

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N^o 67/7: 1371-1390
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

INFLUÊNCIA DA CORREÇÃO ATMOSFÉRICA NA CONVERSÃO DOS DADOS DE RADIÂNCIA PARA REFLECTÂNCIA PARA O CÁLCULO DO EVI EM IMAGEM RAPIDEYE

Influence of Atmospheric Correction in the Conversion of Radiance to Reflectance Data on EVI Calculation in RapidEye Image

Alexandre Assis Carvalho & Gustavo Macedo de Mello Baptista

Universidade de Brasília – UnB
Instituto de Geociências e Centro de Estudos Avançados Multidisciplinares
Campus Darcy Ribeiro, ICC, Ala Norte, Caixa Postal 04465, CEP: 70919-970, Brasil
alexandreassis.1@gmail.com, gmbaptista@unb.br

Recebido em 25 de Dezembro, 2014/ Aceito em 06 de Junho, 2015
Received on December 25, 2014/ Accepted on June 06, 2015

RESUMO

O objetivo deste estudo foi comparar os efeitos da conversão de radiância para refletância de superfície por meio da correção atmosférica usando o modelo de transferência radiativa MODTRAN-4, por meio da função FLAASH, e a refletância no topo da atmosfera (TOA – *Top Of Atmosphere*), banda a banda, da cena RapidEye Ortho - nível 3A, no cálculo do Índice de Vegetação Melhorado (EVI - *Enhanced Vegetation Index*). Foram avaliados seis alvos: água, área urbana, solo exposto, mata de galeria, vegetação campestre e vegetação de cerrado. Para efeito de comparação, utilizou-se a ferramenta `quick_diff_stats`, cujos resultados são uma imagem com a diferença entre os números digitais das imagens processadas e um arquivo de texto contendo a frequência de distribuição (simples e acumulada) para cada valor de diferença de pixel dos números digitais, além de sua porcentagem correspondente. Procedeu-se a regressão linear nos dados EVI e aplicou-se o teste de normalidade de D'Agostino-Pearson. Para os dados com distribuição normal, calculou-se a correlação de Pearson e para os não-paramétricos, correlação de Kendall. Para avaliar a correção atmosférica, após a aplicação do módulo `quick_diff_stats`, os valores positivos indicaram predominância da correção atmosférica FLAASH e valores negativos, da refletância TOA. Nas bandas 1, 2 e 3 a refletância TOA predominou sobre o método FLAASH, enquanto nas bandas 4 e 5 houve o inverso, ou seja, a predominância do FLAASH. Para avaliar o índice espectral EVI, quatro pares de resultados foram comparados: 1) EVI a partir do FLAASH e da refletância TOA, calculados utilizando a banda do vermelho; 2) EVI FLAASH e TOA, obtidos utilizando a banda da borda do vermelho; 3) EVI FLAASH, calculado com a banda do vermelho e EVI FLAASH, com a borda do vermelho; 4) EVI TOA, calculado com a banda do vermelho, e EVI TOA, com a banda da borda do vermelho. Todas as comparações indicaram alta correlação, independentemente de haver normalidade. Os resultados obtidos mostraram que não houve diferença significativa entre o EVI calculado com e sem correção atmosférica. Além disso, concluiu-se que os resultados obtidos a partir do EVI calculado com a banda do vermelho foram superiores aos calculados a partir da banda da borda do vermelho.

Palavras chaves: Topo da Atmosfera, `Quick_diff_stats`, Banda da Borda do Vermelho.

ABSTRACT

The aim of this study was to compare the effects of the reduction of radiance to scaled surface reflectance by means of atmosphere correction using the radiative transfer model (FLAASH) and the reflectance at the top of the atmosphere (TOA), band to band, to Ortho - Level 3A scene of RapidEye, on Enhanced Vegetation Index (EVI). We considering six targets: water, urban, bare soil, gallery forest, field vegetation and savanna vegetation. For comparison, we used the method `quick_diff_stats`, whose results are one image with the difference between digital numbers of worked images and a text file containing the frequency of distribution (single and cumulative) for each pixel difference value of digital numbers and their corresponding percentage. We adjusted a linear regression on EVI's data and applied the D'Agostino-Pearson normality test. For normal data, we calculated the Pearson correlation coefficient and for non-parametric data, we used the Kendall correlation coefficient. To evaluate the atmospheric correction, positive values indicate predominance of FLAASH atmospheric correction and negative values, the TOA method. In bands 1, 2 and 3 the TOA reflectance overlapping FLAASH method, while in bands 4 and 5 was the reverse (FLAASH predominance). To evaluate EVI, we compared four pairs: EVI from FLAASH and EVI from TOA, using red band; EVI from FLAASH and EVI from TOA, using red-edge band; EVI from FLAASH, using red band, and EVI from FLAASH, using red-edge band; and EVI from TOA, using red band, and EVI from TOA, using red-edge band. All comparisons indicated high correlation, despite of normality. Results showed that atmospheric correction is unnecessary to calculate EVI, and the red band was better than red-edge band to use EVI.

Keywords: Top of the Atmosphere, `Quick_diff_stats`, Red-edge Band.

1. INTRODUÇÃO

A extração e modelagem de parâmetros biofísicos com dados de sensoriamento remoto tem sido feita desde 1960, com grande foco, principalmente, nos índices de vegetação (JENSEN, 2009). Esses índices são medidas radiométricas adimensionais que envolvem, geralmente, a relação ou combinação linear de porções do espectro vermelho e infravermelho (TUCKER, 1979; HUETE *et al.*, 1994; HUETE, 1988) e indicam abundância relativa, atividade fotossintética da vegetação verde, índice de área foliar (IAF), cobertura, teor de clorofila, biomassa, radiação fotossinteticamente ativa (TUCKER, 1979; SELLERS, 1985; GOWARD; HUENNRICH, 1992; JENSEN, 2009).

Por meio desses índices é possível trabalhar, entre outras possibilidades, com segurança alimentar, produção agrícola e probabilidade de ocorrência de incêndios (HUETE *et al.*, 1994) e uma enorme variedade de aplicações (CARVALHO *et al.*, 2008; JIANG *et al.*, 2008).

Contudo, existem importantes limitações que restringem sua utilização: fatores externos como ação da atmosfera, geometrias de visada e de iluminação; influência do solo; e as propriedades estruturais e ópticas da vegetação (HUETE *et al.*, 1994). Vários índices foram elaborados até o final da década de 1970 (i.e. TUCKER, 1979) e tantos outros têm sido

propostos visando minimizar essas influências na refletância da vegetação. O Índice de Vegetação Melhorado (EVI - *Enhanced Vegetation Index*) (HUETE *et al.*, 1997a) é destacado como um dos principais disponíveis na literatura (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

Esse índice, que busca otimizar o sinal da vegetação (HUETE *et al.*, 1997a), reduz a influência do sinal do solo e da atmosfera sobre a refletância do dossel (HUETE *et al.*, 1997b; HUETE *et al.*, 1999; HUETE *et al.*, 2002; PONZONI; SHIMABUKURO, 2010). Têm-se nele, por exemplo, dois coeficientes para correção do efeito de aerossóis na atmosfera, usando a banda azul para corrigir esse efeito na banda do vermelho (HUETE *et al.*, 1994; HUETE *et al.*, 2002). Assim o EVI, tende a ter, em regiões de floresta, valores mais baixos com o objetivo de evitar a saturação em áreas de elevada biomassa (HUETE *et al.*, 2002).

Espera-se que haja a compensação e a atenuação dos efeitos atmosféricos por meio da correção atmosférica (ANTUNES *et al.*, 2012; LATORRE *et al.*, 2002; MATTHEW *et al.*, 2002), para que se possa proceder corretamente a caracterização espectral dos alvos distribuídos na superfície terrestre.

Assim sendo, este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos no cálculo de EVI com dados de refletância no topo da atmosfera (TOA - *Top Of Atmosphere*) e de superfície por

meio de imagens RapidEye.

Para tal, foram necessários converter os valores dos números digitais (NDs) em radiância no topo da atmosfera e, a partir desses dados, gerar um novo conjunto de dados de reflectância TOA e de reflectância de superfície, por meio da correção atmosférica pelo modelo de transferência radiativa MODTRAN-4 disponibilizado na Função *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH).

2. METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido utilizando-se dados RapidEye Ortho - Level 3A, de 07 de setembro de 2014 e todas as etapas metodológicas são descritas a seguir.

2.1 Área de estudo

A área de estudo foi composta por uma região que se refere a parte do território do Distrito Federal, abrangendo a área do Parque Nacional de Brasília e o adensamento urbano que o margeia. Além disso, tem-se nela a Floresta Nacional de Brasília, gleba 1 (Figura 1).

O RapidEye é uma constelação de cinco satélites, com 7 anos de vida útil, em uma órbita de 630 km. Suas imagens são ortorretificadas com cobertura de 25x25 km. A resolução espacial é de 5 metros e a radiométrica de 16 bits. Conta com cinco bandas espectrais: azul (440-510 nm), verde (520-590 nm), vermelho (630-685 nm), borda do vermelho (690-730 nm) e infravermelho próximo (760-850 nm). O datum horizontal é o WGS84 e a projeção, Universal Transversa de Mercator (UTM) (BLACKBRIDGE, 2014). Seus números digitais representam valores proporcionais aos da radiância no topo da atmosfera (TOA).

2.2 Conversão dos NDs para radiância e posterior conversão para reflectância de superfície e TOA

Para a conversão dos NDs para a reflectância tanto de superfície, como no topo da atmosfera, é necessário, primeiro convertê-los para radiância TOA. Para tal, é necessária a aplicação do fator de correção de escala radiométrica 0,01, pois os valores de ND (Bs LreAprCKesBeRntIaDm GE1/ , 100 20da1 4uni). dade $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$ (BLACKBRIDGE, 2014).

Após esse procedimento, os dados foram convertidos para a reflectância de superfície, por meio da correção dos efeitos atmosféricos de absorção de gases e aerossóis, bem como do espalhamento oriundo da interação da radiação eletromagnética com os componentes da atmosfera (LATORRE *et al.*, 2002).

No presente estudo, utilizou-se o *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH) (RUDJORD; TRIER, 2012). Trata-se de uma função que se no código de transferência radiativa MODTRAN4+. Sua capacidade para correção atmosférica é elevada, e pode tratar tanto de imagens multiespectrais quanto hiperespectrais. Traz, em si, a possibilidade de se corrigir vários aspectos como: vapor d'água, oxigênio, dióxido de carbono, metano, ozônio, espalhamento de aerossol e outros efeitos adjacentes.

Utilizou-se altitude média do terreno de 1 km; modelo atmosférico tropical; modelo de aerossol rural, com parâmetros estipulados por Kaufman e Tanré. Todos os demais parâmetros adicionais ficaram no padrão.

Já para a redução da radiância para a reflectância do topo da atmosfera, sem correção atmosférica, adotou-se a equação 1.

$$\text{Ref TOA} (i) = \text{Rad TOA} (i) \frac{\pi \times (\text{SunDist})^2}{\text{IEA} (i) \times \cos(\text{zênite solar})}$$

onde: Ref TOA = reflectância no topo da atmosfera; Rad TOA: radiância no topo da atmosfera; i: número da banda espectral; SunDist: distância Terra-Sol no dia de aquisição em unidades astronômicas (disponível nos metadados); IEA: Irradiância Exo-Atmosférica; Zênite solar: ângulo expresso em graus (= 90° – ângulo de elevação solar).

