

## Estudo de fisiologia da vegetação com uso de imagem hiperespectral

Cibele Hummel do Amaral<sup>1</sup>  
George Alfredo Longhitano<sup>2</sup>  
Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo – USP  
Rua do Lago, 562 – 05508-080 – São Paulo-SP, Brasil  
{chamaral, talmeida}@usp.br

<sup>2</sup> Escola Politécnica - Universidade de São Paulo – USP  
Av. Prof. Almeida Prado, Travessa 2, no. 83 - 05508-900 - São Paulo-SP, Brasil  
georgelonghitano@yahoo.com.br

**Abstract.** The objective of the study was to create inferences about the vegetation physiology of a small area located in Mogi-Guaçu-SP, comparing spectral information of water and leaf pigments found in hyperspectral image and data from field. The images used in this study have 24 bands, with spectral range of 28.2 nm and 75 cm pixels. They were acquired through the airborne hyperspectral sensor CASI-1500 that combines high spectral and spatial resolutions. Ratio bands operations were performed in ENVI 4.5 and ERMapper 7.0 for detecting water and leaf pigments: total chlorophyll (a + b), chlorophyll-a, chlorophyll-b, carotenoids, anthocyanins. It was classified a NDVI image to separate vegetation from non-vegetation. The best ratios have been grouped with the implementation of the mask of vegetation. Some RGB color compositions were created that emphasize the water and leaf pigments. A fieldwork was conducted in October 2008, when it was held the physiognomy vegetation study of the area. Thus, it was possible to observe the main aspects of the vegetation found, and its relationship with the environment. This way, these data could be related with the correlation statistics and color composites between the ratios. The variations of the organic compounds were studied and were consistent with the characteristics of the vegetation physiology and the relationship with the environmental conditions.

**Palavras-chave:** remote sensing, plant physiology, leaf pigments, sensoriamento remoto, fisiologia vegetal, pigmentos foliares.

### 1. Introdução

O sensoriamento remoto aplicado a estudos de fisiologia vegetal representa uma grande ferramenta para detecção de anomalias, stress, deficiências nutricionais, dentre outras características, antes somente identificadas com estudos de campo e laboratório. Os pigmentos foliares e a água foliar apresentam grande importância para o metabolismo e desenvolvimento das plantas e a presença destes compostos na vegetação pode ser realçada a partir de técnicas de processamento de imagens, como em operações de razões de bandas.

Dentre os pigmentos foliares, as clorofilas são os mais importantes, pois controlam a quantidade de radiação solar absorvida pelas folhas e sem elas a fotossíntese não aconteceria. Chapelle *et al.* (1992) ressalta a importância do sensoriamento remoto para detecção de clorofilas como uma técnica não-destrutiva. As técnicas normalmente utilizadas envolvem a extração destes pigmentos da folha, com uso de solventes orgânicos, sendo caracterizadas como técnicas químicas destrutivas.

Os carotenóides são componentes essenciais na antena fotossintética, contribuindo na absorção da radiação incidente e na dissipação do excesso de energia absorvida, dentre outras funções. As antocianinas representam o terceiro maior grupo de pigmentos foliares e estão presentes nas folhas de todas as espécies, mas suas concentrações variam de espécie para espécie e nos diferentes estágios fenológicos da planta. Segundo Blackburn (2007), poucos estudos têm examinado as concentrações de antocianina por reflectância espectral.

A água foliar indica o teor de água contida nas folhas da vegetação e pode representar a situação hídrica desta e dos solos em que a vegetação está fixada. Esta varia principalmente em função da espécie e da época do ano.

