

DINÂMICA DO USO E COBERTURA DA TERRA NA REGIÃO DE TRANSIÇÃO ENTRE FLORESTA E SAVANA NO ESTADO DE RORAIMA

LAND USE AND COVER CHANGE DYNAMICS IN TRANSITION REGION OF FOREST AND SAVANNA IN RORAIMA STATE

João Arthur Pompeu Pavanelli¹, Maristela Ramalho Xaud², Haron Abraham Magalhães Xaud², João Roberto dos Santos¹, Lênio Soares Galvão¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Av. dos Astronautas, 1758, 12.227-010, São José dos Campos, SP, Brasil, e-mail: jpompeu@dsr.inpe.br

²Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Roraima
BR- 174, km 8, Distrito Industrial, 69301-970 - Boa Vista - RR, Brasil
maristela.xaud@embrapa.br

RESUMO

O objetivo do presente artigo é analisar a dinâmica de uso e cobertura da terra em um trecho da zona de contato floresta e savana no Estado de Roraima, por meio de procedimento classificatório multi-sensor, envolvendo imagens TM/Landsat-5, (ano 2010), e do OLI/Landsat-8 (2014). As imagens foram calibradas e classificadas fazendo uso da abordagem pixel a pixel pelo algoritmo Mínima Distância. A análise da dinâmica da paisagem foi realizada a partir dos mapeamentos temáticos com a ferramenta *Land Change Modeler*. Os resultados evidenciaram maior pressão antrópica sobre a região savânica, em comparação com a área florestal.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, Monitoramento, Land Change Modeler, Uso e cobertura da terra.

ABSTRACT

The aim of this study was to access land use and cover change dynamics in the transition zone between forest and savanna in Roraima State, by means of multisensor approach with TM/Landsat-5 (2010) and OLI/Landsat-8 (2014) images. The images were calibrated and the pixel based Minimum Distance algorithm was used to make the classification. The landscape dynamics was accessed with Land Change Modeler tool, based on the thematic maps from 2010 and 2014. The results highlighted more anthropogenic pressure, mainly, in savanna region than in forest areas.

Keywords: Remote Sensing, Monitoring, Land Change Modeler, Land use and land cover

INTRODUÇÃO

A escolha de procedimentos para detecção de mudanças de uso e cobertura da terra varia de acordo com objetivos, pois existem técnicas que tornam possível a simples detecção, outras que expressam mensurações e ainda aquelas estritamente destinadas a atualização das transformações em determinada paisagem. Todas elas, devem se basear na escolha dos dados-fonte para o levantamento, que devem estar e refletir a frequência, a variabilidade do fenômeno. Por conseguinte, diversas técnicas de detecção de mudanças da paisagem, fazendo uso de produtos derivados da tecnologia espacial, vêm sendo utilizadas, podendo-se citar a diferenciação de imagens, a razão entre bandas, a comparação pós-classificação, a análise de componentes principais (ACP) e a análise de vetores de mudanças (SINGH, 1989; MÁZ, 1998; MALDONADO *et al.*, 2002; COPPIN *et al.*, 2004; LORENA *et al.*, 2004).

Utilizando séries temporais de imagens-índice de vegetação EVI do MODIS/Terra (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), Lacruz e Santos (2007) estudaram as lacunas de conservação de corredores ecológicos na Amazônia e Cerrados, monitorando a dinâmica de uso e cobertura da terra através da técnica

de análise harmônica. A técnica de rotação radiométrica controlada por eixo de não-mudança (RCEN), desenvolvida por Maldonado *et al.* (2007) em paisagem do semi-árido como alternativa àquela de Principais Componentes, mas permitindo sobretudo integrar informações de distintos sensores de mesma característica espectral (por exemplo, TM/Landsat, ETM+/Landsat, SPOT, CBERS) faz parte desse rol de técnicas inovadoras de detecção, também aplicada por Ugarte *et al.* (2007) em áreas de floresta tropical.

De acordo com Chen *et al.* (2012), tradicionalmente, as técnicas de detecção de mudanças fazem uso de pixels individuais como unidades básicas de análise das alterações na paisagem. Porém, sistemas computacionais de alto desempenho, com *softwares* especificamente mais eficientes, permitiram incrementar a análise, com possibilidades de segmentação e extração de características de imagens multispectrais e em multi-escala, que por sua vez têm facilitado a integração de processamento através de análise orientada a Objetos Geográficos (GEOBIA) e as funcionalidades de sistemas de informações geográficas baseado em vetores (BLASCHKE, 2010). Recentes transformações culturais e ambientais, bem como suas derivações antropogênicas da paisagem têm por base as mudanças de uso e cobertura da terra, que são fatores essenciais para estabelecer a expressão espacial e a interpretação da influência humana nessa dinâmica e seus respectivos impactos ocorrentes. Nessa linha de raciocínio, Freitas *et al.* (2013) trataram de representar e simular, fazendo uso de autômatos celulares, abordagem GEOBIA e técnicas de análise espacial, os padrões dinâmico-espaciais e cenários futuros na paisagem da bacia do Alto Uruguai, onde variáveis sócio-econômicas e ambientais se integraram à análise. Hussain *et al.* (2013) sumariza as diferentes técnicas de detecção de mudanças e suas vantagens e limitações em vários campos aplicativos.