Para o RapidEye os valores de IEA para cada uma das 5 bandas são:

Azul: 1997,8 W/m²μm

Verde: 1863,5 W/m²μm

Vermelho: 1560,4 W/m²μm

Borda do vermelho: 1395,0 W/m²μm

NIR: 1124,4 W/m²μm.

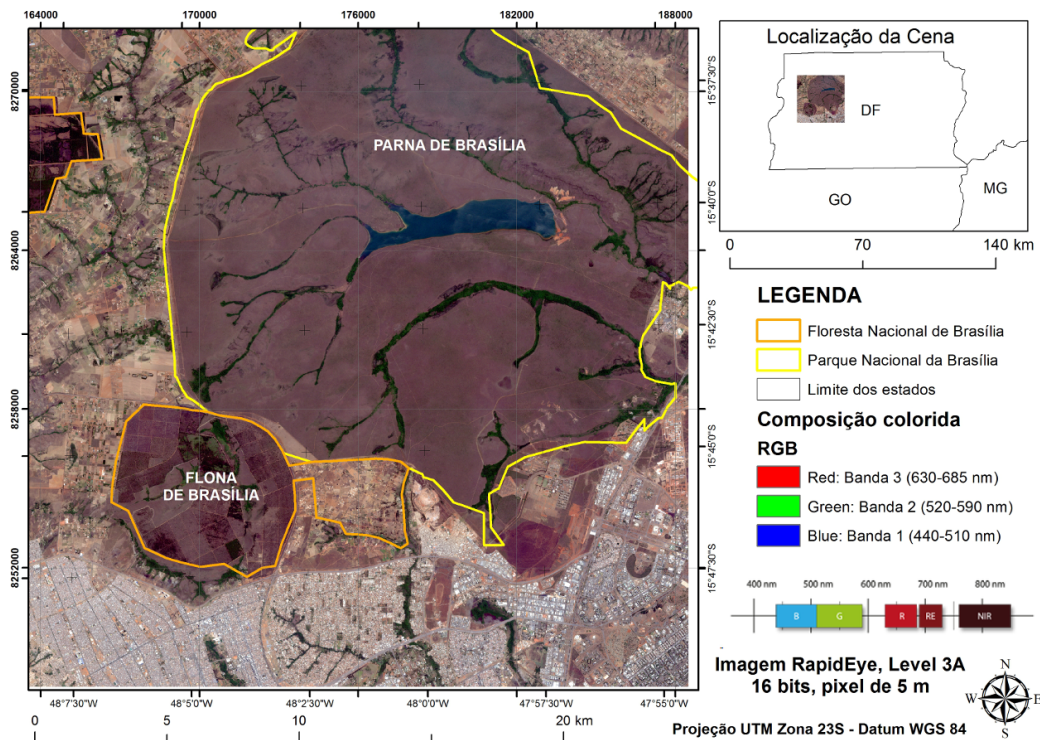


Fig. 1 - Composição colorida R3G2B1, destacando a localização da cena de estudo, com evidência do Parque Nacional (PARNA) de Brasília e de parte (gleba 1) da Floresta Nacional (FLONA) de Brasília.

2.3 Grau de similaridade

David Gorodeztky desenvolveu uma função denominada por *quick_diff_stats* – escrita em linguagem IDL e disponível no sítio na Research Systems – cuja aplicação se dá em duas fases: a primeira, com a subtração matemática entre as imagens; e a segunda, com o cálculo de valores estatísticos descritivos.

O resultado é dado por uma imagem com a diferença entre os números digitais das imagens trabalhadas e por um arquivo texto contendo a distribuição de frequência (simples e acumulada) dos pixels para cada valor de diferença dos números digitais, além da correspondente porcentagem (BAPTISTA, 2003).

Neste trabalho, procedeu-se com a diferença do método FLAASH pelo TOA, sendo todos os valores positivos indicativos de predominância do FLAASH; todos os valores nulos como similaridade máxima; e todos os valores negativos, predominância do TOA.

2.4 Processamento dos dados

Após o pré-processamento, foi aplicado o *Enhanced Vegetation Index* (EVI) aos dados (equação 2).

$$EVI = \frac{G \times (\rho_{NIR} - \rho_{Red})}{(\rho_{NIR} + (C1 \times \rho_{Red} - C2 \times \rho_{Blue}) + L)} \quad (2)$$

onde: G = fator de ganho (2,5); ρ_{NIR} = refletância na banda do infravermelho próximo (0,7-1,1 μ m); ρ_{RED} = refletância na banda do vermelho (0,6-0,7 μ m); ρ_{Blue} = refletância na banda do azul (0,45-0,52 μ m); C1=correção atmosférica para o vermelho (6); C2=correção atmosférica para o azul (7,5); e L= fator de ajustamento para o solo (1).

Individualmente, a reflexão da radiação eletromagnética pelas folhas varia conforme sua composição química e estrutura interna. Todavia, nos dosséis a dependência se dá, sobretudo, pela quantidade de folhas e arquitetura desse dossel (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

Nesse contexto, a refletância do solo apresenta forte influência. Por essa razão, o ajustamento considerando o solo é de extrema relevância, haja vista o grande número de desertos, tundras, pastagens, composições arbustivas, savanas, regiões pantanosas, além de inúmeras áreas de florestas abertas existentes em todo o planeta (HUETE *et al.*, 2002).

Tendo em vista que, além da banda

do vermelho o RapidEye apresenta a banda correspondente à borda do vermelho, o EVI foi calculado a partir da correção atmosférica do FLAASH utilizando-se as duas bandas, sendo um resultado obtido a partir da utilização na variável ρ_{RED} da banda 3 (vermelho) e outro com a banda 4 (borda do vermelho); e a partir da imagem no topo da atmosfera (TOA), também um resultado para as bandas 3 e 4.

2.5 Interpretação e comparação da similaridade

O resultado oriundo da conversão para a refletância de superfície pelo FLAASH foi comparado ao da redução para a refletância TOA, por meio da diferença entre eles, calculado pela extensão `quick_diff_stat`, no Envi 5.

Para tanto, observaram-se as diferenças entre reflectância de superfície e no topo da atmosfera em cinco alvos distintos: água, mata de galeria, vegetações de cerrado e campo, adensamento urbano e solo exposto. Esse procedimento foi realizado banda a banda e posteriormente as imagens EVI.

Tanto o aspecto visual das imagens (tonalidade do cinza) quanto os valores plotados nos histogramas deram base para comparar as respostas obtidas para cada banda da imagem RapidEye.

Ainda para verificar essas diferenças foram obtidos espectros médios de 100 x 100 pixels dos seis alvos, pois, separou-se Campo de Cerrado. Foi construída uma biblioteca espectral com os espectros de reflectância de superfície, como no topo da atmosfera. Além disso, foi realizada a diferença entre o espectro obtido por meio do FLAASH e o TOA. Os três espectros foram plotados e as diferenças analisadas, em termos percentuais.

Assim, como feito entre as imagens resultados da correção FLAASH e da refletância TOA, as imagens de EVI também foram comparadas por meio da extensão `quick_diff_stat`.

Os quatro pares em análise foram: 1) EVI a partir do FLAASH e da reflectância TOA, calculados utilizando a banda do vermelho; 2) EVI FLAASH e TOA, obtidos utilizando a banda da borda do vermelho; 3) EVI FLAASH, calculado com a banda do vermelho e EVI FLAASH, com a borda do vermelho; 4) EVI

TOA, calculado com a banda do vermelho, e EVI TOA, com a banda da borda do vermelho.

2.6 Comparação e análise estatística dos dados de EVI

Compararam-se, entre si, os quatro pares de resultados descritos no item 2.5. Sequencialmente, foram coletadas amostras (pixels) de seis alvos (água, mata de galeria, vegetação de cerrado, vegetação campestre, adensamento urbano e solo exposto), de forma que houvesse correspondência entre o pixel de uma imagem e o da outra, para comparação aos pares. Do total de pixels para cada alvo, foram separados 20% para validação.

Por se tratarem de alvos com mais de 50 amostras, foi feito, inicialmente, o teste de normalidade de D'Agostinho-Pearson, com nível de significância de 0,0001, utilizando-se o programa BioEstat 5.

Quando encontrado o valor de K_2 maior ou igual ao tabelado, rejeitou-se a hipótese inicial (H_0), ou seja, os dados não apresentaram distribuição normal. Sendo assim, calculou-se os coeficientes de correlação de Kendall (τ), cuja aplicação se dá para dados não-paramétricos (H_1). Em se tratando daqueles com distribuição normal (H_0), procedeu-se com o cálculo dos coeficientes correlação de Pearson (r).

Para cada amostra foi feita uma regressão linear com intuito de se encontrarem os coeficientes de determinação (R^2), posteriormente utilizados para validação dos dados (em 20% das amostras). Para os dados de validação, também foram feitos cálculos de normalidade e de correlação, como supracitado.

Por fim, aplicou-se o teste de normalidade D'Agostino-Pearson para todo o conjunto de dados, sem distinção dos alvos, utilizados para validação. Calculou-se, por fim, a correlação conforme o aceite (Pearson) ou recusa (Kendall) de acordo com a aceitação ou rejeição da hipótese inicial.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a aplicação de todas as etapas metodológicas supracitadas, os resultados foram obtidos seguindo, primeiro, a análise de similaridade banda a banda, seguida da análise do EVI com dados de reflectância corrigidos para os efeitos atmosféricos e obtidos para o topo da atmosfera.

3.1 Análise de Similaridade Banda a Banda

As imagens de refletância, tanto de superfície como no topo da atmosfera, utilizadas neste estudo se apresentaram semelhantes, no entanto vale destacar algumas nuances que distinguem a refletância de superfície da TOA.

Para a banda 1 (azul) (Figura 2), os valores se apresentaram majoritariamente no intervalo negativo – como visto no histograma gerado no quick_diff_stat –, o que significa dizer que a refletância TOA, de forma geral, foi maior para os alvos analisados

A água tanto quanto as vegetações campo/cerrado apresentaram tonalidades médias de

cinza, o que caracteriza similaridade entre as imagens.

A vegetação arbórea, bem representada por matas de galeria, basicamente no interior do Parque Nacional, teve o mesmo comportamento, contudo com valores mais baixos.

O solo exposto, bem como observado na água e nos estratos vegetais, também revelou a refletância TOA com valores maiores que a correção pelo FLAASH. Ressalta-se, no entanto, tonalidades mais claras que os alvos citados.

A área urbana, diferentemente dos demais alvos, foi, na banda 1, o único alvo com valores positivos, indicativos de a refletância FLAASH ter sido maior que a TOA.