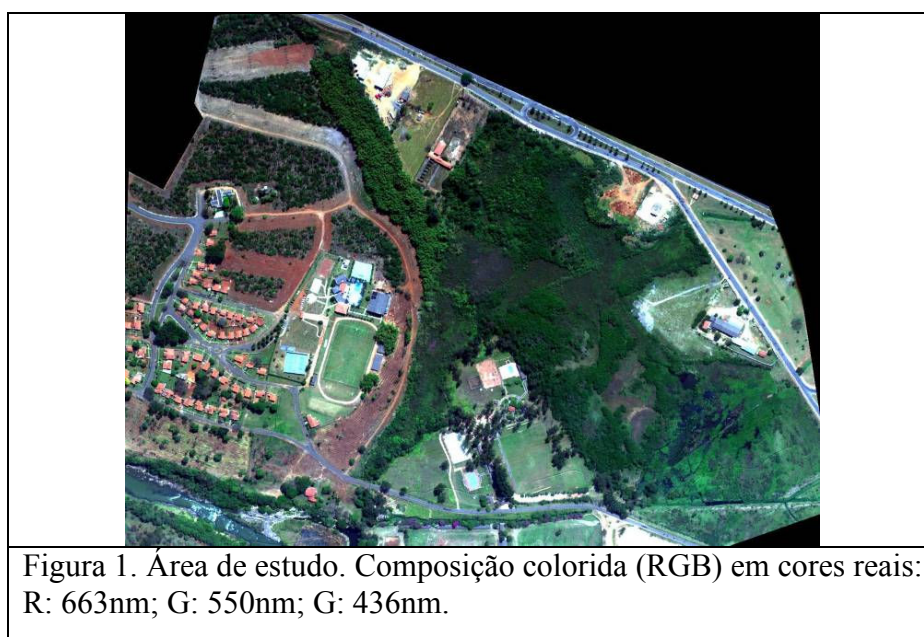
É interessante que as imagens a serem utilizadas para estudos fisiológicos de vegetação tenham boa resolução espectral, uma vez que as variações das assinaturas espectrais dos pigmentos e da água foliar apresentam variações tênues e em pequenos intervalos de faixa do comprimento de ondas do espectro eletromagnético.

Desta forma, o objetivo do estudo foi realizar inferências sobre a fisiologia da vegetação da área de estudo, comparando informações obtidas no campo com dados espectrais de água e pigmentos foliares detectados em imagem hiperespectral do sensor CASI-1500.

## 2. Metodologia de Trabalho

### 2.1. Área de Estudo

A área de estudo está localizada no município de Mogi-Guaçu (SP), entre as coordenadas: 22°21'31.50" e 22°21'56.40" S e 46°58'03" e 46°57'25.50" W, em área contígua à rodovia SP-340 e à margem direita do Rio Mogi-Guaçu e abrangendo cerca de 80ha (Figura 1).



### 2.2. Material

A imagem hiperespectral utilizada para realização do presente estudo foi obtida pelo sensor aerotransportado CASI-1500, em setembro de 2007. Esta apresenta 24 bandas com faixa de cerca de 28,2nm cada (Tabela 1) e resolução espacial com pixels de 75 cm em solo. Para o processamento das imagens, foram utilizados os *softwares ENVI 4.5* e *ERMapper 7.0*.

Tabela 1. Bandas espectrais da imagem CASI utilizada no estudo.

Banda	Faixa de comprimento de onda ( $\lambda$ mín e $\lambda$ máx) em nm	$\lambda$ central em nm	Banda	Faixa de comprimento de onda ( $\lambda$ mín e $\lambda$ máx) em nm	$\lambda$ central em nm
1	365.9 – 394.2	380.1	13	706.5 – 734.9	720.7
2	394.2 – 422.4	408.3	14	734.9 – 763.3	749.1
3	422.5 – 450.3	436.7	15	763.4 – 791.8	777.6
4	450.8 – 479.2	465.0	16	791.8 – 820.2	806.0
5	479.10 – 507.5	493.3	17	820.3 – 848.7	834.5
6	507.5 – 535.9	521.7	18	848.7 – 877.1	862.9
7	535.9 – 564.3	550.1	19	877.1 – 905.5	891.3
8	564.3 – 592.7	578.5	20	905.5 – 933.9	919.7
9	592.7 – 621.1	606.9	21	933.9 – 962.3	948.1
10	621.2 – 649.6	635.4	22	692.2 – 990.6	976.4
11	649.6 – 678.0	663.8	23	989.8 – 1018.2	1004.8
12	678.10 – 706.5	692.3	24	1018.9 – 1047.3	1033.1