Dentro dessa contextualização acerca do estado da arte acerca das técnicas de detecção de mudanças, o objetivo do presente artigo é analisar a dinâmica de uso e cobertura da terra em um trecho da zona de contato floresta e savana no Estado de Roraima, fazendo uso da abordagem pixel a pixel, através de procedimento classificatório multi-sensor, envolvendo imagens TM/Landsat-5 e do recente OLI (*Operational Land Imager*)/Landsat-8.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

Caracterizada pelo contato savana/floresta, de tensão ecológica, a área de estudo está localizada entre as coordenadas 60° 45' 35.15" a 61° 03' 06.00" W e 2° 24' 06.63" a 2° 41' 53.50" N, na porção centro-norte do Estado de Roraima. Com uma área de 895 km², a região sob investigação é cortada na direção sudeste-noroeste pelo Rio Mucajaí, tendo ao sul dessa hidrografia as áreas de floresta ombrófila aberta e floresta estacional semidecidual e ao norte a predominância das formações savânicas (parque, graminosa e campinarana). Barbosa e Miranda (2005) definiram savana parque como uma fisionomia com distribuição agrupada dos elementos lenhosos, além de elevada área basal, densidade de indivíduos e grau de cobertura; e savana graminosa como sendo composta de campos limpos e sujos, entremeados por lagoas temporárias ou permanentes e buritizais nas redes de drenagem.

A expansão das atividades agrícola e pecuária tem ocorrido no domínio florestal, decorrente do processo histórico de colonização ali implantado, mas tal condição de uso também se estende ao domínio savânico, com surgimento mais recente da implantação de algumas áreas de reflorestamento. O clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical chuvoso com nítida estação seca (Aw), com amplitude térmica entre as médias do mês mais quente e do mês mais frio inferior a 5° C. Os latossolos vermelho amarelo, constituídos por solos apresentando a seqüência de horizontes A, B e C, profundos a muito profundos, são predominantes e nas áreas próximas ao Rio Mucajaí e Rio Branco, predomina o solo hidromórfico gleizado, caracterizado pelo pouco desenvolvimento e saturado com água. Em manchas isoladas ainda ocorrem os solos litólicos e hidromórfico cinzento.

Procedimento metodológico

Para o desenvolvimento desse trabalho foram utilizadas imagens de órbita 232 e ponto 58 do sensor

Thematic Mapper (TM/Landsat-5), com 8 bits, de 06/10/2010, nas bandas 1 (0.45 - 0.52 μm), 2 (0.52 - 0.60 μm), 3 (0.63 - 0.69 μm), 4 (0.76 - 0.90 μm) e 5 (1.55 - 1.75 μm), bem como uma imagem recente do sensor *Operational Land Imager* (OLI), com 16 bits, do satélite Landsat-8, com imageamento de 07/03/2014, nas bandas 2 (0.45 - 0.515 μm), 3 (0.525 - 0.60 μm), 4 (0.63 - 0.68 μm), 5 (0.845 - 0.885 μm) e 6 (1.56 - 1.66 μm). Esse foi o período inter-ano selecionado para a análise da dinâmica de uso e cobertura da terra dessa zona de transição vegetacional, compreendendo as feições florestais e savânicas representativas do ambiente roraimense. Registre-se nessa oportunidade o fato de se estar trabalhando com dados multi-sensores, um dos quais de recente disponibilização aos usuários, no caso do produto OLI. Outro aspecto também importante refere-se ao uso de imagens coletadas em períodos de imageamentos distintos, meses de outubro/2010 e de março/2014, quando os níveis de precipitação pluviométrica do mês anterior das aquisições eram de 115 mm e 15 mm de chuva, respectivamente.

Na Figura 1 pode-se observar o fluxograma de atividades estabelecidas para o presente estudo de análise da dinâmica desse trecho da paisagem de tensão ecológica roraimense. A primeira etapa do pré-processamento das imagens foi a correção geométrica, feita no ArcGIS 9.3. A imagem OLI serviu de referência para registro da imagem TM, com 30 pontos de controle distribuídos pela cena em áreas livres de nuvens (RMS=0,46), utilizando polinômios de primeira ordem e o algoritmo de interpolação pelo vizinho mais próximo. O passo seguinte aplicado foi a normalização dos dados dos diferentes sensores. Assim, os números digitais (DN) das imagens foram convertidos em valores de reflectância no topo da atmosfera com a ferramenta de calibração radiométrica do ENVI 5.0.3. Para minimizar os efeitos do espalhamento atmosférico, foi aplicado o método de subtração do objeto escuro (*Dark Object Subtraction - DOS*), que consiste em assumir que há objetos escuros na imagem cujos valores de reflectância são próximos à zero, porém aparecem na cena com valores superiores aos reais. Essa diferença aparente na imagem é atribuída ao espalhamento atmosférico e é removida de todos os pixels da cena.

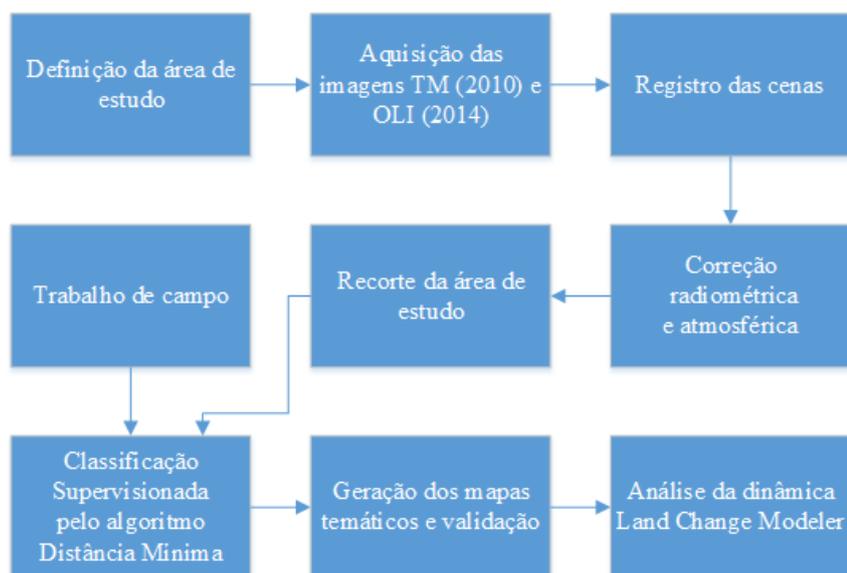


Figura 1. Fluxograma das atividades para realização deste trabalho.
 Figure 1. Flowchart of the steps to make this survey.

