

## Definição e mapeamento de espécies indicadoras geobotânicas em imagens hiperespectrais

Cibele Hummel do Amaral <sup>1</sup>  
Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida <sup>1</sup>  
Carlos Roberto de Souza Filho <sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Instituto de Geociências, Universidade de Campinas – IG/UNICAMP  
Caixa Postal: 6152 - 13083-970 - Campinas - SP, Brasil  
beto@ige.unicamp.br

**Abstract.** This work shows a pixel-based mapping of a tropical tree species associated to a geological formation in the Mogi-Guaçu Ecological Station, southeastern of Brazil. Firstly, field data of sediments texture and forest inventory data were mined and analyzed using *Self-Organizing Maps* (SOM; Kohonen, 1982) for identifying geological formations and facies as well as indicator tree species. Four geological environments were defined but only three of them present associated tree species. Data from these target species and from other eight vegetation classes were used for spectral unmixing of the images mosaic, using *Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis* (MESMA; Roberts et al. 1998). A two-endmember analysis was performed *a priori* to select the best dataset for generating targets' fraction images, with tree endmembers models. These images were assessed at both crown and pixel scales. *Qualea grandiflora* Mart. was well mapped on the hyperspectral images clearly showing its association with the Aquidauana Formation. Using high spectral and spatial resolution data, this work probably is the first tree species mapping in tropical environments in Brazil, and the first one focusing in geobotany at individual tree crowns level.

**Palavras-chave:** hyperspectral remote sensing, geobotany, indicator tree species, sensoriamento remoto, geobotânica, espécies arbóreas indicadoras.

### 1. Introdução

A geobotânica via sensoriamento remoto óptico, como ferramenta de prospecção mineral e mapeamento geológico, apresenta grandes perspectivas por sua capacidade de otimizar os trabalhos de campo e gerar possíveis alvos a serem examinados. Além das variações morfo-fisiológicas observadas nas vegetações sobre mineralizações (p.ex., Brooks, 1983) e exsudações de hidrocarbonetos (p.ex., Sanches et al., 2013), a presença de espécies indicadoras também é observada (p.ex., Cannon, 1971). A difusão da técnica teve notável impulso com a disponibilização de imagens de sensoriamento remoto multiespectral na década de 70 (p.ex., Arden e Westra, 1977). No entanto, passou por período de quase ostracismo pela frequente falta de padrões em resposta espectral da vegetação sobre solos anômalos (Almeida, 2005). Como previsto por Sabins (1999), a disponibilidade de sensores hiperespectrais tem também encorajado novas investigações geobotânicas, incluindo aquelas em ambientes tropicais sem o intuito de prospectar minérios ou hidrocarbonetos (p.ex., Vitousek et al., 2009). Contudo, o nível das informações que podem ser obtidas através do sensoriamento remoto hiperespectral vão além do exposto, até o momento, em investigações geobotânicas.

A evolução das técnicas em espectroscopia de imageamento (sensoriamento hiperespectral) na discriminação espectral e mapeamento de plantas em nível específico ocorreu principalmente nos estudos envolvendo espécies exóticas e invasoras (p.ex., Underwood et al., 2003; Somers e Asner, 2013), dado que, além da importância ecológica de seu mapeamento, essas espécies constituem tipos ópticos distintos nas paisagens (Ustin e Gamon, 2010). A discriminação espectral em escala de copas individuais de espécies nativas de ambientes tropicais, possível apenas com sensores de resolução espacial fina, só veio a

acontecer em 2005 (Clark et al., 2005). No entanto, o mapeamento efetivo de espécies em comunidades altamente biodiversas não constituem uma tarefa fácil (Zhang et al., 2006). A elevada biodiversidade intra e interespecífica observada em formações tropicais é ainda pouco entendida pela comunidade científica (Asner e Martin, 2008). Assim, o sucesso do mapeamento de uma dada espécie nesses ambientes é determinado por sua singularidade espectral (Asner e Martin, 2009), a qual pode ser descrita como um tipo óptico distinto, resultante de sua diferenciação estrutural, bioquímica, fisiológica e fenológica, diante das outras espécies presentes na paisagem (Gamon, 2008; Ustin e Gamon, 2010). Embora já se tenha um número razoável de aplicações bem sucedidas em discriminação e mapeamento de espécies, via espectroscopia de imageamento de resolução espacial fina, parecem faltar na literatura pesquisas que abordam o mapeamento de espécies indicadoras de formações e/ou facies geológicas entre os trópicos. Desta forma, o objetivo deste estudo é definir espécies indicadoras de formações e facies geológicas na Estação Ecológica de Mogi-Guaçu, São Paulo, Brasil, bem como realizar o mapeamento de suas frações espectrais em imagens hiperespectrais de resolução espacial fina, a fim de contribuir à geobotânica por sensoriamento remoto em ambientes tropicais.