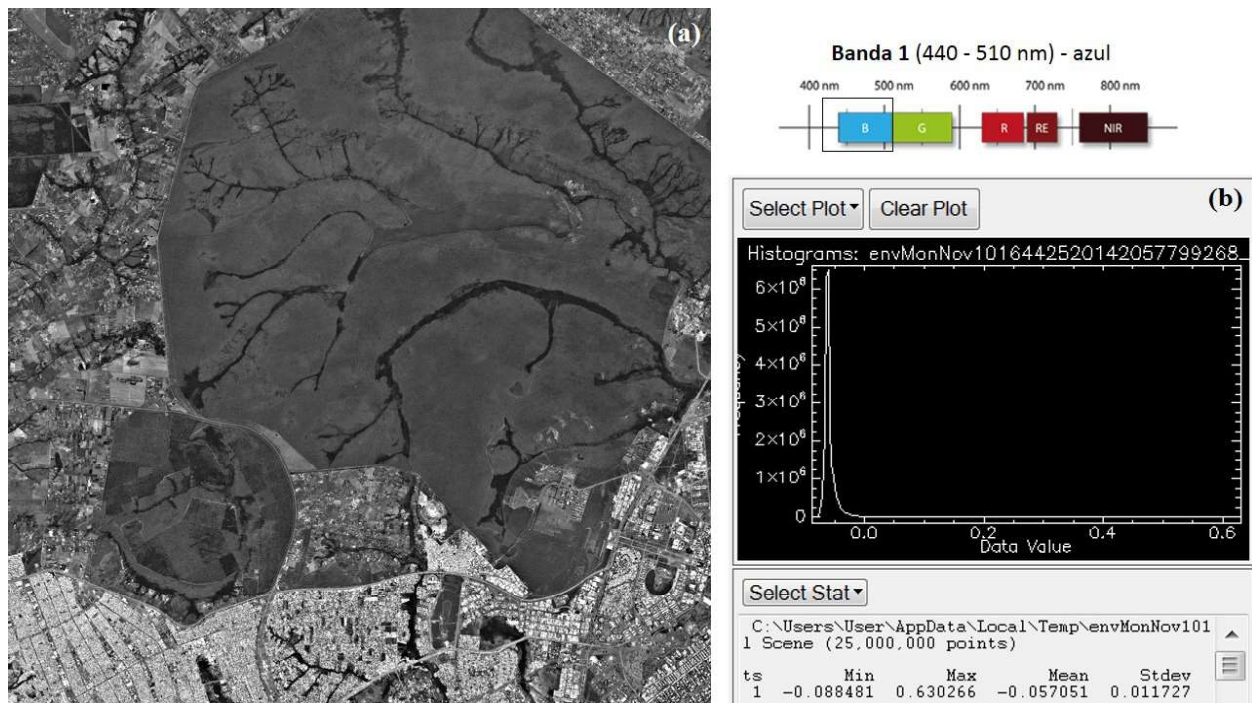


Fig. 2 - a) diferença entre refletâncias de superfície FLAASH e TOA para a banda 1 (azul), do RapidEye; b) histograma quick_diff_stat com variação dos valores de subtração para a banda 1.

A banda 2 (verde) guardou certa semelhança com os resultados observados na banda 1 (Figura 3). Entretanto existe diferença na individualização dos alvos, além de o histograma indicar a presença de valores positivos, mesmo que a média ainda tenha sido negativa. A água mostrou valores mais escuros que na banda 1, embora tenha havido pequena variação entre ambas. O mesmo foi observado no tocante aos estratos vegetais. O estrato da mata de galeria pôde ainda ser diferenciado das vegetações de campo/cerrado por apresentar tonalidade mais

escura. O solo exposto, ao contrário da banda 1, indicou a refletância da correção pelo método FLAASH como maior que a refletância TOA para algumas regiões

Na banda 3 (vermelho) a diferença entre as refletâncias pôde ser melhor observada quando comparada aos resultados das bandas 1 e 2. Acrescido a isso, tem-se o histograma com maior presença de valores positivos (Figura 4). A água e a mata de galeria se apresentaram com valores mais escuros, distinguindo-se melhor das vegetações de campo/cerrado, cuja tonalidade de

cinza (média) apontou para maior similaridade entre as imagens subtraídas. O solo exposto acompanhou a tendência de positivação dos resultados indicados na banda 1 para a banda 2, sendo – na banda 3 – a presença desse alvo com

tonalidades bem mais esbranquiçada, reforçando a correção pelo FLAASH com maior resposta que refletância do topo da atmosfera. As áreas urbanas continuam com a mesma resposta observada nas bandas supramencionadas.

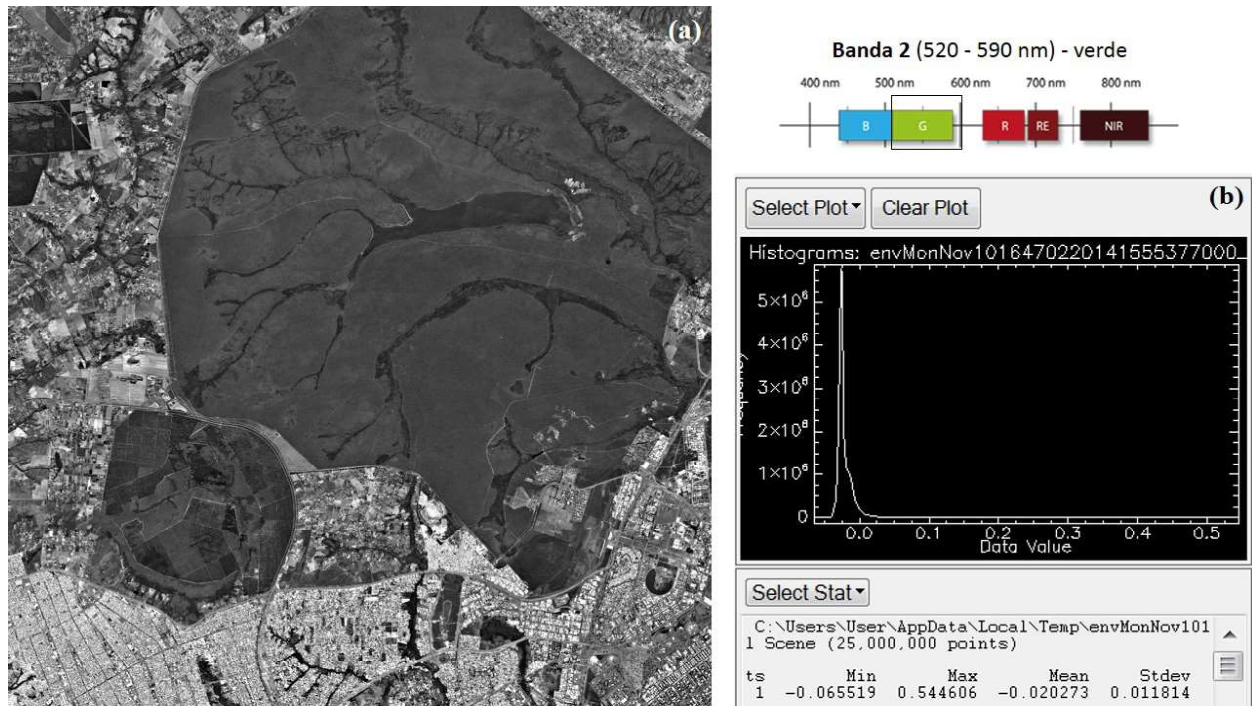


Fig. 3 - a) diferença entre refletâncias de superfície FLAASH e TOA para a banda 2 (verde); b) histograma com variação dos valores de subtração para a banda 2.

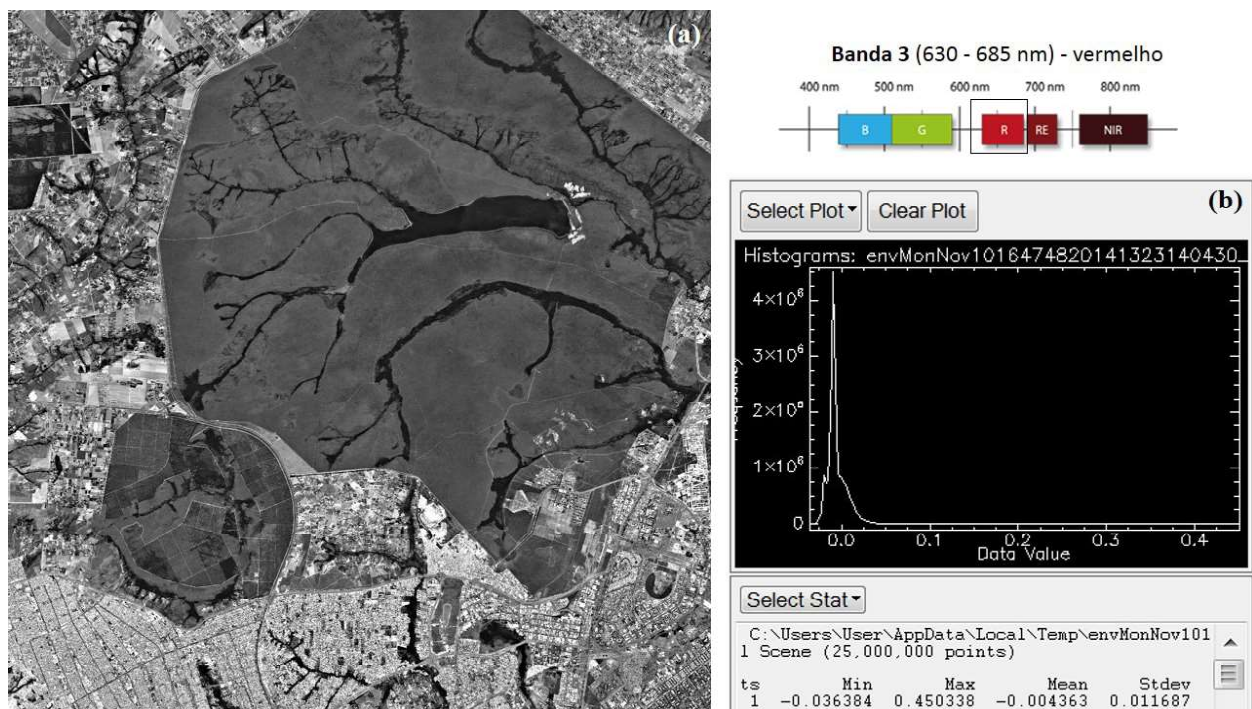


Fig. 4 - a) diferença entre refletâncias de superfície FLAASH e TOA para a banda 3 (vermelho); b) histograma com variação dos valores de subtração para banda 3.

No que tange a banda 4 (borda do vermelho), os valores passaram, de forma geral, a ser positivos, como aponta o histograma (Figura 5). A água, ao contrário do que se percebeu nos resultados da banda 1, foi melhor discretizada da vegetação de campo/cerrado, mas essa vegetação assemelhou-se bastante à vegetação de mata. Em todos eles a refletância no topo da atmosfera foi maior que a da correção pelo método FLAASH. Em se tratando de solo exposto e de área urbana, a refletância pelo FLAASH foi maior que a TOA,

sendo a diferença até o dobro da observada na banda 3.

A banda 5 (infravermelho próximo), como na banda 4, teve prevalência de valores positivos, como atestado pelo histograma, todavia com maior intervalo (Figura 6). Tanto a água quanto a área urbana mantiveram a variação observada nas outras bandas, ou seja, respectivamente TOA maior que FLAASH e FLAASH maior que TOA. O solo exposto revelou valores similares aos obtidos para banda 4.