As imagens inter-ano assim calibradas foram recortadas com o polígono pré-estabelecido que envolve a área de estudo. A classificação supervisionada foi realizada por meio do algoritmo Distância Mínima, cujas regiões de interesse representativas de cada classe foram delimitadas com suporte de observações temáticas, devidamente caracterizadas, georreferenciadas e fotografadas em trabalho de campo realizado recentemente, logo após a disponibilização da imagem OLI. Por conseguinte, tais pontos observacionais serviram de treinamento e de validação para essa imagem 2014. Por sua vez, informações derivadas de imagens QuickBird, do acervo DigitalGlobe, disponíveis no Google Earth 7.1.2, e aquelas decorrentes de dados históricos de especialistas que trabalham na região, serviram para a definição temática na análise

classificatória da imagem TM/Landsat-5 de 2010. No presente estudo, a fase de levantamento de campo permitiu estratificar a paisagem e seu uso em nove classes, a saber: Agropecuária (1), Água (2), Campinarana (3), Campo Graminoso (4), Capoeira (5), Floresta (6) Savana Parque (7) Reflorestamento (8) e Solo Exposto (9). O desempenho classificatório levou em consideração a estatística *Kappa* e a matriz de confusão.

Após o processo classificatório das duas imagens, os mapas temáticos gerados foram importados no SIG IDRISI Selva 17.0 que contém a ferramenta *Land Change Modeler* (LCM) de análise das mudanças de uso e cobertura da terra entre duas datas. O LCM realiza a comparação pixel a pixel dos mapeamentos e quantifica para cada classe a perda e ganho de área em relação às demais classes e a persistência de cada classe, ou seja, o que se manteve inalterado no período de estudo (EASTMAN, 2009; PÉREZ-VEGA *et al.*, 2012), permitindo observar as transformações temáticas na paisagem dessa zona de transição ecológica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para realizar a classificação da imagem TM de 2010 foram usados 88 polígonos compreendendo 27.024 pixels para treinamento e, para validação, 44 polígonos com 12.376 pixels. Para classificação da imagem OLI de 2014, foram utilizados para treinamento 128 polígonos, com 21.539 pixels e 69 polígonos com 9.604 pixels para validação. Com base nos pontos de validação foram geradas as matrizes de confusão das classificações TM de 2010 (Tabela 1) e OLI de 2014 (Tabela 2). As análises estatísticas realizadas a partir das matrizes de confusão evidenciaram que a Exatidão Global do mapeamento de 2010 foi de 79,93% e o Índice de *Kappa* 0,76 e, para o mapeamento de 2014, a Exatidão Global foi de 89,01% e o Índice de *Kappa* foi 0,86.

Tabela 1. Matriz de Confusão derivada da imagem TM de 2010.
Table 1. Confusion Matrix derived from TM image of 2010.

%	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	66.42	0.00	0.65	1.88	0.00	0.00	5.18	0.00	0.00
2	0.00	100.00	0.00	1.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.74	0.00	71.80	2.69	0.00	0.09	0.00	31.25	0.00
4	16.25	0.00	0.00	65.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	4.79	0.00	0.19	0.20	67.07	10.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	1.30	0.07	32.93	88.96	0.00	0.00	0.00
7	11.47	0.00	0.46	27.51	0.00	0.00	94.82	0.00	0.00
8	0.33	0.00	25.60	0.03	0.00	0.95	0.00	68.75	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

A resolução radiométrica da imagem OLI (16 bits), favoreceu uma classificação temática com melhor nível de acurácia (Tabela 2) comparada com aquela da imagem do TM (8 bits).

Tabela 2. Matriz de Confusão derivada da imagem OLI de 2014.

%	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	84.77	0.00	0.00	6.95	0.00	0.00	0.00	0.00	17.19
2	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.38	0.00	86.33	0.54	6.35	0.00	0.00	0.00	0.00
4	4.55	0.00	0.00	67.10	0.00	0.00	0.00	0.00	15.16
5	5.88	0.00	9.29	0.00	86.74	0.69	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.34	0.00	6.91	99.31	0.00	3.18	0.00
7	4.42	0.00	4.00	9.01	0.00	0.00	100.00	0.00	2.49
8	0.00	0.00	0.06	0.22	0.00	0.00	0.00	96.82	0.00
9	0.00	0.00	0.00	16.18	0.00	0.00	0.00	0.00	65.16
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Table 2. Confusion Matrix derived from OLI image of 2014.

Na Figura 2 pode-se observar o polígono sob investigação nas duas imagens, do TM (2010) e do OLI (2014), com as respectivas classificações temáticas. A partir dessa distribuição espacial das distintas classes inter-anos e fazendo-se uso da ferramenta *Land Change Modeler*, é demonstrada a dinâmica de uso e cobertura da paisagem, cujas extensões em área (em km²) podem ser observadas na Tabela 3.

A expansão de uma classe sobre áreas antes não ocupadas por ela, no intervalo de tempo estudado, é quantificada como “Ganho”, enquanto as áreas de uma classe que foram convertidas para outras classes são contabilizadas como “Perda”. As áreas de cada classe que não sofreram quaisquer mudanças entre 2010 e 2014 são denominadas “Persistência”.

Tabela 3. Área de uso e cobertura da terra por classe nas duas datas e os resultados de ganho, perda e persistência.

Table 3. Land use and land cover area for each class and its gains, losses and persistence.

