ambiente – RS pelo apoio a pesquisa em campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASNER, G. P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, v.64, n.3, p.234–253, 1998.
- BARET, F.; HAGOLLE, O.; GEIGER, B.; BICHERON, P.; MIRAS, B.; HUC, M.; BERTHELO, T. B. A.; NIÑO F.; WEISS, M.; SAMAIN, O.; ROUJEAN, J. L.; LEROY, M. LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from vegetation: Part 1: Principles of the algorithm. *Remote Sensing of Environment*, v.110, n.3, p.275-286, 2007.
- BRACK, P.; BUENO, R. M.; FALKENBERG, D. B.; PAIVA, M. R. C.; SOBRAL, M.; STEHMANN, J. R. Levantamento florístico do Parque Estadual do Turvo, Tenente Portela, Rio Grande do Sul, Brasil. *Roessléria*, v. 7, n. 1, p. 69-94. 1985.
- 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.
- CHEN, J. M.; LIU, J.; LEBLANC, S. G.; LACAZE, R.; ROUJEAN, J. L. Multi-angular optical remote sensing for assessing vegetation structure and carbon absorption. *Remote Sensing of Environment*, v.84, n.4, p.516-525, 2003.
- COLWELL, J. E. Vegetation canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, v.3, n.3, p.175-183, 1974.
- COMBES, D.; BOUSQUET, L.; JACQUEMOUD, S.; SINOQUET, H.; VARLET-GRANCHER, C.; MOYA, I. A new spectrogoniophotometer to measure leaf spectral and directional optical properties. *Remote Sensing of Environment*, v.109, n.1, p.107-117, 2007.
- DINER, D. J.; BECKERT, J. C.; REILLY, T. H.; BRUEGGE, C. J.; CONEL, J. E.; KAHN, R.; MARTONCHIK, J. V.; ACKERMAN, T. P.; DAVIES, R.; GERSTL, S. A. W.; GORDON, H. R.; MULLER, J. P.; MYNENI, R. B.; SELLERS, R. J.; PINTY, B.; VERSTRAETE, M. M. Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) description and experiment overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 36, n. 4, p. 1072-1087. 1998.
- DINER, D. J.; ASNER, G. P.; DAVIES, R.; MULLER, J. P.; PINTY, B.; SCHAAF, C. B.; STROEVE, J. New directions in Earth observing: scientific applications of multiple-view-angle remote sensing. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.80, n.11, p. 2209-2228, 1999.
- EPIPHANIO, J. C. N.; HUETE, A. R. Dependence of NDVI and SAVI on sun/sensor geometry and its effect on fAPAR relationships in Alfalfa. *Remote Sensing of Environment*, v.51, n.3, p.351-360, 1995.

- EXCELIS - VIS – *Visual Information Solutions. ENVI 5.1.* Attn: Webmaster, 4990 Pearl East Circle, Boulder, CO 80301, USA. 2013.
- FERET, J.; FRANCOIS, V.; ASNER, G.; GITELSON, A.; MARTIN, R.; BIDEL, L.; USTIN, S.; LEMAIRE, G.; JACQUEMOUD, S. PROSPECT-4 and 5: Advances in the Leaf Optical Properties Model Separating Photosynthetic Pigments. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, n. 6, p. 3030–3043. 2008.
- 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* 113 (4): 846–856. 2009.
- GALVÃO, L. S.; SANTOS, J. R.; ROBERTS, D. A.; BREUNIG, F. M.; TOOMEY, M.; 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.
- GOBRON, N.; PINTY, B.; VERSTRAETE, M. M.; WIDLÓWSKI, J. L.; DINER, D. J. Uniqueness of multiangular measurements. II. Joint retrieval of vegetation structure and photosynthetic activity from MISR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.40, n.7, p.1574-1592, 2002.
- GOEL, N. S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews*, v.4, n.1, p.1-212, 1988.
- GUADAGNIN, D. L. 1994. *Zonificación del Parque Estadual do Turvo, RS, Brasil, y directivas para el plan de manejo*. Dissertação de mestrado. Universidad Nacional de Córdoba. 1994.
- HU, B.; LUCHT, W.; STRAHLER, A. H.; BARKER S. C.; SMITH, M. Surface albedos and angle-corrected NDVI from AVHRR observations of South America. *Remote Sensing of Environment*, v.71, n.2, p.119-132, 2000.
- JACKSON, R. D.; PINTER JR, P. J.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J. Wheat spectral reflectance: interactions between crop configuration, sun elevation, and azimuth angle. *Applied Optics*, v.18, n.22, p.3730-3732, 1979.
- JACQUEMOUD, S.; VERHOEF, W.; BARET, F.; BACOUR, C.; ZARCO-TEJADA, P. J.; ASNER, G. P.; FRANÇOIS, C.; USTIN, S. L. PROSPECT + SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment*, v.113, Supplement 1, p.S56-S66, 2009.