### 2.3 Procedimentos Metodológicos

Inicialmente, uma revisão bibliográfica foi realizada, a fim de se obter informações sobre as assinaturas espectrais dos pigmentos e da água foliar a serem detectados na vegetação. Neste sentido, foram usados como referências, os trabalhos de Zwiiggelaar (1998), Baret (1999), Galvão *et al.* (1999), Boegh, (2002), Thenkabail (2002), Almeida (2005) e Blackburn (2007) (Figura 2).

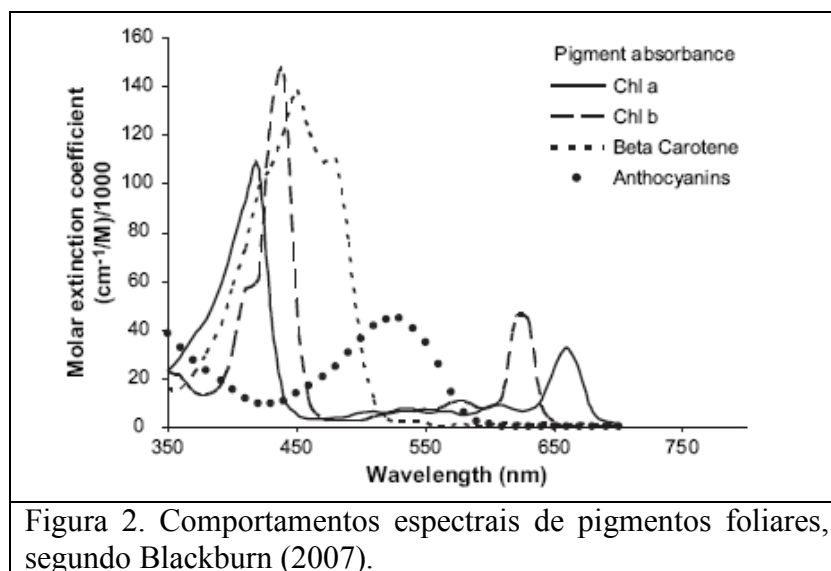


Figura 2. Comportamentos espectrais de pigmentos foliares, segundo Blackburn (2007).

Em seguida, no *software ENVI 4.5*, a imagem foi recortada, destacando-se apenas a área de interesse do estudo e então, gerado o NDVI (normalized difference vegetation index) para separação da vegetação das demais classes de uso do solo existentes na área. Foram adotadas as bandas: 749nm e 693nm (Galvão *et al.*, 1999).

A imagem gerada pelo NDVI foi classificada para separar as classes de vegetação e não-vegetação. A classificação foi do tipo não-supervisionada, obtida pelo método *isodata*, no *software ENVI 4.5*.

Após a classificação, foi gerada uma máscara (de forma Booleana) com a classe de não-vegetação. Esta foi empregada em todos os procedimentos posteriores permitindo a obtenção de informações referentes apenas à vegetação.

Considerando as informações levantadas e as características das bandas das imagens, foram realizadas operações de razões de bandas para facilitar a detecção dos pigmentos e da água foliar na vegetação da área. Foram realizadas razões de bandas para detecção de água foliar e dos pigmentos: clorofila total ( $cl\ a + cl\ b$ ), clorofila-a, clorofila-b, carotenóides, antocianina.

Através de comparação visual e de acordo com a pesquisa bibliográfica, foram selecionadas as razões que apresentaram melhor desempenho para a detecção das substâncias mencionadas.

A Tabela 2 mostra as razões de bandas geradas para cada uma das moléculas, destacando as escolhidas para o prosseguimento do estudo.

Tabela 2. Razões de bandas testadas e selecionadas para o estudo.