Classes	Área 2010 (km ²)	Área 2014 (km ²)	Ganho (km ²)	Perda (km ²)	Persistência (km ²)
Agropecuaria	93,30	94,81	41,91	41,92	51,19
Água	39,76	29,52	1,08	12,19	27,25
Campinarana	77,35	67,80	37,95	49,94	27,40
Campo Graminoso	93,66	102,86	48,25	53,52	45,42
Capoeira	127,11	137,57	76,14	82,68	50,47
Floresta	258,51	263,02	52,85	55,97	201,24
Savana Parque	110,5	95,87	52,99	73,15	37,37
Reflorestamento	50,96	46,63	27,82	33,72	17,14
Solo Exposto	8,80	51,13	47,37	6,91	1,90
Não classificado	34,78	6,27	2,44	30,95	3,83
Total	895	895	388,8	440,95	463,21

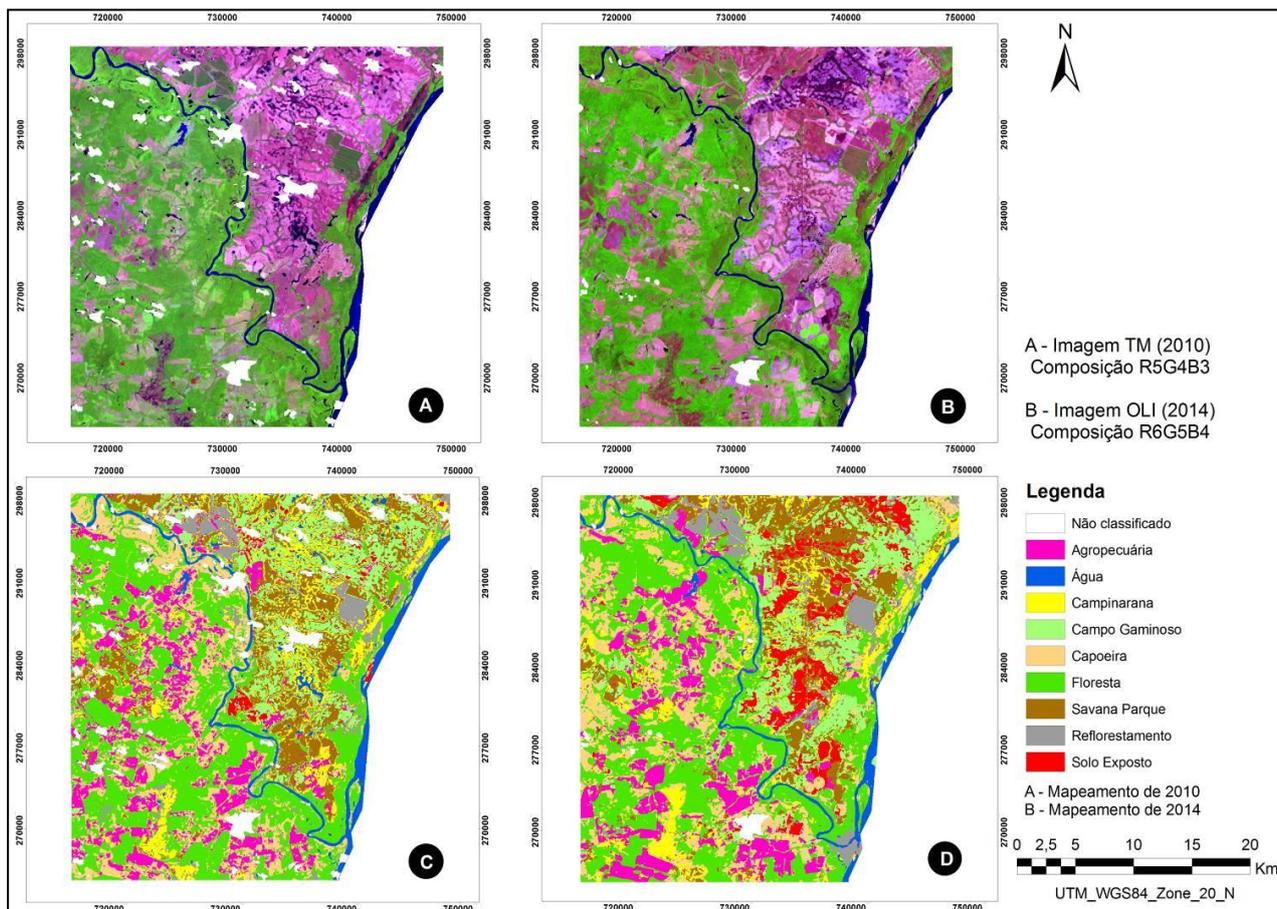


Figura 2. A – imagem TM (2010) na composição colorida R5G4B3; B – imagem OLI (2014) na composição colorida G6G5B4; C – classificação correspondente à imagem TM (2010); D – classificação correspondente à imagem OLI (2014). Espaços em branco são áreas não classificadas devido à ocorrência de nuvens e sombra de nuvens e também da mancha urbana, que não era o foco desse estudo.

Figure 2. A – TM image (2010) in false colour R5G4B3; B- OLI image (2014) in false colour R6G5B4; C – land cover classification corresponding to TM image (2010); D – land cover classification corresponding to OLI image (2014). Blank gaps are non classified areas because of cloud cover and cloud shadows, and the urban patch, which was not the focus of this research.

Devido à ocorrência de nuvens na cena TM (2010), foi aplicada uma máscara sobre as nuvens e sombras das nuvens somando 30,95 km² e sobre a mancha urbana de 2010 foi aplicada uma máscara de 3,83 km². As máscaras foram contabilizadas como “Não classificado”. Na imagem OLI (2014), a máscara aplicada sobre nuvens e respectivas sombras foi de 2,32 km² e 3,95 km² sobre a mancha urbana. Isso influencia na quantificação de perdas e ganhos de área das classes, pois regiões não classificadas em 2010 foram classificadas em 2014 e uma pequena mancha não foi classificada em 2014, pela cobertura de nuvens.