## **2. Metodologia de trabalho**

### **2.1. Área de estudo**

A área de estudo compreende a Estação Ecológica de Mogi-Guaçu – EEMG, localizada no município de Mogi-Guaçu, Estado de São Paulo, SE do Brasil (Figura 1). Apresenta área de 1.200 ha e está localizada entre as coordenadas 22°16' e 22°18' S e 47°08'30" e 47°12'30" W. A geologia local é representada pela Formação Aquidauana e por Depósitos Aluvionares do rio Mogi-Guaçu (CPRM, 2006). A primeira, do Carbonífero da Bacia do Paraná, é caracterizada por depósitos continentais e constituída por arenitos e siltitos de cores avermelhadas, além de conglomerados, diamictitos, ritmitos e folhelhos. Os Depósitos Aluvionares são formados por areias, cascalheiras, siltes, argilas e, localmente, turfas (CPRM, 2006). A EEMG está inserida no bioma Cerrado (savana tropical brasileira) e apresenta mosaicos de formações de Cerrado “sensu lato” e de Floresta Estacional Semidecidual (FES).

### **2.2. Definição “in loco” de espécies indicadoras geológicas**

Primeiramente um inventário da vegetação arbustivo-arbórea foi realizado e as fisionomias florestais definidas de acordo com Ribeiro e Walter (2008). Foram alocadas 10 parcelas de 20x60 m e o nível de inclusão utilizado foi de diâmetro do tronco (a 1,30 m de altura)  $\geq 5$  cm. Foram anotados o diâmetro, a altura estimada e a identificação taxonômica de espécies (*Angiosperm Phylogeny Group – APG II*) de todos os indivíduos amostrados. Parâmetros fitossociológicos foram obtidos no software FITOPAC 1.6.4 (Universidade de Campinas, Campinas, SP, BRA).

As parcelas foram subdivididas em três subparcelas contíguas de 20x20 m e, adicionalmente, quatro transectos de 5x100 m, subdivididos em subtransectos de 5x10 m, foram alocados sob o contínuo de FES (Figura 1). No centro de cada subparcela e subtransecto foram coletados solos e sedimentos a 2 m de profundidade. As amostras de sedimentos foram analisadas para classificação granulométrica, como: Argila (tamanho de grão  $< 0,002$  mm), Silte (0,002 - 0,053 mm), Areia muito fina (0,053 - 0,105 mm), Areia fina (0,105 - 0,210 mm), Areia média (0,210 - 0,50 mm), Areia grossa (0,50 - 1,0 mm) e Areia muito grossa (1,0 - 2,0 mm).