Molécula	Razões testadas ( $\lambda$ central em nm)	Razões selecionadas
Água Foliar	834/976 e 749/976	749/976
Clorofila Total	834/550	834/550
Clorofila-a	806/663 e 777/663	806/663
Clorofila-b	806/635 e 777/635	806/635
Carotenóides	550/493, 834/493, 806/493 e 777/493	550/493
Antocianina	493/521, 806/521 e 777/521	806/521

As razões geradas foram agrupadas em uma única imagem, a fim de se obter as estatísticas das mesmas incluindo: valores de mínimo e máximo, desvio padrão e matriz de correlação. A partir da realização de composições coloridas RGB, associando a cada uma das cores as imagens obtidas pelas razões, que destacam a água foliar e os pigmentos descritos anteriormente, pode ser procedida à análise visual destas, a qual foi relacionada com a verificação das estatísticas de correlação entre as razões de banda selecionadas.

As razões foram exportados em formato TIF para o programa *ERMapper 7.0* para realização de mais composições RGB e composições Pseudocolor, afim de se manejar e promover um aumento de contraste.

Em outubro de 2008 foi realizada uma visita de campo na área imageada pelo sensor CASI-1500 para identificação de características fisionômicas e florísticas da vegetação, as quais haviam sido analisadas, previamente, apenas por fotointerpretação das imagens, com intuito de agregar à análise as observações feitas em campo.

### 3. Resultados e Discussões

As estatísticas das imagens das razões de banda geradas e a correlação entre elas estão apresentadas nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3. Estatísticas das razões de banda.

Razões de banda	Valor min	Valor máx	média	Desvio padrão
Água Foliar	0.804270	2.499460	1.466409	0.143497
Clorofila Total	1.048916	5.925660	2.515640	0.568958
Clorofila-a	1.879756	17.269142	4.597592	1.856491
Clorofila-b	1.654100	12.829716	3.866340	1.372617
Carotenóides	0.852705	2.925561	1.430050	0.171134
Antocianina	1.127660	7.697001	3.148784	0.826610

Tabela 4. Correlação entre as razões de banda: água foliar e pigmentos foliares.

Razões de banda	Água Foliar	Clorofila Total	Clorofila-a	Clorofila-b	Carotenóides	Antocianina
Água Foliar	1.000000	0.412079	0.555901	0.530025	0.570698	0.533851
Clorofila Total	0.412079	1.000000	0.906175	0.932089	0.359017	0.973103
Clorofila-a	0.555901	0.906175	1.000000	0.993429	0.539881	0.938785
Clorofila-b	0.530025	0.932089	0.993429	1.000000	0.500995	0.952677
Carotenóides	0.570698	0.359017	0.539881	0.500995	1.000000	0.546929
Antocianina	0.533851	0.973103	0.938785	0.952677	0.546929	1.000000

Os valores das estatísticas das imagens geradas indicam a maior proximidade em ordem de grandeza dos valores nos níveis de cinza das imagens das razões das clorofilas e da antocianina. Os carotenóides e a água foliar também apresentam ordens de grandeza próximas, porém, não apresentam alta correlação entre si. Estes valores estão de acordo com os diferentes níveis de absorção em cada uma das bandas escolhidas como denominador para as razões de banda da água foliar e dos pigmentos, conforme apresentado na Figura 2.

Verificou-se que a água foliar tem correlação média e da mesma ordem com cada um dos pigmentos foliares, entre 0.41 e 0.57. O mesmo ocorre com os carotenóides, com correlações



médias com a água foliar e demais pigmentos foliares.

As clorofilas, conforme esperado, apresentam correlação alta entre elas, sempre superior a 0.9. Apresentam também grande correlação com a antocianina. Esta variação de respostas espectrais para as substâncias detectadas pelas razões de bandas pode ser visualizada através de composições coloridas apresentadas a seguir.