A área total líquida ocupada pela classe Agropecuária se manteve, no entanto, pode-se notar sua dinâmica a partir do ganho de novas áreas e perda para outras classes. A conversão de Agropecuária para Capoeira no período estudado representa 43% da perda de área, sendo um possível indicativo de abandono das pastagens e áreas agrícolas. No entanto, 56% do ganho de área dessa classe aconteceram sobre capoeiras.

A Floresta apresentou ganho líquido de área, especialmente sobre a Capoeira (68%), indicando a possível recomposição desses ecossistemas degradados, porém, houve a conversão de 39 km² (70% da perda) de Floresta para Capoeira. Essa conversão deve estar relacionada à degradação florestal, como algum corte seletivo e/ou efeito de incêndios florestais passados, ao invés do estabelecimento de capoeiras propriamente

ditas. Capoeiras em estágio avançado podem se confundir com florestas perturbadas e o intervalo de tempo analisado não é suficiente para que haja o corte da floresta e a sucessão da capoeira. Dessa forma, as áreas de transição de Floresta para Capoeira podem indicar o início de perturbações antrópicas na vegetação nativa.

As lagoas, brejos e veredas presentes no lavrado têm o nível de água controlado pela sazonalidade, causando o *stress* hídrico nas fisionomias de savana (MENESES *et al.*, 2007). A precipitação acumulada em setembro de 2010 foi de 115,4 mm, enquanto em fevereiro de 2014 foi de apenas 15,2 mm e, dessa forma, é possível explicar a substituição de corpos d'água na classificação recente, principalmente pelas classes savânicas: Savana Parque (24,2%), Campinarana (15,9%) e Campo Graminoso (12,14%).

As fisionomias de savana são as de maior dificuldade de classificação, fato evidenciado pela matriz de confusão e, na época da estiagem, a eficiência na distinção das savanas com o uso de sensoriamento remoto é menor (MESQUITA JR., 1998; STUART *et al.*, 2006), causando confusão entre as classes. Entretanto, a região savânica, formada pelas classes Campinarana, Savana Parque e Campo Graminoso, sofreu maior antropização em relação à região florestal, evidenciando a pressão sobre esses ecossistemas, como evidenciado por Barbosa e Campos (2011). Do ganho total da classe Solo Exposto, 90% foi sobre a região savânica, representando a atividade antrópica de maior impacto nessa área.

CONCLUSÃO

A avaliação da dinâmica de uso da terra é fundamental para reconhecer os processos de antropização sobre a vegetação natural, orientando ações para conservação da biodiversidade e zoneamento agroecológico. Nessa região de transição floresta e savana em Roraima pode-se verificar a preservação de 78% da área florestal, o que evidencia a pequena taxa de desmatamento, em comparação àquelas tidas em estados amazônicos (FEARNSIDE *et al.*, 2013). Projetos de colonização e a ampliação de estradas que ligariam Roraima ao Arco do Desmatamento são uma ameaça para as florestas no sul de Roraima (BARNI, *et al.*, 2012).

Na região savânica, Barbosa e Campos (2011) constataram que o padrão de antropização está relacionado à distribuição das rodovias. A área de estudo, cortada pela BR-174 que liga Mucajaí-Boa Vista, mostra ao longo de sua extensão a maior ocorrência de conversão de savanas para solo exposto, indicando que essas áreas já estão destinadas ao processo agrícola-pecuário-silvicultural produtivo. Apenas 40% da região savânica se manteve inalterada no período estudado, o que mostra o alto grau de pressão antrópica sobre esse ecossistema e destaca a necessidade de criação de Unidades de Conservação nas savanas de Roraima.

Estudos adicionais utilizando diversos sensores, com melhores resoluções radiométricas, a exemplo do OLI, podem resultar em classificações tematicamente mais precisas para um melhor entendimento da dinâmica de uso e cobertura da terra nessa região de tensão entre floresta e savana.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, R.I.; CAMPOS, C. Detection and geographical distribution of clearing areas in the savannas ('*lavrado*') of Roraima using Google Earth web tool. *Journal of Geography and Regional Planning* v. 4, n. 3, pp. 122-136, 2011.

BARBOSA, R.I.; MIRANDA, I.S. 2005. Fitofisionomias e diversidade vegetal das savanas de Roraima. In: BARBOSA, R.I. *et al.* (orgs.), *Savanas de Roraima: Etnoecologia, Biodiversidade e Potencialidades Agrossilvipastoris*. FEMACT, Boa Vista. p. 61-77.

BARNI, *et al.* Desmatamento no sul do Estado de Roraima: padrões de distribuição em função de Projetos de Assentamento do INCRA e da distância das principais rodovias (BR-174 e BR-210). *Acta Amazonica*, v. 2, n. 2, PP. 195-204, 2012.

BLASCHKE, T. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and*

Remote Sensing, v. 65, p. 2 -16, 2010.

CHEN, G. *et al.* Wulder. Object-based change detection, *International Journal of Remote Sensing*, v. 33, n. 14, p. 4434-4457, 2012.

COPPIN, P. *et al.* Review article digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*, v. 25, n. 9, p. 1565-1596, 2004.

EASTMAN, J.R. IDRISI Guide to GIS and Image Processing. Clark University, Worcester, 2009.

FEARNSIDE, *et al.* Emissões de gases do efeito estufa por desmatamento e incêndios florestais em Roraima: fontes e sumidouros. *Revista Agro@ambiente*, v. 7, n. 1, p. 95-111, 2013.

FREITAS, M.W.D. *et al.* Land-use and land-cover change processes in the Upper Uruguay Basin: linking environmental and socioeconomic variables. *Landscape Ecology*, v. 28, p. 311-327, 2013.

HUSSAIN, M. *et al.* Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 80, p. 91-106, 2013.

LACRUZ, M.S.P.; SANTOS, J.R. Monitoramento da paisagem de unidades de conservação. In: RUDORFF *et al.* (Org.). O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil. São José dos Campos: Bookimage, 2007, v. 1, p. 171-180. 1ed.