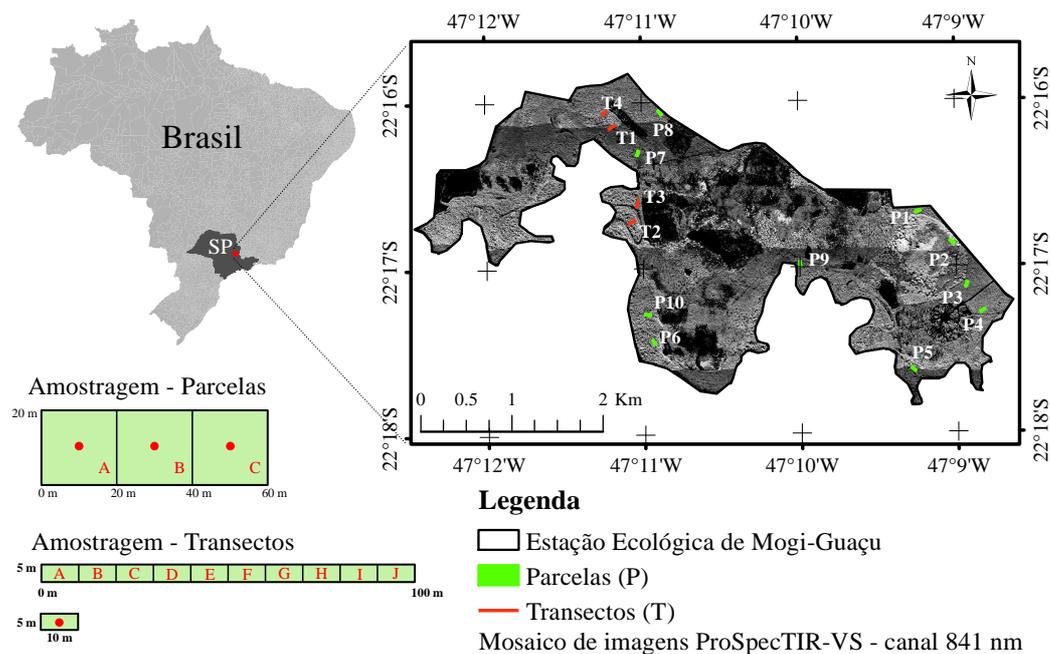


Figura 1. Localização da área de estudo e das parcelas e transectos de amostragem.

A técnica *Self-Organizing Maps* (SOM; Kohonen, 1982), conhecida por realizar análises multivariadas e de mineração de dados mutuamente, foi aplicada sobre os dados utilizando-se o software SiroSOM (<http://www.csiro.au/Organisation-Structure/Flagships/Minerals-Down-Under-Flagship/Mining/SOM-data-analysis.aspx>). O SOM é realizado através de quantificação vetorial em um espaço n-dimensional. Os vetores, que representam a estrutura dos dados, são apresentados em um mapa 2D de saída como nós. Sobre os SOM foram aplicadas análise por principais componentes – APC (Pearson, 1901) e análise de correlação pelo coeficiente de correlação ranqueada de Spearman –  $\rho$  (Spearman, 1904), onde  $\rho \geq |0,04|$  indica relações significativas. A definição dos geoambientes por suas composições texturais discriminantes foi atingida com o treinamento do SOM e APC, utilizando dados de granulometria de sedimentos das 70 unidades amostrais (u.a.). Após selecionadas as espécies amostradas exclusivamente nos geoambientes definidos, foi realizada validação de suas relações com as texturas de sedimentos discriminantes daqueles ambientes. Para tanto, foram realizados o treinamento do SOM e análise de correlação ranqueada de Spearman, utilizando dados de granulometria de sedimentos e presença/ausência de espécies nas 70 u.a.

## 2.3. Mapeamento das frações espectrais de espécies indicadoras

### 2.3.1. Aquisição e pré-processamento de dados hiperespectrais

Os dados hiperespectrais ProSpecTIR-VS (SpecTIR – Reno, NV, EUA/ FotoTerra – São Paulo, SP, BRA) foram obtidos no dia 8 de junho de 2010 por um conjunto de dois sensores. O primeiro opera com intervalo de amostragem de  $\sim 4,5$  nm entre 400 e 970 nm (121 bandas), e o segundo com intervalo de  $\sim 6,3$  nm entre 970 e 2.500 nm (236 bandas). Dezessete faixas de vôo (leste-oeste) foram adquiridas, com variação em ângulo solar zenital de  $53,62^\circ$  a  $63,83^\circ$  e azimutal de  $325,43^\circ$  e  $312,01^\circ$ , a uma altura de  $\sim 1.350$  m, com  $\sim 330$  m de largura e campo de visada instantâneo no terreno (GIFOV, *pixel*) de 1,0 m.

A correção atmosférica foi realizada sobre os dados de radiância, no software ACORN 5 (ImSpec LLC – Palmdale, CA, EUA). Para tanto, foram estimados o vapor de água e a água líquida presentes nas imagens, com uso das bandas localizadas em 940 e 1140 nm. Amostras de solos superficiais e suas coordenadas geográficas foram coletadas em estradas não pavimentadas, com amostragem coberta por todas as faixas de vôo. Dados de espectroscopia

de laboratório foram obtidos com espectrômetro FieldSpec 3 Hi-Res (ASD Inc. – Boulder, CO, EUA) e probe de contato. Esse equipamento opera com resoluções espectrais de 3,0 nm (entre 350-700 nm), 8,5 nm (700-1.400 nm) e 6,5 nm (2.100 nm), e intervalo de amostragem de 1,4 e 2,0 nm. Os espectros foram tratados, através de rotinas PRISM (Kokaly, 2011) no software ENVI 4.8. (Exelis Visual Information Solutions Inc. – Boulder, CO, EUA), e utilizados para o realce espectral das faixas de imageamento no ACORN 5. As imagens foram georreferenciadas com dados de vôo *Geographic Look Table* e agrupadas em um mosaico.