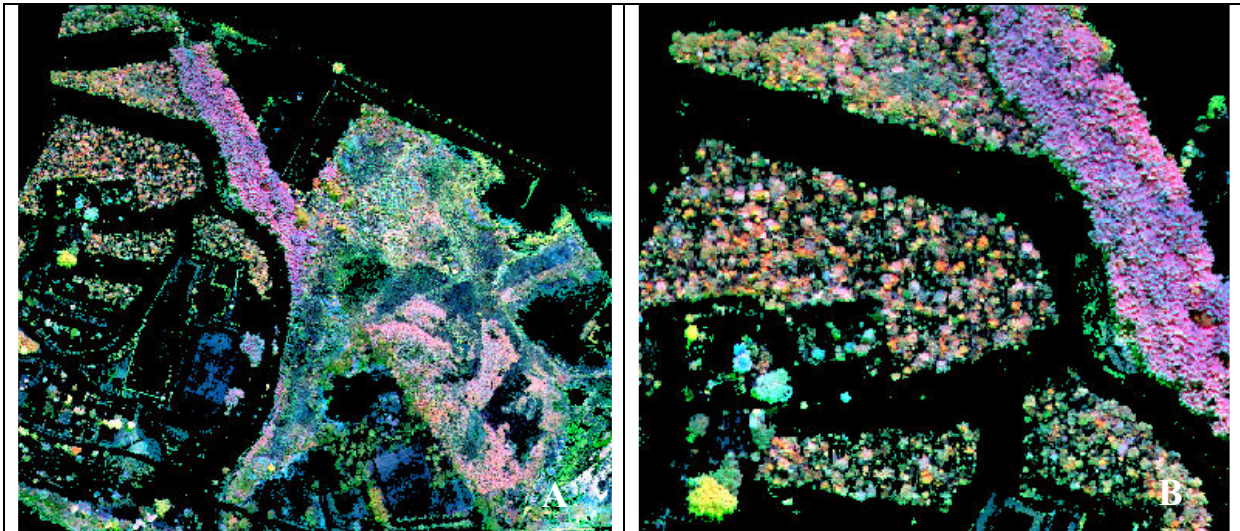


Figura 3. Composição RGB: R (antocianina); G (água foliar); B (carotenóides): A) área de estudo total; B) zoom evidenciando duas fisionomias vegetacionais.

A grande variação na produção de pigmentos foliares e na concentração de água nas folhas entre as espécies é apresentada na figura acima. Na figura 3-B observamos a presença de duas fisionomias vegetacionais distintas. A esquerda da imagem uma comunidade heterogênea, com diversidade acentuada e classificada em campo, como uma floresta secundária em estágio inicial de regeneração. Desta forma não se observam padrões definidos de respostas espectrais quanto à presença de antocianina, água foliar e carotenóides.

Já no bloco à direita, observou-se uma comunidade vegetal homogênea, com alta resposta espectral aos carotenóides e reduzida resposta à água foliar. Esta vegetação, caracterizada em campo como um bambuzal, apresenta estes padrões, provavelmente, por apresentar baixa área foliar, expondo seus colmos (de coloração amarelada), e por apresentar alta troca de folhas (com folhas senescentes expostas). Isto explica a alta resposta aos carotenóides. A tendência de armazenamento de água nos colmos por muitas espécies, vulgarmente denominadas, de bambu pode ser a explicação pela menor resposta à água foliar.