LORENA, R.B. *et al.* Técnica de detecção de mudanças aplicada em imagens de satélite como ferramenta de monitoramento de uso e cobertura na Amazônia ocidental (Acre). *Espaço & Geografia*, v. 7, n. 1, p. 47-76, 2004.

MALDONADO, F.D. *et al.* Change detection technique based on the radiometric rotation controlled by no-change axis, applied on a semi-arid landscape, *International Journal of Remote Sensing*, v. 28, n. 8, pp. 1789-1804, 2007.

MALDONADO, F.D. *et al.* Land use dynamics in the semiarid region of Brazil (Quixabá-PE): characterization by principal components analysis. *International Journal of Remote Sensing*, v. 23, n. 23, p. 5005-5013, 2002.

MÁS, J.F. Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, v. 20, n. 1, p. 139-152, 1998.

MENESES, M.E.N.S. *et al.* Os lagos do lavrado de Boa Vista - Roraima: fisiografia, físico-química das águas, mineralogia e química dos sedimentos. *Brazilian Journal of Geology*, v. 37, n. 3, 2007.

MESQUITA JUNIOR, H.N. Análise temporal com sensor orbital de unidades fisionômicas de cerrado na Gleba Pé-de-Gigante (Parque Estadual de Vassununga – SP). Dissertação mestrado IBUSP. São Paulo, 1998.

PÉREZ-VEGA, A. *et al.* Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest. *Environmental Modelling & Software*, v.29, pp. 11-23, 2012.

SINGH, A. Digital change detection techniques using remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 10, n. 6, p. 989-1003, 1989.

STUART, N. *et al.* Classifying the Neotropical savannas of Belize using remote sensing and ground Survey *Journal of Biogeography* v. 33, pp. 476-490, 2006.

UGARTE, H.F. *et al.* The monitoring of the Amazon rainforest deforestation on the basis of a radiometric analysis of satellite images. *Sylwan*, v. 152, p. 3-8, 2008.

EFEITOS DA ANISOTROPIA NA IDENTIFICAÇÃO DE ESPÉCIES EM FLORESTA TROPICAL COM IMAGENS HIPERESPECTRAIS

EFFECTS OF ANISOTROPY ON SPECIES DISCRIMINATION IN TROPICAL FOREST USING IMAGING SPECTROSCOPY

Matheus Pinheiro Ferreira¹, Yosio Edemir Shimabukuro¹, Carlos Roberto de Souza Filho²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Av. dos Astronautas, 1758, 12.227-010 - São José dos Campos, SP, Brasil, mpf;yosio@dsr.inpe.br

² Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, R. João Pandiá Calógeras, 51, 13.083-870- Campinas, SP, Brasil, beto@ige.unicamp.br

RESUMO

Dados hiperespectrais obtidos por sensores a bordo de aeronaves e satélites tem demonstrado grande potencial para o estudo de florestas tropicais. Em particular, a identificação de espécies arbóreas com imagens de alta resolução espacial e espectral mostrou-se viável e pode contribuir para inventários fitossociológicos a nível local e regional. Neste trabalho, buscou-se avaliar o efeito da anisotropia das copas na identificação de nove espécies em uma floresta neotropical utilizando imagens hiperespectrais aerotransportadas. A distribuição de brilho dos pixels das espécies foi dividida nas classes iluminada e sombreada, por meio de um limiar calculado de forma automática. A performance de métodos paramétricos (Análise Discriminante Linear e Quadrática) e não-paramétricos (*Support Vector Machine* e *k*-vizinhos mais próximos) foi avaliada em termos de exatidão de classificação, tendo como dados de entrada pixels iluminados e sombreados simultânea e separadamente. A distribuição de brilho dos pixels de algumas espécies, principalmente as com copas de grandes dimensões, mostrou claro comportamento bimodal, o que afetou a performance de classificadores paramétricos de forma mais severa. De modo geral, a exatidão de classificação aumentou para todos os métodos testados ao se utilizar somente pixels iluminados. Os resultados apresentados neste trabalho demonstram a importância de se considerar os efeitos da anisotropia das copas na identificação de espécies arbóreas em ambientes tropicais com dados de sensoriamento remoto hiperespectral de alta resolução espacial.

Palavras-chave: Espectroscopia de imageamento, diversidade florística, efeitos de iluminação, mapeamento de espécies.

ABSTRACT

Airborne and spaceborne hyperspectral data provide important information for management and conservation of tropical forests. In particular, species identification using high-fidelity imaging spectroscopy have proven to be feasible and could contribute to floristic assessments at local to regional scales. This study aims to evaluate the effects of crown anisotropy for discrimination of nine species from a Neotropical forest using airborne hyperspectral data. Pixel brightness distribution was divided into sunlit and shaded, by means of an automatic thresholding method. The performance of parametric (linear and quadratic discriminant analysis) and non-parametric (*Support Vector Machine* and *k*-Nearest Neighbor) was evaluated in terms of classification accuracy, with sunlit and shaded pixels classified simultaneous and separately. Pixel brightness distribution of some species, particularly those with large crowns, showed a clear bimodal behavior, which affected the performance of parametric classifiers more severely. In general, classification accuracy increased for all tested methods when using only sunlit pixels. Results presented in this study demonstrate the importance of considering the effects of crown anisotropy on species discrimination in tropical environments using high spatial resolution hyperspectral data.

Keywords: Imaging spectroscopy, floristic diversity, illumination effects, tree species mapping.