A razão sinal-ruído dos dados foi analisada para cada banda e 216 delas, do visível (VIS) ao infravermelho ondas curtas (SWIR), foram mantidas para processamento. Uma razão de bandas simples ( $SR = \rho_{797,3}/\rho_{681,5}$  nm; Jordan, 1969) foi realizada sobre os dados ProSpecTIR-VS para geração e aplicação de máscara sobre o mosaico. Todas as superfícies com valores de SR inferiores a 0,5 foram mascaradas, permanecendo à análise apenas a vegetação mais densa. Os conjuntos de dados VSWIR (216 canais; de 530 nm a 2.352 nm), VIS-NIR1 (82 canais; 530-919 nm) e NIR2-SWIR (134 canais; 1.141-2.352 nm) tiveram seu contínuo removido (CR; Clark e Roush, 1984), a fim de testar se a prévia divisão do espectro em intervalos e a normalização dos dados podem influenciar positivamente os resultados de classificação espectral. E, assim, seis diferentes subconjuntos espectrais foram considerados para análise espectral: VSWIR e VSWIR(CR); VIS-NIR1 e VIS-NIR1(CR); NIR2-SWIR e NIR2-SWIR(CR).

### 2.3.2. Coleta dos dados de referência nas imagens e seleção de membros-finais

Foram coletadas as coordenadas geográficas das copas de indivíduos das espécies-alvo com a utilização de GPS diferencial. A antena do receptor móvel foi acoplada à haste extensível, com cabo de transmissão de dados de 30 m, e elevada ao dossel com auxílio de profissional especializado. Os pontos foram coletados com precisões de até 1,0 m. A correção diferencial foi realizada com informações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS em tempo real (RBMC-IP/IBGE). Foram adicionadas à análise espectral outras classes de vegetação representativas da paisagem: espécies arbóreas de cerradão, espécies arbóreas de mata ciliar, *Citrus* spp. (frutas cítricas), *Dendrocalamus* sp. (bambú), *Eucalyptus* spp. (eucaliptos), *Poaceae* spp. (gramíneas nativas e exóticas), *Pinus* spp. (pinheiros) e *Saccharum* spp. (cana-de-açúcar). Seus dados de referência foram coletadas com apoio da base vetorial (parcelas e transectos) e coordenadas coletadas em campo, com GPS de navegação. Regiões de interesse de até 9,0 m<sup>2</sup> foram obtidas sobre as copas/dossel das classes. Foram extraídos os dados espectrais médios de cada polígono (~ 20 por classe), para cada um dos seis dados de entrada.

As bibliotecas globais de espectros foram divididas aleatoriamente em bibliotecas de treinamento e validação. Aquelas de treinamento tiveram metadados e matrizes quadradas (armazenadas em imagem BSQ) criados para os processos de seleção de membros-finais (MF). Ambos foram gerados no software ViperTools (Roberts et al., 2007). Após diversos testes de otimização dos resultados de modelagem espectral, limiares de fração de MF e restrições de Erro Quadrático Médio (EQM), permissíveis à classificação, foram definidos entre -0,05 e 1,05 e  $EQM \leq 0,025$ , para dados originais de reflectância, e entre -0,01 e 1,01 e  $EQM \leq 0,065$  àqueles com contínuo removido. Os métodos de seleção de MF *EAR*, *MASA* e *CoB* – conjuntamente designados como EMC (Roberts et al., 2007) e *Iterative Endmember Selection* – IES (Schaaf et al., 2011) foram testados sobre as bibliotecas de treinamento.

### 2.3.3. Análise de mistura espectral com múltiplos membros-finais

As análises de mistura espectral foram realizadas com a técnica *Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis* (MESMA; Roberts et al., 1998). A classificação espectral com dois MF (MF de dada classe e MF de sombra) foi realizada como procedimento prévio à seleção

das imagens e conjuntos de MF a serem utilizados nas modelagens baseadas em *pixel*. As bibliotecas de validação foram classificadas pelas bibliotecas de MF, utilizando rotina IDL (Roth et al., 2012). Os resultados de classificação espectral foram analisados através das métricas de exatidão do produtor e do usuário atingidos pelas classes-alvo. No ViperTools (Roberts et al., 2007), os *pixels* das imagens selecionadas foram modelados por três MF: MF da classe de espécie-alvo, MF de outra classe de vegetação e sombra fotométrica. Os MF utilizados nessa etapa foram aqueles que classificaram corretamente os espectros de validação de sua classe, na etapa anterior. As imagens foram normalizadas pela extração da fração de sombra, permanecendo no produto apenas as frações de vegetação verde – GV. Essas imagens foram avaliadas em escala de copa ( $n = 247$ ) e de *pixel* ( $n = 1.036$ ), utilizando as regiões de interesse de extração dos espectros de referência. A fim de otimizar o mapeamento das frações, as imagens foram classificadas (em duas classes) utilizando um valor de corte determinado pelo valor máximo da fração de espécie-alvo observado na copa de outra classe.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Definição dos ambientes geológicos e de espécies indicadoras