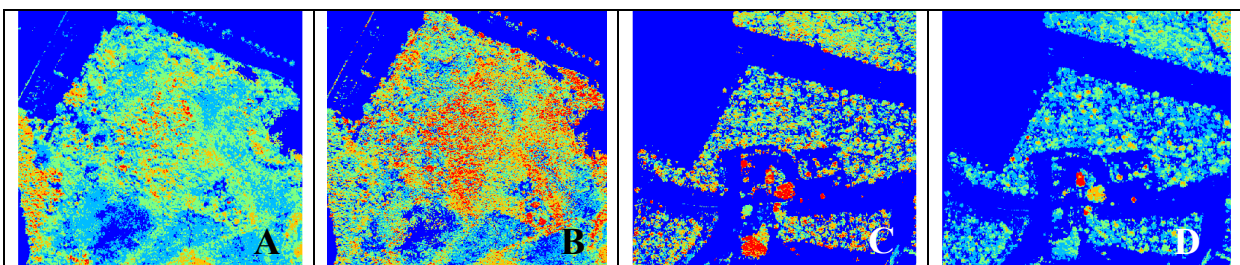


Figura 4. Pseudocolor em cinco fatias com variação do azul (menor grau) ao vermelho (maior grau) evidenciando a presença de: A) água foliar em área alagada; B) carotenóides em área alagada; C) água foliar em área não-alagada; D) carotenóides em área não-alagada.

Nas estatísticas geradas a água foliar não apresenta grande correlação com os carotenóides (0,57). No entanto, este cálculo foi realizado para a imagem como um todo. Se tratarmos da

relação dos pigmentos e da água foliar com os diferentes micro-ambientes presentes na área de estudo, esta correlação pode se apresentar de forma diferenciada.

A água foliar e a produção de carotenóides variam de acordo com a espécie, com a disponibilidade hídrica e com a sazonalidade. Observou-se uma relação muito maior da água foliar com os carotenóides na área alagada, onde a vegetação é mais homogênea (Figuras 4-A e 4-B). Isto provavelmente ocorre devido ao amarelecimento das folhas, promovido pelo excesso de água ocorrente naquele ambiente e conseqüente, aumento da produção de carotenóides. Na outra área (Figuras 4-C e 4-D), onde não ocorre saturação de água no solo, a produção deste pigmento e sua relação com a água foliar não apresenta correlação expressiva, como no caso anterior.