INTRODUÇÃO

A potencialidade do sensoriamento remoto para identificação de espécies de plantas foi verificada na década de 1980, quando as primeiras imagens de alta resolução espectral foram adquiridas (GOETZ e VANE,

1985). Desde então, estudos têm sido realizados visando obter informações sobre a possível utilidade de dados de reflectância para discriminação de espécies e fitofisionomias. Em ambientes tropicais, com alta diversidade florística, estudos desta natureza estão restritos à condição de que a variabilidade espectral intraespecífica seja significativamente menor do que a interespecífica. Esta condição foi verificada ao nível foliar (COCHRANE *et al.*, 2000; CASTRO-ESAU *et al.*, 2006; FERREIRA *et al.*, 2013) e, de modo mais restrito, ao nível de dossel (ZHANG *et al.*, 2006). Ao nível foliar, segundo Gates *et al.* (1965), a interação da radiação eletromagnética com o tecido vegetal é controlada basicamente pela concentração de pigmentos, estrutura e quantidade de água. Já ao nível de dossel, um número maior de variáveis se inter-relaciona. Dentre elas, além dos próprios elementos da vegetação (folhas, galhos, cascas, frutos, sementes, etc.), podemos citar as propriedades espectrais do substrato, os parâmetros biofísicos (Índice de Área Foliar (IAF); Distribuição Angular das Folhas (DAF)), fatores de natureza geométrica (ângulos de iluminação e visada) e anisotrópicos (PONZONI *et al.*, 2012).

Particularmente, em imagens de alta resolução espacial, o efeito da anisotropia das copas, afeta seu comportamento espectral, produzindo proporções distintas de pixels sombreados e iluminados. Os pixels iluminados geralmente possuem uma relação sinal/ruído mais alta em imagens hiperespectrais, o que melhora algumas aplicações como, por exemplo, a extração de atributos bioquímicos do dossel (MALENOVSKÝ *et al.*, 2013). No entanto, à identificação de espécies, esta questão foi pouco estudada, principalmente em ambientes tropicais. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da anisotropia das copas na discriminação de nove espécies ao nível de dossel, utilizando imagens hiperespectrais de alta resolução espacial. Para tanto, foi avaliada a performance de métodos paramétricos e não-paramétricos na classificação de espécies, tendo como dados de entrada pixels iluminados e sombreados simultânea e separadamente.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo deste trabalho compreende a Reserva de Santa Genebra (22°48' - 22°50' S, 47°06' - 47°07' W), localizada no município de Campinas/SP (Figura 1). Esta área possui 251,8 hectares (GUARATINI *et al.*, 2008), onde a formação florestal predominante é a floresta estacional semi-decidual (VELOSO *et al.*, 1991). A Reserva de Santa Genebra é um remanescente bem preservado de Floresta Atlântica e abriga alta diversidade de espécies arbóreas.

Imagens hiperespectrais

Foram utilizadas imagens hiperespectrais obtidas pelo sensor ProSpec-TIR-VS de um levantamento aéreo realizado no dia 07/06/2010. Estes dados possuem resolução espacial de 1 metro e 357 bandas espectrais no intervalo de 400 a 2.500 nm. Dez faixas foram necessárias para o imageamento completo da área de estudo. A alta resolução espacial e espectral das imagens permite visualizar com clareza a copa de árvores emergentes, bem como sua resposta espectral (Figura 1).

Primeiramente, foi realizada a correção atmosférica das imagens para converter os dados de radiância aparente em reflectância de superfície por meio do algoritmo *Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH) (ITT Visual Information Solutions, 2009). Em seguida, as imagens foram georreferenciadas utilizando-se o arquivo *Internal Geometry Map* (IGM), gerado durante o levantamento aéreo de cada faixa e, então, mosaicadas, apresentando pouca variação de brilho entre as faixas (Figura 1). Após a eliminação dos canais com baixa relação sinal/ruído, localizados principalmente ao redor das feições da absorção de água atmosférica (1.400 nm e 1.900 nm), a imagem foi composta de 260 bandas espectrais.