A distribuição dos *loadings* no espaço 2D (PC1 e PC2) demonstra a existência de quatro ambientes geológicos bem definidos (Figura 2). Depósitos de planície de inundação, que incluem aqueles em meandros abandonados, com *loadings* negativos na PC1 e positivos na PC2 (I); depósitos de diques marginais e de barras de meandro, com *loadings* negativos na PC1 e na PC2 (II); Colinas e platôs, com *loadings* positivos na PC1 e negativos na PC2 (III); e bordas convexas de colina, caracterizadas como (paleo)diques erodidos pelo rio Mogi-Guaçu, com *loadings* positivos na PC1 e na PC2 (IV). Os *loadings* da PC1, assim, associam sinal negativo aos Depósitos Aluvionares e sinal positivo aos solos formados sobre a Formação Aquidauana. Os *components plots* de dados revelaram as associações entre as classes texturais nas 70 u.a.. Esses indicaram dissimilaridades entre as frações silte e areia média e entre as frações areia muito fina e areia grossa e muito grossa. A Matriz-U, que sintetiza as similaridades entre os nós no mapa 2D, indicou claramente a dissociação dos sedimentos discriminantes das facies nos terrenos do Carbonífero e do Quaternário (Figura 2).

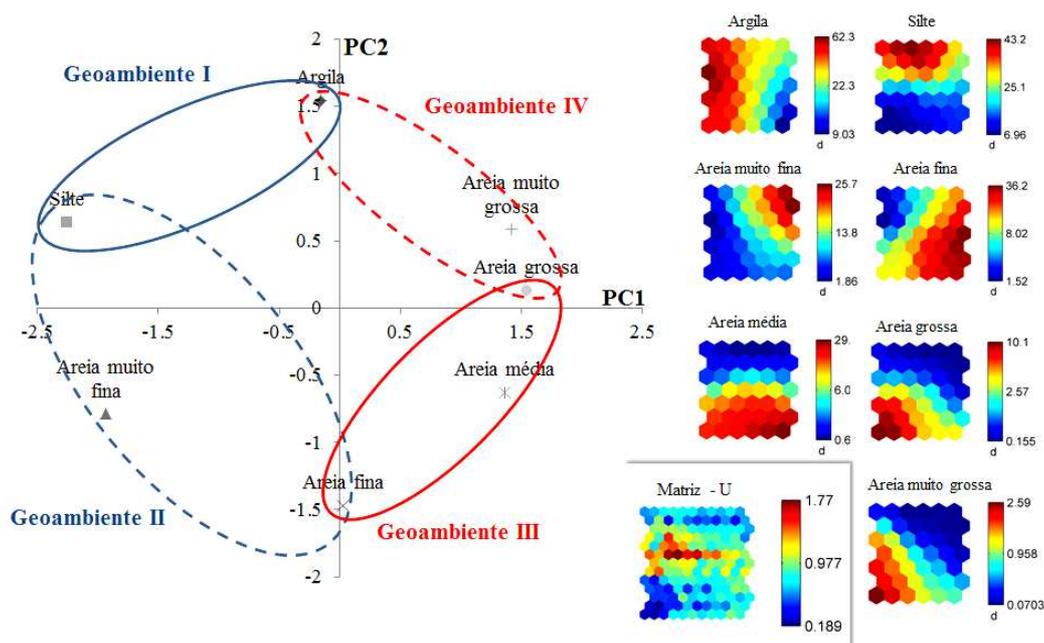


Figura 2. Definição dos geoambientes da área de estudo via APC do SOM, *components plots* indicando a distribuição das frações granulométricas e Matriz-U demonstrando as similaridades (azul-verde) e dissimilaridades (laranja-vermelho) no mapa auto-organizado de dados.