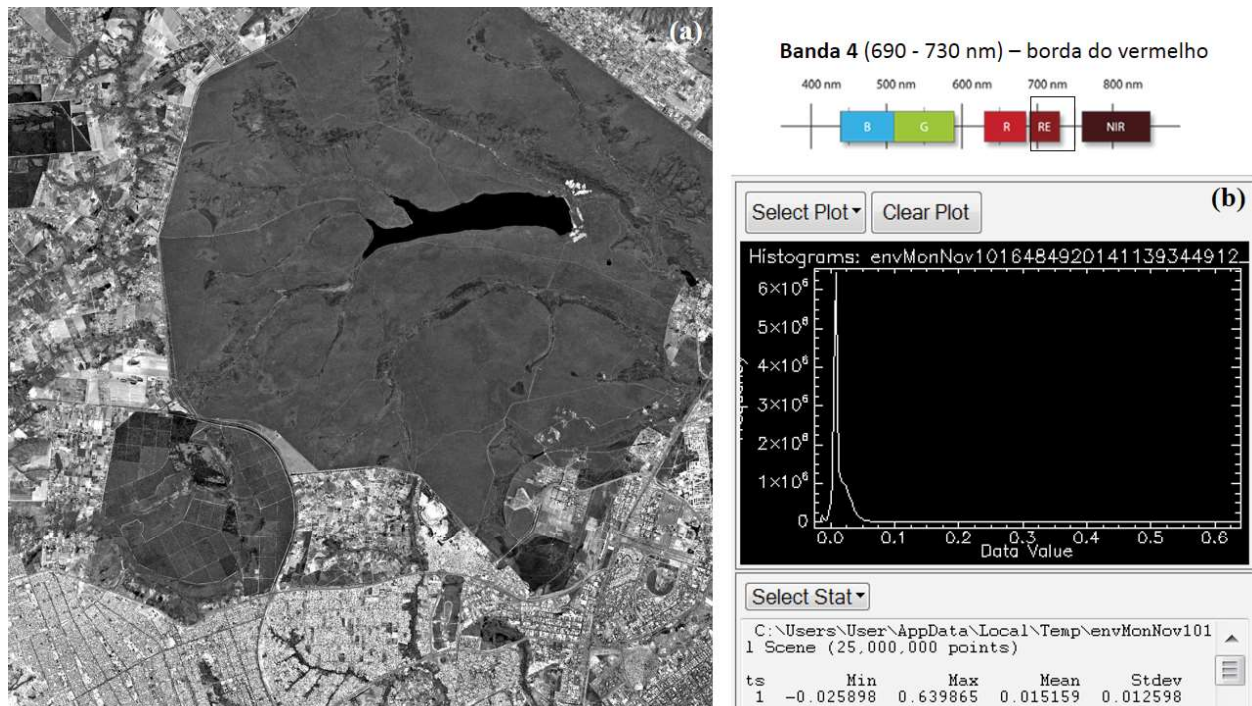


Fig. 5 - a) diferença entre refletâncias de superfície FLAASH e TOA para a banda 4 (borda do vermelho); b) histograma com variação dos valores de subtração para a banda 4.

O estrato vegetal foi o que apresentou maior destaque, se comparado aos demais resultados. A vegetação campo/cerrado teve, no FLAASH, maiores resultados que na TOA, embora os valores tenham sido baixos. Já a vegetação de mata indicou esse mesmo comportamento, mas com valores bem ressaltados, tanto que na imagem ela se apresenta com coloração branca, destoante das respostas das outras bandas, onde a vegetação arbórea se revelava mais escurecida.

Os valores médios de todos os alvos, referentes às diferenças entre as imagens, estão descritos na Tabela 1, reforçando os resultados descritos.

Em se tratando de área urbana, os valores sempre se mantiveram positivos, ou seja, com

refletância pelo métodos de correção FLAASH em maior evidência que a refletância TOA. Do lado oposto, com valores médios negativos para todas as bandas, esteve a água.

Os resultados médios dos outros alvos – solo e vegetação (sem distinção do estrato) – foram, à medida que se caminhava da banda do azul (b1) rumo à do infravermelho (b5), convertendo-se de negativos para positivos.

Observando os espectros desses alvos, notou-se que seus formatos são mais similares aos encontrados na literatura, o que leva a crer que os dados corrigidos e reduzidos para refletância pelo método FLAASH são mais adequados que os obtidos pelo método TOA, apesar de as diferenças serem pequenas, como pôde ser inferido observando os dados da Tabela 1.

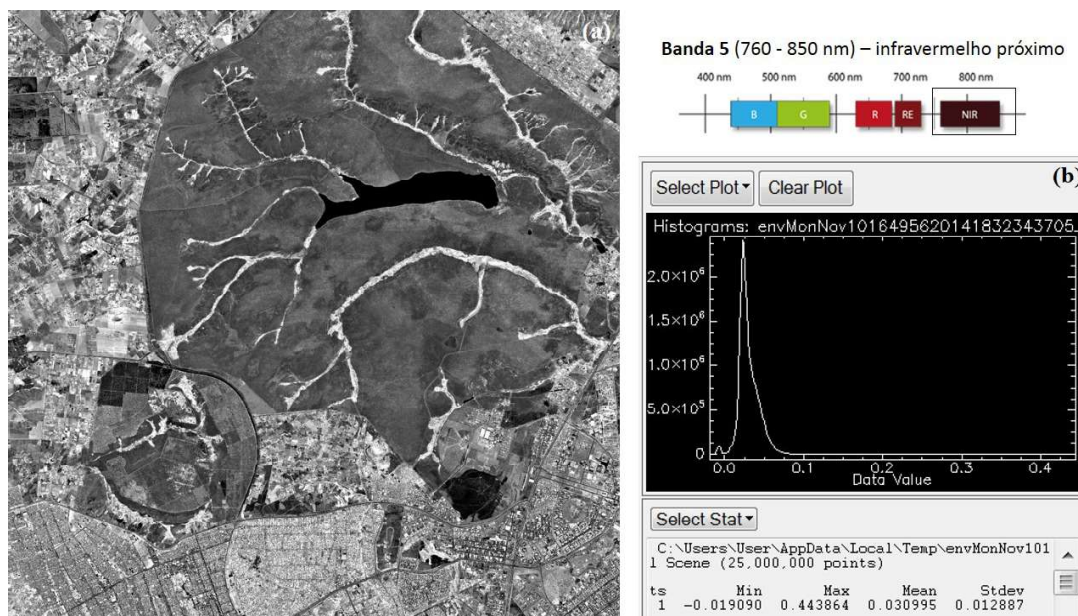


Fig. 6 - a) diferença entre refletâncias de superfície FLAASH e TOA para a banda 5 (infravermelho próximo); b) histograma com variação dos valores de subtração para a banda 5.

Tabela 1: Valores de diferença, em cada banda, entre refletâncias de superfície e do topo da atmosfera para cada alvo investigado

Bandas	Área urbana	Solo exposto	Mata de Galeria	Campo/ Cerrado	Água
B1	0,0115	-0,0542	-0,0680	-0,0627	-0,0611
B2	0,0353	-0,0091	-0,0257	-0,0257	-0,0291
B3	0,0310	0,0344	-0,0173	-0,0087	-0,0176
B4	0,0489	0,0592	0,0131	0,0072	-0,0103
B5	0,0503	0,0572	0,0607	0,0213	-0,0044

Visando compreender ainda as diferenças existentes, foram obtidos espectros médios de 100x100 pixels para cada alvo investigado, porém, separando os alvos de Campo do de Cerrado.

A tabela 2 apresenta os valores de diferença obtidas a partir dos espectros para cada banda entre as refletâncias de superfície e do topo da atmosfera para cada alvo investigado.

Tabela 2: Valores de diferença, em cada banda, entre refletâncias de superfície e do topo da atmosfera para cada alvo investigado obtidas pelos espectros

Bandas	Área urbana	Solo exposto	Mata de Galeria	Campo/ Cerrado	Água
B1	-0,0419	-0,0589	-0,0666	-0,0609	-0,0612
B2	0,0057	-0,0209	-0,0285	-0,0251	-0,0278
B3	0,0078	0,0019	-0,0172	-0,0090	-0,0172
B4	0,0271	0,0203	0,0094	0,0089	-0,0103
B5	0,0343	0,0311	0,0497	0,0252	-0,0045

Analisando os resultados obtidos por meio das diferenças entre FLAASH e TOA, tanto para bandas (Tabela 1) como para os espectros (Tabela 2) foram similares. Valores negativos ocorrem quando o valor da refletância TOA é maior que a de superfície. Positivos representam o inverso. A variação observada tanto nas bandas como nos espectros foi de 0 a 6%, o que pode ser considerada como inexpressiva.

Baptista (2001) encontrou, uma diferença entre imagens corrigidas e não corrigidas para os efeitos atmosféricos, da ordem de 2%, o que corrobora os resultados obtidos neste trabalho. A Figura 7 destaca os espectros médios para a janela de 100x100 pixels de cada alvo investigado, bem como a diferença, onde S1 é a refletância de superfície (FLAASH) e S2 é a TOA.

Ao analisar os alvos, cuja a diferença foi apresentada na Tabela 2, percebe-se que todos os alvos apresentam diferenças na banda 1, decorrente do espalhamento atmosférico, o que faz com que os valores de TOA sejam maiores que os do FLAASH. Isso se verifica com as diferenças negativas (Tabela 2). É na banda 1 que a diferença entre os dois tipos de refletância chega a 6%.

Em todas as outras bandas, a diferença entre os espectros chegou a valores inferiores a 5%.

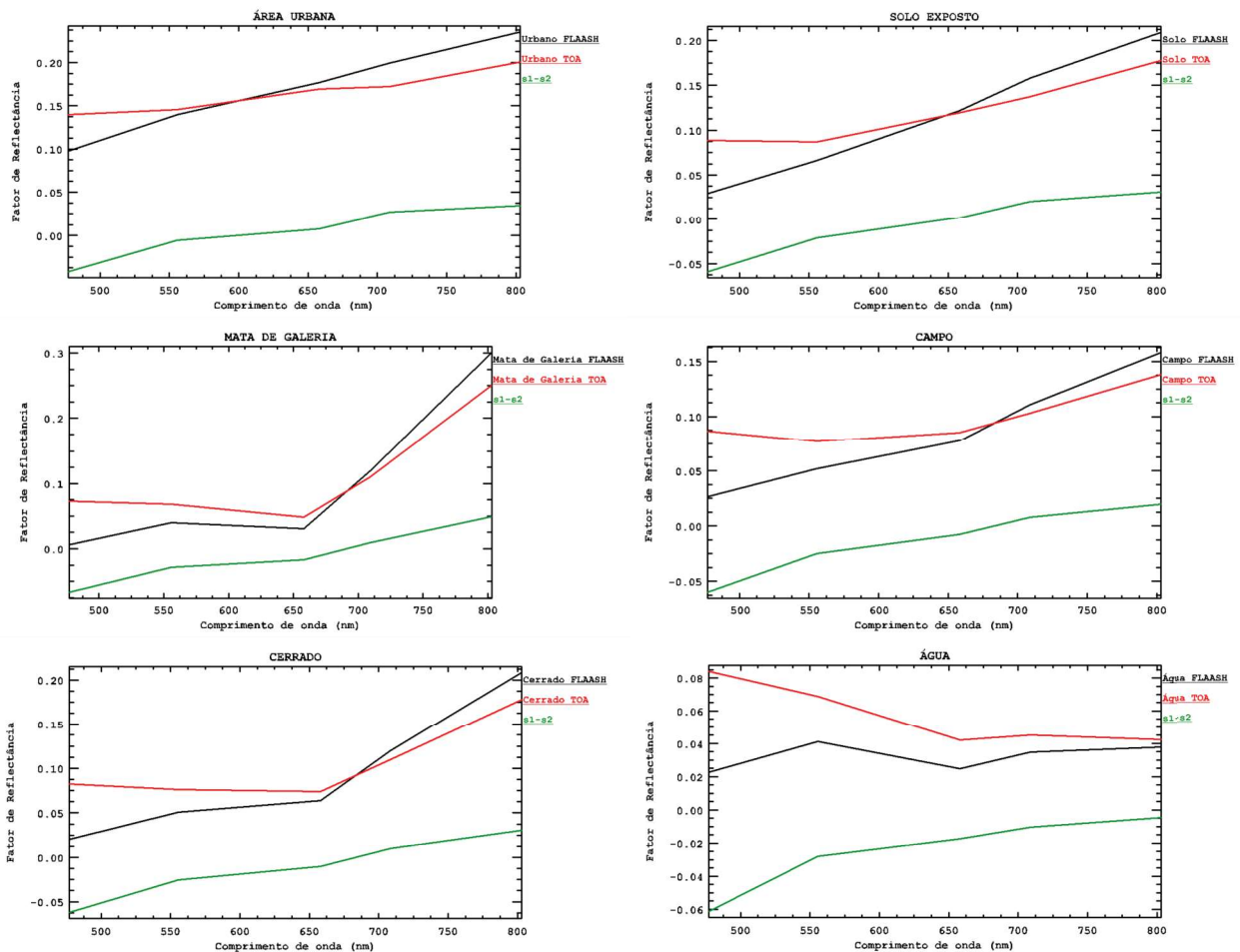


Fig. 7 – Espectros médios de reflectância de superfície (FLAASH) e do topo da atmosfera (TOA), obtidos para janela de 100x100 pixel, de cada alvo investigado, bem como a diferença entre eles. S1 corresponde ao espectro FLAASH e S2, TOA.