- JACQUEMOUD, S.; USTIN, S. L. Modeling Leaf Optical Properties.?" *Photobiological Sciences Online (KC Smith, Ed.) American Society for Photobiology*. 2008. Disponível em: <http://www.photobiology.info/Jacq_Ustin.html> . Acesso em 20 de março de 2014.
- JET PROPULSION LABORATORY/NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - JPL/NASA. *MISR View - Multi-angle Imaging SpectroRadiometer Display and Analysis Tool*. Version 5.3. JPL/NASA: Open Channel Foundation, 2012.
- KASPER, C. B.; MAZIM, F. D.; SOARES, J. B. G.; OLIVEIRA, T. G.; FABIÁN, M. E. Composição E Abundância Relativa Dos Mamíferos de Médio E Grande Porte No Parque Estadual Do Turvo, Rio Grande Do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Zoologia*, v. 24, n. 4, p. 1087–1100. 2007.
- KIMES, D. S.; HOLBEN, B. N.; TUCKER, C. J.; NEWCOMB, W. W. Optimal directional view angles for remote-sensing missions. *International Journal of Remote Sensing*, v.5, n.6, p.887-908, 1984.
- KNYAZIKHIN, Y.; GLASSY, J.; PRIVETTE, J. L.; TIAN, Y.; LOTSCH, A.; ZHANG, Y.; WANG, Y.; MORISETTE, J. T.; VOTAVA, P.; MYNENI, R. B.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. MODIS Leaf Area Index (LAI) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation (FPAR) Product (MOD15). *Algorithm Theoretical Basis Document*, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA, 1999.
- KNYAZIKHIN, Y.; MARTONCHIK, J. V.; MYNENI, R. B.; DINER, D. J.; RUNNING, S. W. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *Journal of Geophysical Research*, v.103, n.D24, p.32257-32276, 1998.

- KUMAR, L.; SCHMIDT, K.; DURY, S.; SKIDMORE, A. Imaging spectroscopy and vegetation science. In: VAN DER MEER, F.; DE YONG, S.M. *Imaging spectrometry: Basic principles and prospective applications*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p.111-155, 2001. v.4, ISBN: 1-4020-0194-0.
- KUMAR, R. *Radiation from plants - reflection and emission: a review*. Purdue Research Foundation. Research project n° 5543, Lafayette, Indiana, p.1-87, 1972.
- LEROY, M.; ROUJEAN, J. L. Sun and view angle corrections on reflectances derived from NOAA/AVHRR data. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.32, n.3, p.684-697, 1994.
- MEYER, D.; VERSTRAETE, M. M.; PINTY, P. The effect of surface anisotropy and viewing geometry on the estimation of NDVI from AVHRR. *Remote Sensing Reviews*, v.12 n.1, p.3-27, 1995.
- MYNENI, R. B.; WILLIAMS, D. L. On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment*, v.49, n.3, p.200-211, 1994.
- PINTER JR, P. J.; JACKSON R. D.; MORAN, M. S. Bidirectional reflectance factors of agricultural targets: A comparison of ground-, aircraft-, and satellite-based observations. *Remote Sensing of Environment*, v.32, n.2-3, p.215-228, 1990.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. *Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação*. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 135 p.
- PRIVETTE, J. L.; EMERY, W. J.; SCHIMEL, D. S. Inversion of a vegetation reflectance model with NOAA AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, v.58, n.2, p.187-200, 1996.
- RANSON, K. J.; BIEHL, L. L.; BAUER, M. E. Variation in spectral response of soybean with respect to illumination, view and canopy geometry. *International Journal of Remote Sensing*, v.6, n.12, p.1827-1842, 1985.
- ROSA, P. A.; BREUNIG, F. M.; BALBINOT, R.; GALVÃO, L. S. 2013. “Dinâmica Da Floresta Do Parque Estadual Do Turvo Com Índices de Vegetação”. *Floresta E Ambiente*, v. 20, n. 4, p. 487–499. 2013.
- SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – RS (SEMA). Inventário Florestal: Floresta Estacional Decidual. Disponível em: < <http://www.sema.rs.gov.br/default.asp> >. Acesso em 16 out. 2010.
- SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – RS (SEMA). O Plano de Manejo do Parque Estadual do Turvo - RS. Porto Alegre: SEMA, 2005. Disponível em: < www.sema.rs.gov.br/upload/Plano_manejo_PETurvo.pdf >. Acesso em 16 out. 2010.
- SHIBAYAMA, M.; WIEGAND, C. L. View azimuth and zenith, and solar angle effects on wheat canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, v.18, n.1, p.91-103, 1985.
- VERHOEF, W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, v.16, n.2, p.125-141, 1984.
- WALTER-SHEA, E. A.; NORMAN, J. M. Leaf bidirectional reflectance and transmittance in corn and soybean. *Remote Sensing of Environment*, v.29, n.2, p.161-174, 1989.
- WALTER-SHEA, E. A.; PRIVETTE, J.; CORNELL, D.; MESARCH, M. A.; HAYS, C. J. Relations between directional spectral vegetation indices and leaf area and absorbed radiation in Alfalfa. *Remote Sensing of Environment*, v.61, n.1, p.162-177, 1997.