Embora quatro geoambientes tenham sido bem definidos, apenas três apresentam espécies associadas na amostragem realizada: i) *Inga vera* Willd. subsp. *affinis* (DC.) T.D. Penn. (INVE) encontra-se associada ao geoambiente I e apresenta correlação positiva com a fração silte dos sedimentos ( $\rho = 0,69$ ) e negativa com as frações areia fina (-0,66), areia média (-0,63), areia grossa (-0,61) e areia muito grossa (-0,49); ii) *Qualea grandiflora* Mart (QUGR) demonstrou estar associada ao geoambiente III e apresenta, na área de estudo, correlação positiva com as frações areia fina (0,66) e areia média (0,58) dos sedimentos e correlação negativa com a fração silte (-0,49); iii) *Cedrela fissilis* Vell. (CEFI) foi considerada indicadora do geoambiente IV e apresenta correlação positiva com as frações areia muito grossa (0,80), grossa (0,74) e média (0,50) e negativa com as frações silte (-0,63) e areia muito fina (-0,56) dos sedimentos.

### 3.2. Classificação espectral e mapeamento das espécies-alvo

Analisando os resultados de classificação espectral com dois MF, as mais altas e balanceadas exatidões específicas de classificação (exatidão do produtor – EP e exatidão do usuário – EU) observadas para CEFI não chegaram a atingir 50,0% (EP = 41,7% e EU = 45,5%, sobre dados VSWIR(CR)/IES). INVE foi melhor classificada utilizando dados VSWIR de reflectância, com MF selecionados via IES (EP = 71,4% e EU = 48,4%). QUGR foi melhor classificada utilizando dados VSWIR(CR)/EMC (EP = 61,1% e EU = 100,0%).

Foi observado que QUGR apresentou o melhor potencial de mapeamento entre as espécies-alvo na EEMG, na modelagem baseada em *pixel* com três MF. A abundância (*subpixel*) média de sua fração nos *pixels* de suas copas de referência ( $0,53 \pm 0,23$ ), bem como a abundância média de sua fração em suas copas ( $0,52 \pm 0,24$ ) foram inferiores ao observado para CEFI ( $0,58 \pm 0,23$  e  $0,57 \pm 0,21$ , respectivamente) e INVE ( $0,62 \pm 0,22$  e  $0,62 \pm 0,19$ , respectivamente). Contudo, excetuando-se valores atípicos (*outliers*), as abundâncias máximas da fração de QUGR observada nas copas e *pixels* de outras classes não ultrapassaram 0,49 e 0,45, respectivamente, o que não foi observado nas imagens de frações de CEFI e INVE. Em suas imagens diversas classes apresentaram valores elevados ( $\geq 0,50$ ) de suas frações tanto em escala de *pixel* (seis classes para CEFI e sete para INVE) como de copa (duas para CEFI e quatro para INVE). A abundância máxima, considerada atípica (*outlier*), da fração de QUGR observada nas copas de outras classes foi de apenas 62% (*Eucalyptus* spp).

A Figura 3, que mostra a imagem de fração QUGR classificada (corte em 65% de sua fração), indica a ocorrência de concentrações de *pixels* classificados com sua fração apenas sobre as colinas e platôs da Formação Aquidauana, às quais a espécie foi considerada localmente associada. Há virtual ausência de *pixels* classificados como QUGR na baixada dominada pelos sedimentos quaternários, exceto importante concentração no extremo oeste da área. Essa exceção, entretanto, pode dever-se mais à imprecisão do contato geológico do que a falhas na hipótese de trabalho e no conjunto de processamentos. Este local, por dificuldade de acesso, deixou de ser visitado em campo e o contato foi traçado utilizando cartas topográficas 1:10.000. Desta forma, *Qualea grandiflora* (QUGR) pôde ser considerada uma eficiente espécie indicadora da Formação Aquidauana na área de estudo, via Geobotânica por sensoriamento remoto em nível específico. A pesquisa teve sucesso, assim, tanto em considerá-la espécie indicadora daquela unidade geológica como em mapeá-la remotamente.