3.2 Análise de Similaridade do Índice EVI

Em se tratando da similaridade entre as imagens de EVI, obteve-se o seguinte:

A subtração da imagem de EVI proveniente do FLAASH pela proveniente da refletância TOA vem apresentada na Figura 8.

Os alvos não fotossinteticamente ativos, que apresentam valores de $EVI \leq 0$, tiveram os seguintes comportamentos: a água, tendo se apresentado com a coloração esbranquiçada, revela que a refletância FLAASH teve valores superiores aos obtidos no topo da atmosfera para o cálculo do EVI. O solo exposto e a área urbana se apresentaram com o mesmo comportamento que a água e o campo, ou seja, predominância da resposta de correção atmosférica pelo FLAASH.

Os alvos fotossinteticamente ativos, que apresentam $EVI > 0$, apresentaram o seguinte comportamento: o estrato vegetal, como um

todo, seguiu um decréscimo na escala de tons de cinza conforme redução do adensamento, sendo mais escura a vegetação de mata (dados da refletância TOA maiores que os dados da correção pelo FLAASH) e mais clara a campestre (FLAASH maior).

Os dados do histograma (Figura 8b) apontam para elevada similaridade, uma vez que a curva se mantém em torno do valor zero.

A mesma análise, utilizando-se a banda na borda do vermelho para o cálculo do EVI, apresentou resposta pouco diversa e com menor discretização dos dados (Figura 9).

Os alvos não fotossinteticamente ativos tiveram a refletância FLAASH em prevalência, sendo que em algumas regiões a água se confundiu com o solo exposto e com o adensamento urbano.

A água foi o único alvo em que o EVI partindo do FLAASH apresentou valores superiores aos do EVI partindo da refletância TOA (Tabela 3).

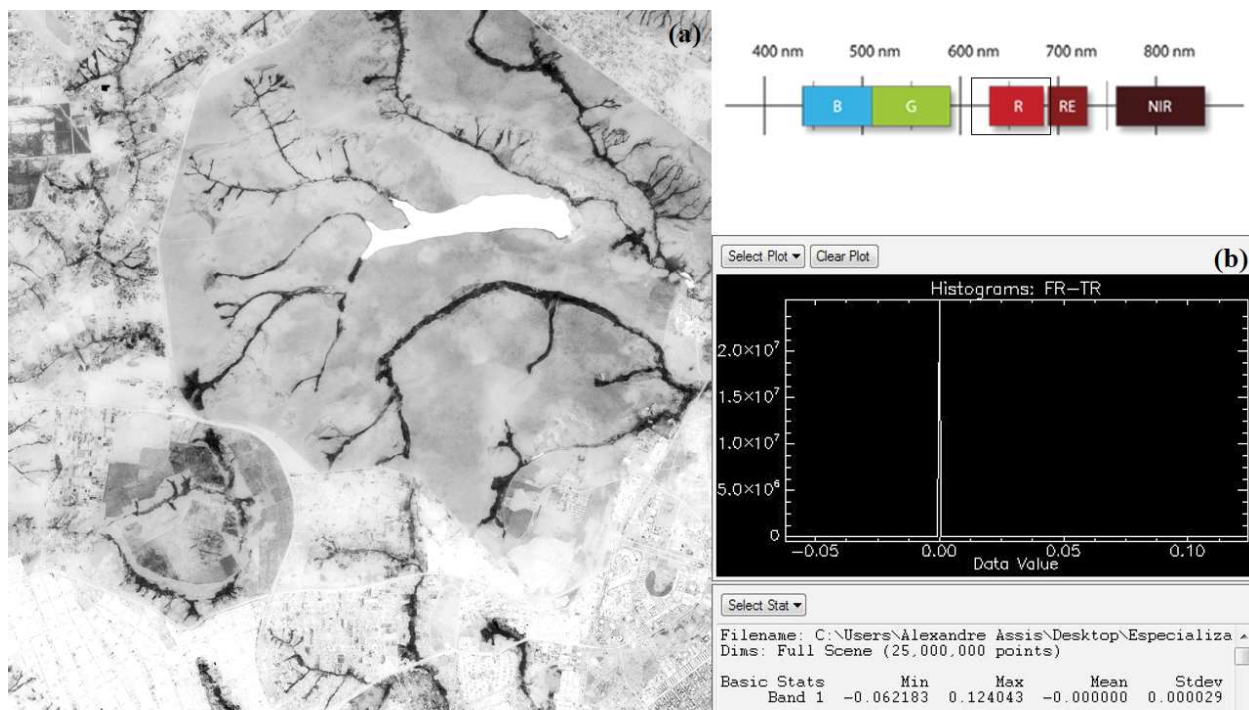


Fig. 8 - a) subtração entre EVI proveniente da refletância FLAASH e proveniente da refletância TOA, ambos calculados com a banda 3 (vermelho); b) histograma com variação dos valores de subtração entre as imagens.

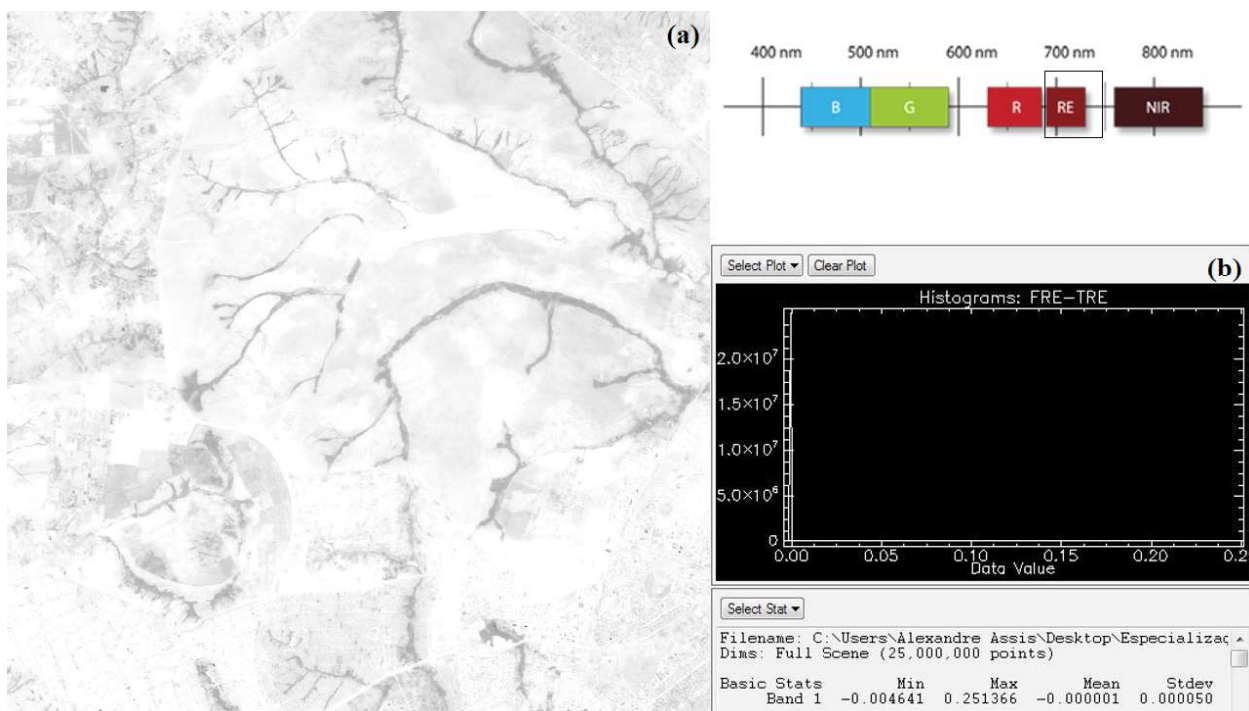


Fig. 9 - a) subtração entre EVI proveniente da refletância FLAASH e proveniente da refletância TOA, ambos calculados com a banda 4 (borda do vermelho); b) histograma com variação dos valores de subtração entre as imagens.

Já os alvos fotossinteticamente ativos, com exceção do campo, tiveram a prevalência da refletância TOA. Comparando-se com a Figura 8a, o campo, cuja tonalidade foi bem mais clara, confundiu-se também com a água, o

adensamento urbano e o solo exposto; enquanto que as áreas de cerrado puderam ser mais bem diferenciadas das de campo.

O histograma manteve a alta similaridade observada na análise dos cálculos utilizando-se

a banda na borda do vermelho, com pequenas variações em torno do ponto zero.

Ao se comparar as duas imagens de EVI provenientes do FLAASH – subtração da banda da borda do vermelho pela do vermelho –, a similaridade continuou elevada, haja vista a concentração da curva do histograma no valor zero (Figura 10).

Os alvos se assemelham visualmente com

o comportamento observado na Figura 7a, ou seja, os não fotossinteticamente ativos com a coloração mais esbranquiçada.

O EVI oriundo da banda na borda do vermelho teve resposta maior para os alvos fotossinteticamente ativos (vegetação de cerrado e mata de galeria). O campo apresentou resposta semelhante aos demais alvos, principalmente o solo exposto.

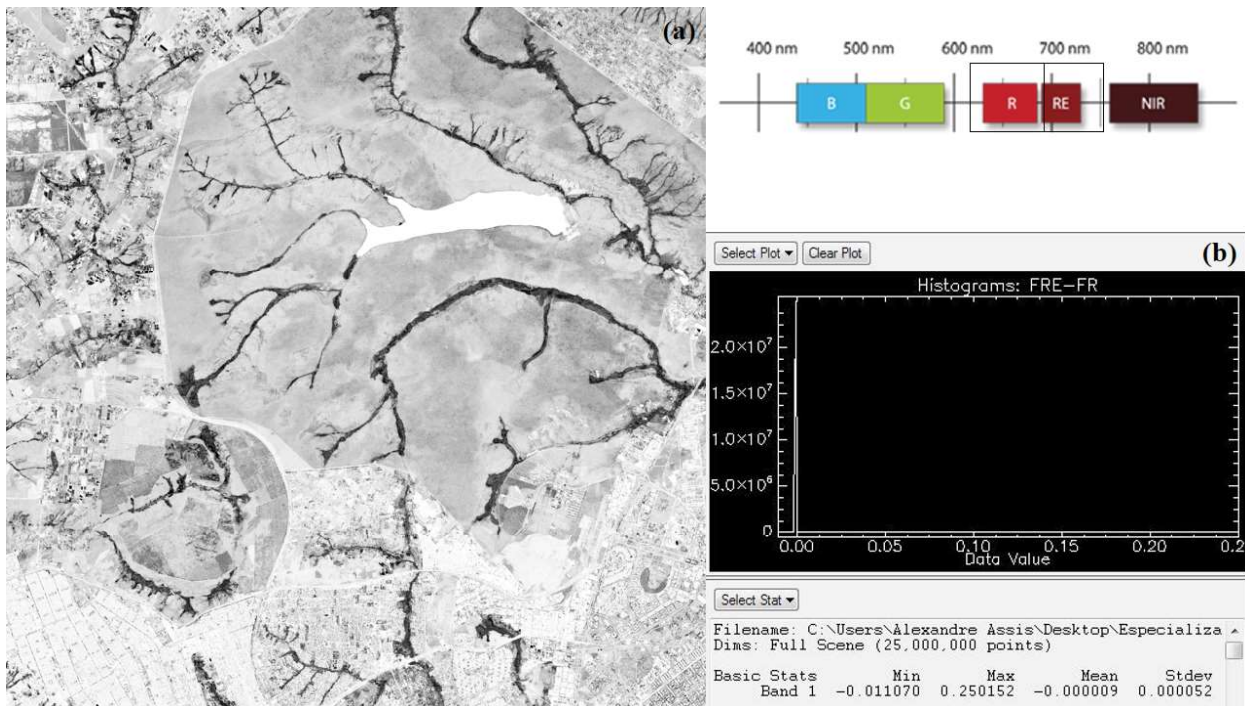


Fig. 10 - a) diferença entre as imagens de EVI provenientes da refletância de superfície FLAASH, calculadas com as bandas 4 (borda do vermelho) e 3 (vermelho), respectivamente; b) histograma com variação dos valores de subtração entre as imagens.