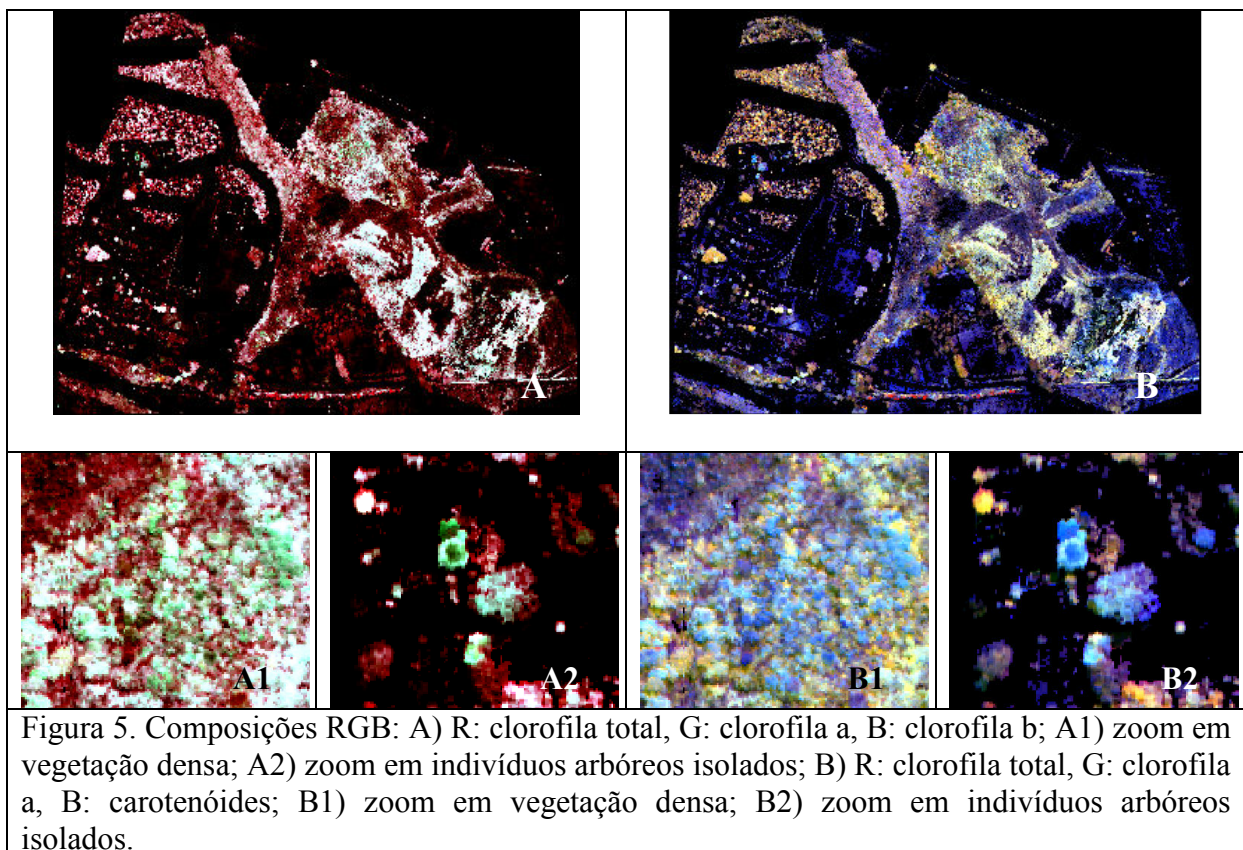


Figura 5. Composições RGB: A) R: clorofila total, G: clorofila a, B: clorofila b; A1) zoom em vegetação densa; A2) zoom em indivíduos arbóreos isolados; B) R: clorofila total, G: clorofila a, B: carotenóides; B1) zoom em vegetação densa; B2) zoom em indivíduos arbóreos isolados.

Segundo CHAPPELLE *et al.* (1992), a clorofila a é fator limitante do processo de fotossíntese, é ela quem recebe a radiação solar e repassa para a clorofila b e para os carotenóides a radiação absorvida. No entanto, parece que ocorre uma variação em quantidade, entre espécies, de clorofila b e carotenóides fotossintetizantes. Como observado nas imagens acima, o baixo teor de clorofila b, evidenciando a clorofila a (verde) nas Figuras 5-A 5-A1 e 5-A2 reflete, confiavelmente, a maior presença de carotenóides (azul) nas Figuras 5-B 5-B1 e 5-B2.