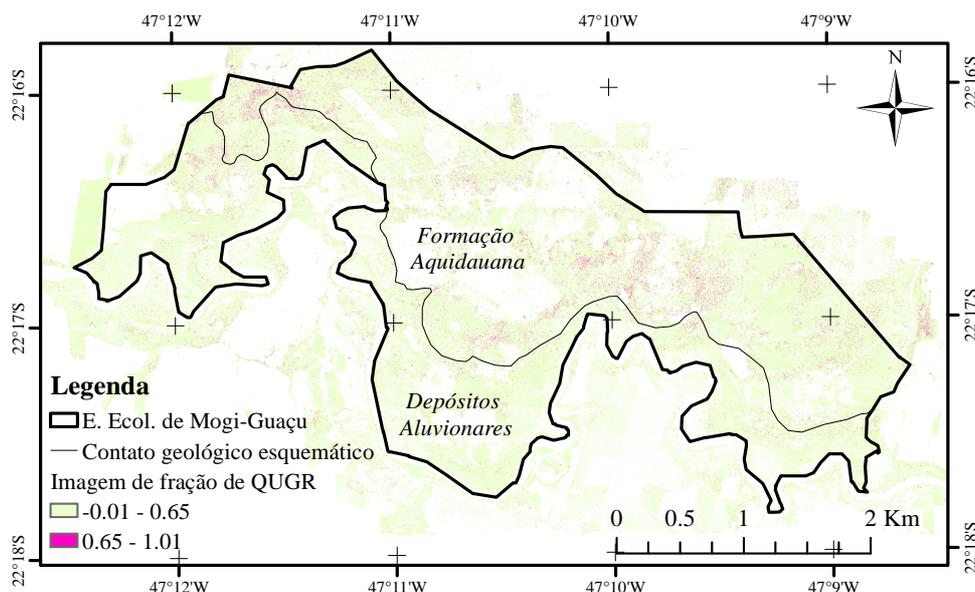


Figura 3. Imagem classificada de fração espectral de *Qualea grandiflora* (QUGR), na Estação Ecológica de Mogi-Guaçu, São Paulo, Brasil: *pixels* com menos de 65% de sua fração em verde e com mais de 65% de sua fração em magenta. Contato geológico esquemático traçado em escala 1: 10.000.

#### 4. Conclusões

Esse estudo demonstrou a possibilidade de definição “in loco”, discriminação espectral e mapeamento da espécie tropical (*Qualea grandiflora* Mart., QUGR) considerada indicadora da Formação Aquidauana (Carbonífero da Bacia do Paraná) na Estação Ecológica de Mogi-Guaçu, São Paulo, Brasil. Esse mapeamento baseado em *pixel* foi possível com a utilização de dados hiperespectrais (VSWIR; 530-2.352 nm) de alta resolução espacial (1,0 m) e técnica de processamento *Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis* (MESMA). Os resultados dessa pesquisa mostraram-se encorajadores a futuras investigações. O mapeamento de espécies arbóreas tropicais em imagens hiperespectrais ainda não é observado no Brasil, e o intuito de correlacionar a distribuição espacial dessas espécies à geologia local parece ser uma abordagem inédita em termos internacionais. A aplicação da técnica pode ser ainda mais promissora em terrenos com presença de mineralizações ou processos mineralizantes pela maior diversidade geológica presente e mais evidente seleção de espécies por adaptabilidade. Com o aumento da disponibilidade de dados de alta resolução espectral e espacial, bem como com a evolução das técnicas de processamento desses dados, acredita-se que a geobotânica por sensoriamento remoto, em nível específico, poderá avançar notadamente.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte ao desenvolvimento do projeto (2010/51758-2), ao Instituto Florestal do Estado de São Paulo (IF-SP), à equipe FOTOTERRA/SpecTIR, particularmente ao Guilherme Pinho e Conrad Wright, pela cessão das imagens utilizadas nessa pesquisa, ao *Queensland Centre for Advanced Technologies* (CSIRO/AUS) e ao *Visualization & Image Processing for Environmental Research Laboratory* (UCSB/EUA). Especial agradecimento a Stephen J. Fraser e Dar A. Roberts por suas contribuições ao desenvolvimento da pesquisa. A Dirceu de Souza, Giovani de Souza, Moreno Botelho, Daniela Gamito, Carlos Carrasco, Sidney Goveia, Lucíola Magalhães, Flávia Mendes, Kelly Roth e Seth Peterson, por suas colaborações. Cibele H. Amaral agradece à FAPESP por sua bolsa de doutoramento (2010/51518-0). Teodoro I. R. Almeida e Carlos R. Souza Filho agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por suas bolsas de pesquisa.