A vegetação de mata de galeria foi a que apresentou resposta maior do EVI calculado com a banda do vermelho, o que conferiu a coloração mais escura em destaque. A vegetação de cerrado veio na sequência.

De forma geral, todos os alvos apontaram para maior resposta no EVI com a banda do vermelho (Tabela 3).

A mesma análise feita na Figura 10, quando realizada para a refletância TOA (Figura 11), trouxe resultado visual também semelhante.

O exame visual da Figura 11a permitiu a discretização de todos os alvos, causando confusão apenas entre os não fotossinteticamente ativos (água, solo exposto e adensamento urbano), cujas tonalidades foram muito próximas.

Os alvos fotossinteticamente ativos

(vegetação de mata e de cerrado) apresentaram maiores valores no EVI calculado com a banda do vermelho, enquanto que o campo – em tonalidade clara de cinza – guardou proximidade elevada entre ambas imagens. O histograma (Figura 11b) trouxe a mesma resposta que os histogramas das outras comparações (Figuras 8b, 9b e 10b), ou seja, elevada similaridade entre os dados.

A subtração feita na individualização dos dados revelou que todos eles tiveram maiores respostas no EVI calculado com o uso da banda vermelha.

As análises descritas para as Figuras 8, 9, 10 e 11 estão resumidamente expressas na Tabela 3, com os valores da diferença de EVI coletados para cada alvo.

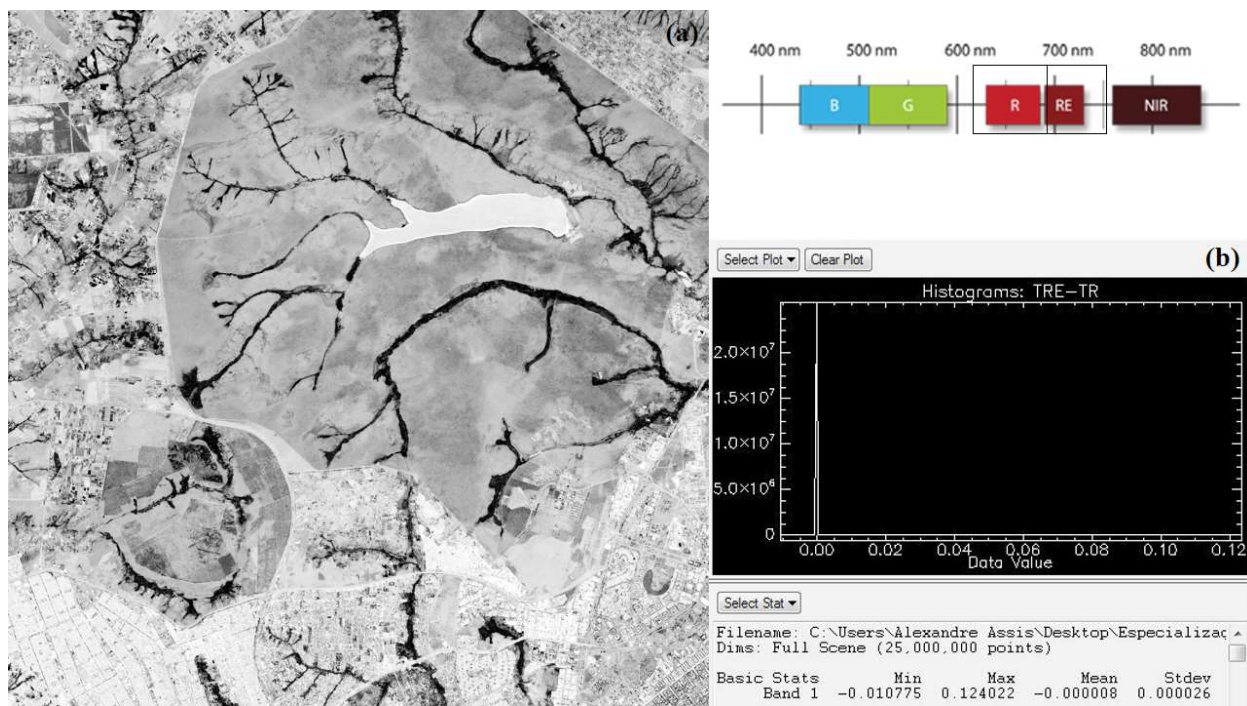


Fig. 11 - a) diferença entre as imagens de EVI provenientes da refletância TOA, calculadas com as bandas 4 (borda do vermelho) e 3 (vermelho), respectivamente; b) histograma com variação dos valores de subtração entre as imagens.

Comparativamente, em se tratando de imagens corrigidas atmosféricamente pelo FLAASH, a imagem de EVI que se utiliza da banda do vermelho em seu cálculo apresenta sinal mais ressaltado que aquela que se utiliza da banda da borda do vermelho. A mesma resposta é dada quanto se trata da imagem no topo da atmosfera, sendo que em ambos os casos a maior diferença esteve justamente na vegetação (mata de galeria e cerrado), o que se ressalta – e espera-se que ressalte – com a utilização do índice.

A utilização da banda 3 no cálculo do EVI apresentou maiores respostas que a utilização da banda 4, independentemente de se fazer ou não a correção atmosférica.

Os coeficientes utilizados no índice foram originalmente idealizados para o sensor MODIS (HUETE *et al.*, 1997a, HUETE *et al.*, 1999), mas encontram aplicação também para o Landsat TM (JUSTICE *et al.*, 1998). No MODIS, a banda 1 (620-670 nm) (ANDERSON *et al.*, 2003) é a utilizada para o cálculo do EVI. No Landsat TM, o intervalo espectral que entra na equação do índice é o da banda 3 (630-690 nm).

A banda 3 (630-685 nm) do RapidEye guarda maior proximidade dos comprimentos espectrais do MODIS e do Landsat TM,

Tabela 3: Valores da diferença entre os dados de EVI a partir da superfície FLAASH e TOA, seguindo a individualização dos alvos investigados

Subtração	Água	Mata de Galeria	Cerrado	Campo	Área urbana	Solo exposto
Fv - Tv	3x10 ⁻⁶	-7x10 ⁻⁶	-10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	2x10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
Fvb - Tv	2x10 ¹⁶	-4x10 ⁻⁶	-2x10 ⁻⁶	-10 ⁻⁶	-2x10 ⁻⁶	-10 ⁻⁶
Fvb - Fv	-3x10 ⁻⁶	-2,6x10 ⁻⁵	-1,5x10 ⁻⁵	-6x10 ⁻⁶	-5x10 ⁻⁶	-3x10 ⁻⁶
Tvb - Tv	-10 ⁻⁶	-3,2x10 ⁻⁵	-1,3x10 ⁻⁵	-5x10 ⁻⁶	-4x10 ⁻⁶	-2x10 ⁻⁶

Legenda: Fv = EVI calculado, utilizando-se da banda do vermelho, a partir da imagem corrigida atmosféricamente pelo método Flaash; Tv = EVI calculado, utilizando-se da banda do vermelho, a partir da imagem de refletância TOA; Fvb = EVI calculado, utilizando-se da banda da borda do vermelho, a partir da imagem corrigida atmosféricamente pelo método Flaash; e Tvb = EVI calculado, utilizando-se da banda da borda do vermelho, a partir da imagem de refletância TOA.

utilizados nos cálculos de seus respectivos índices. Isso pode ser um dos fatores que elevam o sinal do EVI calculado com a banda 3 (Figuras 9 e 10), principalmente no cerrado e na mata de galeria.

Na comparação do EVI a partir da utilização do FLAASH com aquele oriundo da imagem de

refletância de topo da atmosfera, o estrato vegetal (mata de galeria e cerrado) apresentou maiores valores na refletância TOA, como visto na Tabela 2. No caso da vegetação campestre, houve variação segundo a banda utilizada na aplicação do índice. Tal variação pode ser explicada por uma possível mistura espectral, em virtude de se ter maior participação do solo. Na mesma linha, vê-se que o solo exposto apresentou o mesmo comportamento, corroborando com a afirmativa anterior.

Assevera-se, assim, que o EVI é menos sensível às variações do solo e da atmosfera e mais sensível à estrutura do dossel (HUETE *et al.*, 1997; HUETE *et al.*, 2002; JIANG *et al.*, 2008). Quando há elevada concentração de aerossóis na atmosfera, a diferença entre a banda azul e a vermelha se torna maior e essa informação é utilizada para estabilizar o valor do índice contra as variações nos níveis de concentração de aerossol (HUETE *et al.*, 1999). A combinação do azul com o vermelho foi concebida para dar propriedades de autocorreção dos efeitos atmosféricos (KAUFMAN; TANRÉ, 1999).

Como o índice já pressupõe relativa correção da presença de alguns fatores atmosféricos, o cálculo do FLAASH – com os parâmetros utilizados – não trouxe diferença para justificar sua aplicação, inclusive podendo ter redundado na correção e suavizado mais o sinal. Dessa forma, apenas a imagem de refletância TOA já seria suficiente para execução do EVI. Eis um dos possíveis motivos pelo qual as diferenças avaliadas (Figuras 8 e 9 e Tabela 3) apontam para a refletância no topo da atmosfera com valores maiores de EVI, principalmente onde se tem vegetação mais densa.

Ao se aplicar o EVI nos diversos biomas brasileiros (FORMIGONI *et al.*, 2011), os dados apresentaram maior variação em ambientes de Caatinga (e menores valores do índice), ao passo que a variação foi menor na Amazônia e Mata Atlântica, onde a vegetação é mais adensada e o índice atingiu maiores valores. Na Caatinga, o solo participa mais no sinal do EVI – possível motivo para confirmar a maior variação observada –, o que, de forma análoga, tem-se na fitofisionomia campestre do Cerrado do Distrito Federal.

Em estudo feito para o Cerrado (CARVALHO *et al.*, 2008), a sazonalidade e a presença ou não de vegetação remanescente evidenciaram variações no comportamento espacial do EVI, especialmente em virtude das diversas paisagens com cobertura vegetal e do realce entre a estação seca e úmida. Embora os dados de Carvalho *et al.* (2008) tenham sido para o sensor MODIS, cujas resoluções espaciais são de 250, 500 e 1000 m, é importante ressaltar e sugerir a avaliação dos dados deste estudo em contraste com a estação úmida (março, por exemplo), onde se tem significativamente alterado o adensamento vegetal.