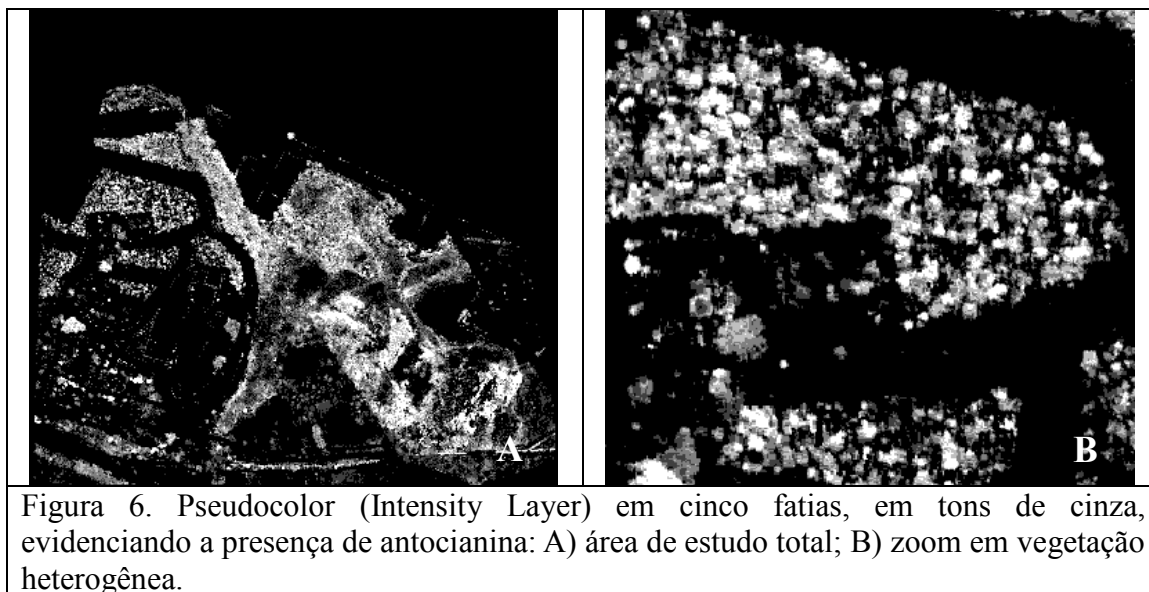


Figura 6. Pseudocolor (Intensity Layer) em cinco fatias, em tons de cinza, evidenciando a presença de antocianina: A) área de estudo total; B) zoom em vegetação heterogênea.

A quantidade produzida de antocianina está relacionada com a espécie e com as variações fenológicas da planta, por isso observa-se uma grande variação deste pigmento na imagem como um todo. Sua alta correlação com as clorofilas: 0,973 (clorofila total x antocianina); 0,938 (clorofila a x antocianina) e 0,952 (clorofila b x antocianina) foi citada também por Blackburn (2007).

#### 4. Conclusões

O objetivo do estudo foi atingido com sucesso, pois foi possível correlacionar as respostas espectrais dos diferentes pigmentos foliares e da água foliar com a variabilidade de espécies e ambientes observados na área de estudo, de acordo com conceitos de fisiologia vegetal. O uso de imagens que aliam alta resolução espectral e alta resolução espacial mostrou-se eficiente para estudos específicos de vegetação em micro e meso-escala. Para continuidade do estudo, sugere-se a realização de trabalho de campo mais acurado, com coleta de material botânico e uso de espectrometria de campo e em laboratório. Permitindo, deste modo, que se possa chegar a análises de fisiologia de espécies via sensoriamento remoto, alindo a identificação e a caracterização fisiológica das mesmas. Desta forma, será possível, também, detectar anomalias, stress e deficiências nutricionais da vegetação.

#### Agradecimentos

À Atech - Tecnologias Críticas ([www.atech.br](http://www.atech.br)) e ao Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, por terem cedido a imagem do sensor CASI-1500 utilizada neste estudo, à CAPES – pela concessão de bolsa de auxílio à mestranda Cibele Hummel do Amaral.

#### Bibliografia

Almeida, T. I. R. **Geobotânica por sensoriamento remoto em florestas tropicais e a abordagem sistêmica: uma ferramenta auxiliar no mapeamento geológico regional e na prospecção mineral**. 2005. 163p. Tese (Livre-docência em geologia sedimentary e ambiental). Instituto de Geociências, São Paulo. 2005.

Baret, F. **Espectros de pigmentos e compostos bioquímicos foliares: planilhas com dados de reflectância**. Informação escrita enviada por Frédéric Baret, INRA Avignon, França, 1999.

Blackburn, G. A. Hyperspectral remote sensing of plant pigments. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 4, p. 855–867, 2007.

Boegh, E. et al. A. Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. **Remote Sensing of Environment**. V. 81, p. 179-193, 2002.

Chappelle, E. W., Kim, M. S., and McMurtrey, J. E, Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): An algorithm for remote estimation of the concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids. ). **Remote Sensing of Environment**, v. 39, p. 239–247, 1992.

Galvão, L. S.; Vitorello, I.; Almeida Filho, R. Effects of band positioning and bandwidth on NDVI measurements of tropical savannahs. **Remote Sensing of Environment**, v. 67, p. 181–193, 1999.

Thenkabail, P. S. et al. Evaluation of narrowband and broadband vegetation indices for determining optimal hyperspectral wavebands for agricultural crop characterization. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 68, n. 6, p. 607-621, 2002.

Zwiggelaar, R. A review of spectral properties of plants and their potential use for crop/weed discrimination in row-crops. **Crop Protection** v. 17(3), p. 189-206, 1998