## Referências bibliográficas

- 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. 158p. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2005.
- Arden Jr, D. D.; Westra, R. N. (1977). **Remote sensing of geobotanical relations in Georgia**. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1977. 103p. (NASA-CR-150709)
- Asner, G. P.; Martin, R. E. Airborne spectranomics: mapping canopy chemical and taxonomic diversity in tropical forests. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v.7, n.5, p.269-276, 2009.
- Asner, G. P.; Martin, R. E. Spectral and chemical analysis of tropical forests: scaling from leaf to canopy levels. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p.3958-3970, 2008.
- Brooks, R. R. **Biological Methods of prospecting for minerals**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 322 p.
- Cannon, H. L. The use of plant indicators in ground water surveys, geologic mapping, and mineral prospecting. **Taxon**, p.227-256, 1971.
- Clark, M. L.; Roberts, D. A.; Clark, D. B. Hyperspectral discrimination of tropical rain forest tree species at leaf to crown scales. **Remote Sensing of Environment**, v.96, p.375-398, 2005.
- Clark, R. N.; Roush, T. L. Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. **Journal of Geophysical Research**, v.89, p.6329-6340, 1984.
- Gamon, J.A. Tropical Remote Sensing – Opportunities and Challenges. In: Kalacska, M.; Sanchez-Azofeifa, G. A. (Org.). **Hyperspectral remote sensing of tropical and subtropical forests**. New York: Taylor & Francis Group, 2008. cap. 13, p. 297-304.
- Jordan, C. F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, v.50, p.663-666, 1969.
- Kohonen, T. Self-organized formation of topologically correct feature maps. **Biological Cybernetics**, v.43, p.59-69, 1982.
- Kokaly, R. F. **PRISM: Processing routines in IDL for spectroscopic measurements**. Denver: USGS, 2009. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/of/2011/1155/>>. Acesso em: 10 dez. 2012.
- Pearson K. LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v.2, n.11, p.559-572, 1901.
- Ribeiro, J.F.; Walter, B.M.T. As principais fitofisionomias do Bioma Cerrado. In Sano, S.M.; Almeida, S. P.; Ribeiro, J. F. (Org.). **Cerrado: ecologia e flora**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 2008. cap. 6, p.153-212.
- Roberts, D. A.; Gardner, M.; Church, R.; Ustin, S.; Scheer, G.; Green, R. O. Mapping Chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**, v.65, p.267-279, 1998.
- Roberts, D. A.; Halligan, K. Q.; Dennison, P. E. **ViperTools**. Santa Barbara: UCSB, 2007. Disponível em: <<http://www.vipertools.org/>>. Acesso em: 15 fev. 2013.
- Roth, K. L.; Dennison, P. E.; Roberts, D. A. Comparing endmember selection techniques for accurate mapping of plant species and land cover using imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v.127, p.139-152, 2012.
- Sabins, F. F. Remote sensing for mineral exploration. **Ore Geology Reviews**, v.14, n.3, p.157-183, 1999.
- Sanches, I. D.; Souza Filho, C. R.; Magalhaes, L. A.; Quitério, G. C. M.; Alves, M. N.; Oliveira, W. J. Assessing the impact of hydrocarbon leakages on vegetation using reflectance spectroscopy. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.78, p.85-101, 2013.
- Schaaf, A. N.; Dennison, P. E.; Fryer, G. K.; Roth, K. L.; Roberts, D. A. Mapping plant functional types at three spatial resolutions using multiple endmember spectral mixture analysis. **GIScience and Remote Sensing**, v.48, p.324-344, 2011.
- Serviço Geológico do Brasil – CPRM. **Geologia e recursos minerais do estado de São Paulo: sistema de informações geográficas (SIG)**. Mapas Geológicos Estaduais. Escala 1:750.000. Programa Geologia do Brasil. São Paulo: CPRM, 2006. 1 CD-ROM.
- Somers, B.; Asner, G. P. Multi-temporal hyperspectral mixture analysis and feature selection for invasive species mapping in rainforests. **Remote Sensing of Environment**, v.136, p.14-27, 2013.
- Spearman, C. General Intelligence, Objectively Determined and Measured. **The American Journal of Psychology**, v.15, n.2, p.201-292, 1904.
- Underwood, E. C.; Ustin, S. L.; Di Pietro, D. Mapping nonnative plants using hyperspectral imagery. **Remote Sensing of Environment**, v.86, p.150-161, 2003.
- Ustin, S. L.; Gamon, J. A. Remote sensing of plant functional types. **New Phytologist**, v.186, p.795-816, 2010.
- Vitousek, P.; Asner, G. P.; Chadwick, O. A.; Hotchkiss, S. Landscape-level variation in forest structure and biogeochemistry across a substrate age gradient in Hawaii. **Ecology**, v.90, n.11, p.3074-3086, 2009.
- Zhang, J.; Rivard, B.; Sánchez-Azofeifa, A.; Castro-Esau, K. Intra-and inter-class spectral variability of tropical tree species at La Selva, Costa Rica: Implications for species identification using HYDICE imagery. **Remote Sensing of Environment**, v.105, n.2, p.129-141, 2006.