No todo, pode-se dizer que a refletância TOA permitiu que os dados de EVI apresentassem maiores resultados que a superfície FLAASH, como visto nos histogramas (médias observadas nas Figuras 8b, 9b, 10b e 11b).

A validação dessa distinção é revelada a partir das análises estatísticas entre os pares de imagens.

3.3 Análise estatística

As diferenças entre a imagem de EVI, a partir da correção com o código de transferência radiativa MODTRAN4+ e a proveniente da redução de radiância para refletância no topo da atmosfera, apresentaram, basicamente, as estatísticas indicadas nas Tabela 4, 5, 6 e 7 e o comportamento observado nas Figuras 12 e 13.

A Tabela 4 aponta para as estatísticas encontradas na regressão dos dados de EVI, calculados com a banda 3 (vermelho).

Tabela 4: Estatísticas encontradas na regressão dos dados de EVI, calculados com a banda 3 (vermelho)

Alvos	Regressão		Coeficientes do modelo	
	R ²	EP (%)	Angular (a)	Interseção (b)
Água	0,948	3,869	0,8530346	0,0312766
Mata de galeria	0,995	0,919	0,8654366	0,0142002
Cerrado	0,998	0,590	0,865923	0,0216635
Campo	0,992	0,722	0,909045	0,0178554
Zona urbana	0,988	7,380	0,9176695	0,0289981
Solo exposto	0,993	1,890	0,959274	0,0120989

O coeficiente de determinação, que reflete a proporção de variabilidade atribuída à variável independente (EVI a partir do FLAASH), foi maior que 90% em todos os casos, o que aponta

para modelos explicativos, bem ajustados à amostra coletada. Em outras palavras, com os dados de EVI (referentes à refletância TOA), pôde-se fazer estimativas precisas dos dados de EVI (oriundos do FLAASH).

Com a análise dos dados da regressão, verificou-se que a dispersão entre os dados observados (EVI a partir do FLAASH) e os dados calculados (a partir da aplicação dos modelos lineares) foi baixa.

Os dados para a água e zona urbana se dispersaram mais se comparados aos demais. Ambos os foram os que apresentaram maiores erros padrões relativos, segundo a Tabela 4, sendo, respectivamente 3,87% e 7,35%, muito embora estejam dentro do aceitável. A mesma análise apresentada na Tabela 4, quando feita ao EVI calculado a partir da banda 4, borda do vermelho, vem discriminada na Tabela 5:

Tabela 5: estatísticas encontradas na regressão dos dados de EVI, calculados com a banda 4 (borda do vermelho)

Alvos	Regressão		Coeficiente	
	R ²	EP (%)	Angular (a)	Interseção (b)
Água	0,964	10,265	0,800009068	0,016478365
Mata de galeria	0,998	0,669	0,885048114	-0,002154195
Cerrado	0,998	0,493	0,885313261	-0,000932938
Campo	0,994	0,711	0,888779122	0,000498382
Zona urbana	0,973	9,985	0,916898372	-0,003717229
Solo exposto	0,988	3,817	0,900954667	-0,006123413

Os coeficientes de determinação foram elevados tanto quanto os observados na Tabela 4, confirmando modelos lineares altamente explicativos. Os erros também seguiram a mesma tendência de distribuição dos dados calculados a partir da banda 3.

Mais uma vez, a água e a zona urbana foram as que apresentaram maiores dispersões, com erros, respectivamente, de 10,26% e 9,98%.

Independentemente da utilização da banda 3 ou da banda 4 no cálculo do EVI, em todos os casos os valores de superfície FLAASH puderam ser previstos, com a aplicação dos modelos gerados, a partir dos dados de refletância no topo da atmosfera.

Feita a regressão linear e encontrados os coeficientes postos nas Tabelas 4 e 5, o cálculo de normalidade se fez necessário para o diagnóstico da distribuição dos dados. A Tabela 6 apresenta

os dados do teste de D'Agostino-Pearson, conforme o alvo, partindo-se do EVI calculados com a banda 3 (vermelho) e com a banda 4 (borda do vermelho).

Tabela 6: Teste de normalidade de D'Agostino-Pearson para dados de EVI a partir das bandas 3 e 4

Alvos	Amostras (n° pixel)	Normalidade (K2)			
		B3		B4	
		Obs.	Calc.	Obs.	Calc.
Água	5094	22,904	13,1229	2,9976	2,2744
Mata de galeria	5981	8,9512	5,1677	35,0321	34,0408
Cerrado	5910	1,5575	7,2111	3,4632	0,704
Campo	5028	97,7999	102,8351	0,7078	0,0721
Zona urbana	7185	602,5555	667,2832	476,8394	477,2294
Solo exposto	5364	3,2963	3,2073	15,0636	15,4154

O valor de K2, encontrado para os alvos, deve ser maior que o valor tabelado (13,816) para que a população amostrada não apresente distribuição normal, ou seja, para que seja rejeitada a hipótese H0.

Na comparação entre os índices calculados a partir da banda 3 a mata de galeria, o cerrado e o solo exposto se revelaram como dados paramétricos. Quando o cálculo foi feito com a banda 4, a água, o cerrado e o campo apresentaram distribuição normal. Em todos os demais casos a distribuição não foi normal e a hipótese inicial rejeitada.

A normalidade constatada para alguns casos pode ter se dado em virtude da estrita seleção dos alvos. Foram coletadas regiões de interesse em uma pequena área do Distrito Federal e de forma individualizada. A mata de galeria, por exemplo, apresentou normalidade quando considerada a banda 3 na execução dos cálculos de EVI, enquanto teve comportamento diverso, sem normalidade, para os mesmos pixels, quando na execução do índice a partir da banda 4.

Referente ao solo exposto: a amostra utilizada é muito restrita e os resultados subsequentes ao processamento não devem ser extrapolados sem maiores comparações. O mesmo raciocínio deve ser aplicado aos demais dados.

Verificada a normalidade dos dados – por meio do teste de D'Agostino-Pearson –, para aqueles com distribuição normal foi calculada a

correlação de Pearson e para os não paramétricos, a correlação de Kendall (Tabela 7).

Tabela 7: Coeficientes de correlação obtidos para EVI calculado com bandas 3 e 4

Alvos	Correlação			
	B3		B4	
	τ (Kendall)	r (Pearson)	τ (Kendall)	r (Pearson)
Água	0,9026	-	-	0,9618
Mata de galeria	-	0,9992	0,9738	-
Cerrado	-	0,9992	-	0,9984
Campo	0,9532	-	-	0,9984
Zona urbana	0,9184	-	0,9002	-
Solo exposto	-	0,9952	0,9547	-

A refletância de superfície FLAASH e a TOA estiveram altamente correlacionadas em todos os alvos, mesmo que não tenham tido todos a mesma distribuição.

Com o intuito de se firmar os modelos como representativos dos dados em análise, foi feita validação – com seleção 20% do total de pixels coletados. Inicialmente, partiu-se do modelo gerado para cada alvo para calcular uma previsão do EVI advindo da imagem corrigida atmosféricamente a partir dos dados de EVI originários da imagem de refletância TOA. De posse do valor calculado, aplicou-se o teste de normalidade D'Agostino-Pearson (Tabela 8).

Tabela 8: Teste de normalidade para validação com amostra de 20%

Alvos	Amostras (n° pixel)	Normalidade (K2)			
		B3		B4	
		Obs.	Calc.	Obs.	Calc.
Água	1274	0,4009	0,8704	1,0662	1,0492
Mata de galeria	1496	1,8713	1,7798	4,1359	4,3771
Cerrado	1478	27,7257	28,7302	13,7551	16,8543
Campo	1257	84,8684	76,1132	70,7879	69,309
Zona urbana	1797	123,6004	84,4199	64,3611	48,8376
Solo exposto	1342	22,593	17,7226	2,9428	3,1221
Total	8644	43,055	35,0152	28,1616	17,7323

Os resultados revelam algumas diferenças dos apresentados na Tabela 6: no cálculo do EVI com a banda 3, a água apresentou normalidade, enquanto o cerrado e o solo exposto não; em se tratando dos cálculos com a banda 4, a mata de galeria e o solo exposto mostraram normalidade, enquanto o cerrado e o campo não.

Todavia, o conjunto de dados – quando calculados por um único modelo – não revelou normalidade, o que é de se esperar para dados de sensoriamento remoto. Na Tabela 9 estão descritos os coeficientes de correlação da amostra de validação.

Assim como na Tabela 7, as correlações são elevadas, mesmo sem haver regularidade na normalidade dos dados. O solo exposto foi o único alvo da validação que apresentou distribuição diferente a depender da banda utilizada no cálculo do EVI. Conforme a Tabela 7, tal distinção ocorrera para água, mata de galeria, campo e solo exposto.

Tabela 9: Dados de correlação para a validação

Alvos	Correlação			
	B3		B4	
	τ (Kendall)	r (Pearson)	τ (Kendall)	r (Pearson)
Água	-	0,9933	-	0,9942
Mata de galeria	-	0,9994	-	0,9998
Cerrado	0,9651	-	0,9903	-
Campo	0,9721	-	0,9817	-
Zona urbana	0,9138	-	0,905	-
Solo exposto	0,9785	-	-	0,9964
Total	0,9597	-	0,9801	-

Assim sendo, tem-se que há pequena divergência entre os cálculos do EVI com banda 3 e com a banda 4.

Ao se calcular a regressão entre os dados de EVI advindos das imagens de refletância TOA, encontrou-se um coeficiente de determinação de 0,9715. O teste de normalidade de D'Agostino-Pearson indicou não se tratar de dados paramétricos; e a correlação de Kendall foi de 0,8704.

Igual comparação feita para as imagens oriundas da correção atmosférica pelo método de transferência radiativa MODTRAN4+ apontou para um coeficiente de determinação igual a 0,9834. Não houve normalidade e a correlação de Kendall foi de 0,8915.

Em ambos os casos a correlação foi elevada, mas não tanto quanto nas comparações feitas entre as diferentes formas de redução de radiação para refletância, FLAASH e TOA. Os dados dizem que é mais fácil estimar o EVI (FLAASH) com os dados do EVI (TOA) do que estimar o EVI – calculado com a banda 3

(630-685 nm) –, advindo do FLAASH, com as informações do EVI – calculado com a banda 4 (690-730 nm) –, também advindo do FLAASH. O mesmo é válido para os índices de vegetação resultantes das refletâncias TOA.

A banda da borda do vermelho foi originalmente usada para o cálculo do *MERIS Terrestrial Chlorophyll Index* (MCTI), baseado em um espectrômetro de média resolução espectral, cujo intervalo era de 10 nm (703,75-713,75 nm), no entanto no RapidEye o intervalo é de 40 nm (690-730 nm), o que requer adaptações e maiores estudos (VUOLO, 2010).

A banda 4 do RapidEye é apontada para análises e monitoramento de vegetação (TIGGES *et al.*, 2003; Antunes *et al.*, 2014), com sucesso na estimativa de componentes bioquímicos, principalmente o nitrogênio foliar (RAMOELO, 2012), assim como no diagnóstico do estresse sofrido em alguns ecossistemas florestais (EITEL *et al.*, 2011). No presente estudo nenhum alvo foi melhor discretizado ou ressaltado com a utilização da banda 4, ao invés da banda 3, no cálculo do EVI.

O estudo realizado por Eitel *et al.* (2011) aplicou a banda da borda do vermelho ao cálculo do NDVI, cujo saturação é observada em áreas de elevada biomassa (HUETE *et al.*, 2002). Tal metodologia pode ter favorecido o destaque da banda 4, do RapidEye, na análise da vegetação.

O fato de a cena estudada estar em região de Cerrado, onde as condições atmosféricas são diferentes das da região Amazônica e a vegetação não apresenta a mesma densidade, influi no sinal percebido, apontando alterações para o índice. Os índices de vegetação, de forma geral, têm picos de saturação em regiões de elevada biomassa, sendo no Cerrado um pico com distribuição mais esparsa que na floresta. Contudo, a banda do vermelho é a única que apresenta saturação, por isso a do infravermelho é utilizada para descrever variações em regiões de alta biomassa (HUETE *et al.*, 2002).

No que tange a aplicação do EVI nas condições do estudo: não houve rigorosa necessidade de se proceder com a correção atmosférica. Antunes *et al.* (2012) afirmam que deve ser feita mesmo quando se trata de índices de vegetação, porque o efeito atmosférico afeta diretamente as bandas utilizadas. Em pesquisa com o sensor Landsat 7-ETM+, percebeu-se

que a correção atmosférica deve ser aplicada nos casos em que haja objetivo do estudo de variações espectrais (séries temporais consistentes e homogêneas) (COUTO JÚNIOR, 2011).

Sendo assim, ao se considerar a região estudada, algumas informações devem ser pontuadas no tocante às suas patentes diferenças: a cena RapidEye apresenta resolução espacial de 5 metros; o sensor se encontra a 630 km da superfície (enquanto os do Landsat e o MODIS estão a 705 km); foi obtida em um mês com elevada temperatura e sem interferência de nuvem, além de ter capturado parte de uma região com características climáticas, pedológicas e fitofisionômicas peculiares (típica do Bioma Cerrado).

Todas essas considerações agregam informações que podem explicar parte dos resultados. Por exemplo, para uma mesma área, quando o sensor MODIS considerar apenas um pixel, o Landsat5-TM terá 70 unidades distintas e o RapidEye, 2500. No RapidEye os alvos são mais bem discretizados e a mistura nos pixels é menor, todavia o processamento para extensas áreas é dispendioso. A altitude do sensor evidencia variações na distância e quantidade de obstáculos entre o sensor e o alvo, corroborada pela época de obtenção da imagem e pelas características locais. Antunes (2014) afirmam que as características de resolução dos sensores remotos são determinantes para a extração de informações da superfície.

Por se tratar de um período em que a vegetação se encontrava mais seca, o sinal da banda da borda do vermelho pode não ter ressaltado a vegetação, tal como se espera (EITEL *et al.*, 2011; RAMOELO, 2012; ANTUNES *et al.*, 2014).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo visou comparar os efeitos da redução dos dados de radiância para refletância de superfície por meio do modelo de transferência radiativa *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH) com os da redução para o topo da atmosfera banda por banda para imagens RapidEye, na aplicação do EVI.

Inicialmente, os resultados das médias das diferenças entre as imagens FLAASH e TOA

foram, para cada banda, de -0,057051 (banda 1), -0,020273 (banda 2), -0,004363 (banda 3), 0,015159 (banda 4) e 0,030995 (banda 5). Os histogramas se apresentaram pouco dispersos entre si, guardando certa simetria, ou seja, pouca diferença entre os dados. O mesmo comportamento se observou ao se analisar espectros médios de 100x100 pixels obtidos para cada alvo investigado e as diferenças entre os obtidos para reflectância de superfície como para no topo da atmosfera variaram entre 0 e 6%.

A água apresentou valores negativos em todas as bandas (predominância de TOA), enquanto a área urbana, valores positivos (predominância de FLAASH), com resultados expressivos na banda 4. O mesmo observado para a classe de solo exposto. A banda do infravermelho (banda 5) foi a que apresentou a melhor discretização da vegetação – principalmente arbórea – o que já era de se esperar.

Sequencialmente, comparando-se os resultados do EVI, par a par, encontrou-se predominância nas respostas provenientes da reflectância TOA, independentemente de se ter calculado o índice com a banda do vermelho ou da borda do vermelho.

A resposta advinda dos índices calculados a partir da banda 3 (vermelho) foi maior, em todos os alvos, que o calculado com a banda 4 (borda do vermelho). Isso tanto para a comparação das reflectâncias de superfície FLAASH quanto das reflectâncias TOA.

As análises estatísticas não apontaram diferenças significativas entre proceder ou não com a correção atmosférica para o cálculo do EVI, tendo sido constatados modelos, a partir da regressão linear, altamente correlacionados e com coeficientes de determinação superiores a 0,9, além de baixos erros padrões.

Alguns alvos foram diagnosticados como tendo distribuição normal. Isso provavelmente em virtude da pequena dimensão da cena em que se coletaram as amostras estudadas, onde há restrições para a variação dos locais de coleta. Contudo a distribuição total foi não paramétrica, rejeitando-se, portanto, a hipótese inicial (normalidade).

A partir dos resultados apresentados, pode-se fazer uma análise da influência da correção atmosférica no cálculo do EVI e atestar sua qualidade para o processamento mais adequado

das imagens.

Constatou-se, sob as condições da pesquisa, a desnecessidade de se proceder com a correção atmosférica para o processamento do EVI; e a presença de maior realce da vegetação quando feito o cálculo do índice com a banda 3 (vermelho).

Deve-se, posteriormente, incentivar testes para as potencialidades dos dados RapidEye e dos métodos de redução de radiância para reflectância. Sugere-se, primeiramente, comparar as informações aqui encontradas com dados obtidos em época úmida, quando as respostas espectrais dos alvos são diferentes.

AGRADECIMENTOS

À BlackBridge, na figura de seu Gerente Regional para América Latina, Maurício Braga Meira, pela cessão dos dados RapidEye, sem os quais não seria possível a realização do presente estudo.

Ao Laboratório de Sensoriamento Remoto e Análise Espacial do Instituto de Geociências, IG/UnB, pela utilização da licença do Envi 5 para processamento e análises espectrais dos dados RapidEye.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, L. O.; LATORRE, M. L.; SHIMABUKURO, Y. O.; ARAI, E.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. **Sensor Modis: uma abordagem geral**. INPE-10131-RPQ/752, São José dos Campos, 2003, 58p.

ANTUNES, M. A. H.; DEBIASI, P.; COSTA, A. R.; GLERIANI, J. M. Correção atmosférica de imagem ALOS/AVNIR-2 utilizando o Modelo 6S. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 64/4, p. 531-539, 2012.

ANTUNES, M. A. H.; DEBIASI, P.; SIQUEIRA, J. C. S. Avaliação espectral e geométrica das imagens RapidEye e seu potencial para o mapeamento e monitoramento agrícola e ambiental. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 66/1, p. 105-113, 2014.

BAPTISTA, G. M. M. **Mapeamento e quantificação da relação Caulinita/ (Caulinita+Gibbsita) de solos tropicais, por meio dos dados do sensor AVIRIS (JPL/NASA)**. Tese (doutorado). Instituto de Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília,

278 p., 2001.

BAPTISTA, G. M. M. Análise comparativa entre os dados do sensor CCD do CBERS e os do Landsat 7 ETM+ para a região de Brasília. In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, 2003. **Anais**. p. 2303-2310, 2003.

BLACKBRIDGE. Ortho Product (Level 3A). Disponível em: <<http://blackbridge.com/rapideye/products/ortho.htm>> Acesso em: 21 novembro 2014.

CARVALHO, F. M. V.; FERREIRA, L. G.; LOBO, F. C.; DINIZ-FILHO, J. A. F.; BINI, L. M. Padrões de autocorrelação espacial de índices de vegetação MODIS no Bioma Cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.32, n.2, p.279-290, 2008.

COUTO JUNIOR, A. F. C.; MENESES, P. R.; SANO, E. E. Desempenho da Correção Atmosférica Baseada no Algoritmo Flaash e sua Avaliação para o Processamento Digital de Imagens do Sensor Landsat 7-ETM+ dentro do Bioma Cerrado. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba: INPE, 2011. **Anais**. p. 7317-7323, 2011.

EITEL, J. U. H.; VIERLING, L. A.; LITVAK, M. E.; LONG, D. S.; SCHULTHESS, U.; ANGER, A. A.; KROFCHECK, D. J.; STOSCHECK, L. Broadband, red-edge information from satellites improves early stress detection in a New Mexico conifer woodland. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195-213, 2002.

FORMIGONI, M. H.; XAVIER, A. C.; LIMA, J. S. S. Análise temporal da vegetação na região do Nordeste através de dados EVI do MODIS. **Ciência Florestal**, v. 21, n.1, p. 1-8, 2011.

GOWARD, S. N.; HUENNRICH, K. F. Vegetation canopy PAR absorptance and the normalized difference vegetation index: an assessment using the SAIL model. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 360-3646, 2011.

HUETE, A. R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 295-309, 1988.

HUETE, A. R.; 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**, v. 83, p. 195-213, 2002.

HUETE, A. R.; JUSTICE, C. O., LEEWEN, W. J. D. MODIS Vegetation Index (MOD 13): algorithm theoretical basis document (version 3), 1999, 120 p. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf>. Acesso em: 13 dezembro 2014.

HUETE, A. R.; JUSTICE, C. O.; LIU, H. Q. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. **Remote Sensing of Environment**, v. 49, n. 3, p. 224-234, 1994.

HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 3, p. 440-451, 1997a.

HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; VAN LEEUWEN, W. The use of vegetation indices in forest regions: issues of linearity and saturation. In: International Geoscience and Remote Sensing Seminar, Noordwijk: Netherlands, 1997. ESA Publications, **Anais**. p. 1966-1968, 1997b.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 604p.

JIANG, Z.; HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3833-3845, 2008.

KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D. Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 2, 1992.

MATTHEW, M. W.; ADLER-GOLDEN, S. M.; BERK, A.; FELD, G.; ANDERSON, G. P.; GORODEZTZKY, D.; PASWATERS, S.; SHIPPERT, M. Atmospheric correction of spectral imagery: Evaluation of the FLAASH algorithm with AVIRIS data. **IEEE, 31st Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR'02)**, 2002.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y.E.

Sensoriamento remoto no estudo da vegetação.

São José dos Campos: Parêntese, 2010. 136 p.

RAMOELO, A.; SKIDMORE, A. K.; CHO, M. A.; SCHLERF, M.; MATHIEU, R.; HEITKÖNIG, I. M. A. Regional estimation of savanna grass nitrogen using the red-edge band of spaceborne RapidEye sensor. **Remote Sensing of Environment**, v. 19, p. 151-162, 2012.

RUDJORD, Ø.; TRIER, Ø. D. Evaluation of FLAASH atmospheric correction. Norsk Regnesentral, **SAMBA/10/12**, 2012.

SELLERS, J. P. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. **International Journal of Remote Sensing**, v. 6, n. 8, p. 1335-1372, 1985.

TIGGES J.; LAKES, T.; HOSTERT, P. Urban classification: benefits of multitemporal RapidEye satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v. 136, p. 66-75, 2013.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979.

VUOLO, F.; ATZBERGER, C.; RICHTER, K.; D'URSO, G.; DASH, J. Retrieval of biophysical vegetation products from RapidEye imagery. In: WAGNER W., SZÉKELY, B. (eds.). ISPRS TC VII Symposium - 100 Years ISPRS, Vienna, Austria, 2010. IAPRS, v. 38, **Anais**. p. 281-285, 2010.