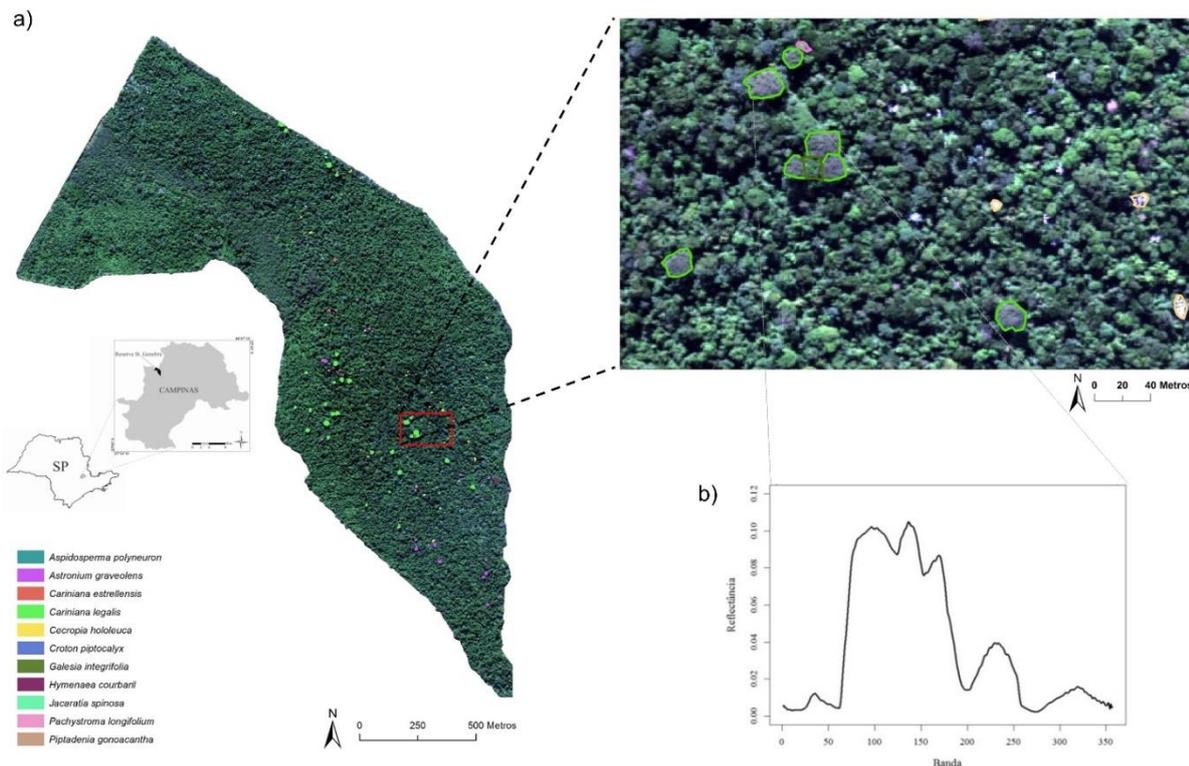


Figura 1. (a) Localização da área de estudo e distribuição espacial das espécies arbóreas identificadas em campo; (b) Resposta espectral média de uma copa de Cariniana legalis, localizada na porção central.

Figure 1. (a) Geographic location of the study area and spatial distribution of tree species identified at the field; (b) Mean spectral response a Cariniana legalis crown, located in the central portion.

Tabela 1. Número de pixels total, iluminados e sombreados por espécie, com destaque para as espécies que possuíram menos de 300 pixels e foram excluídas da análise

Table 1. Total, sunlit and shaded number of pixels per species, boldfaced lines indicate species with less than 300 pixels, which were excluded from the analysis.

Espécie	Nº de pixels	Nº de pixels iluminados	Nº de pixels sombreados
<i>Croton piptocalyx</i>	537	273	264
<i>Cecropia hololeuca</i>	686	443	243
<i>Astronium graveolens</i>	1.837	896	941
<i>Jacaratia spinosa</i>	300	155	145
<i>Hymenaea courbaril</i>	559	311	248
<i>Cariniana legalis</i>	7.805	3.355	4.450
<i>Cariniana estrellensis</i>	278	-	-
<i>Pachystroma longifolium</i>	320	95	225
<i>Galesia integrifolia</i>	405	221	184
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	158	-	-
<i>Aspidosperma polyneuron</i>	701	412	289

Seleção de amostras de treinamento

Inicialmente, as copas de 100 árvores emergentes foram manualmente delineadas, tendo como base uma composição colorida de cor verdadeira em uma escala fixa de 1:1.500. Em campo, foi possível identificar 92 destas árvores que se distribuíram entre 11 espécies (Figura 1, Tabela 1). Visto que a proporção de pixels entre as espécies foi desigual (Tabela 1), após extrair suas respostas espectrais, foram selecionados

aleatoriamente 300 pixels de cada uma delas. No entanto, apenas 9 espécies possuíam quantidade igual ou superior a esta e, assim, foi construído um conjunto de dados composto por 2.700 pixels. Deste conjunto, foram selecionadas ao acaso um total de 1.000 amostras para compor os grupos de treinamento e teste, que foram utilizados na avaliação da exatidão das classificações. Para separar os pixels em duas classes, ou seja, iluminados e sombreados, utilizou-se um limiar de brilho, escolhido de forma automática pelo método de Otsu (OTSU, 1979). O método de Otsu baseia-se no histograma da classe e busca encontrar um valor que divide a distribuição dos pixels em duas, de maneira a minimizar a variância intraespecífica (i.e. maximizar a variância interespecífica). Visando manter proporções equivalentes entre as classes, foram selecionados ao acaso 90 e 100 pixels, iluminados e sombreados para cada espécie, respectivamente.

Classificações

A classificação de imagens hiperespectrais normalmente requer um procedimento de seleção de bandas, devido à elevada dimensionalidade deste tipo de dado. Os principais objetivos da seleção de atributos é evitar o efeito de Hughes (HUGHES, 1968), ou seja, redução da acurácia com o aumento da dimensionalidade, e diminuir o custo computacional. Neste trabalho, foi utilizado o método de regressão linear múltipla *stepwise* na seleção de bandas para classificação. O método *stepwise* verifica a importância das variáveis (bandas), incluindo ou excluindo-as em um modelo de regressão, com base em uma regra de decisão definida em termos de uma medida de significância estatística, no caso, o *p*-valor. Ao final do processo, são identificadas as bandas que foram incluídas no modelo, sendo estas utilizadas para classificar as espécies. O método *stepwise* foi aplicado separadamente para os três conjuntos de dados, ou seja, todos os pixels (iluminados+sombreados), apenas iluminados ou apenas sombreados.

Buscou-se avaliar a performance de métodos paramétricos e não-paramétricos na classificação das espécies ao nível de dossel, visto que a distribuição dos pixels das classes pode não seguir uma distribuição normal. Os métodos paramétricos utilizados foram: Análise Discriminante Linear (ADL) e Análise Discriminante Quadrática (ADQ). ADL e ADQ foram utilizados com sucesso na discriminação de espécies com dados de reflectância ao nível foliar (CASTRO-ESAU *et al.*, 2006; FERREIRA *et al.*, 2013), mas seu emprego com dados obtidos ao nível de dossel é controverso (ZHANG *et al.*, 2006). A análise discriminante é uma técnica da estatística multivariada que busca obter uma combinação linear de características observadas, ou seja, bandas, que apresente o melhor poder de discriminação entre classes. Esta combinação linear é conhecida como função discriminante e procura maximizar a variância interespecífica e minimizar a variância intraespecífica, assumindo que as classes possuem distribuição normal e compartilham da mesma matriz de covariância (como é o caso da ADL) ou não (como no caso ADQ, em que a covariância é estimada separadamente para cada classe).

Os métodos não-paramétricos empregados foram: *Support Vector Machines* (SVM) e *k*-vizinhos mais próximos (*k*-NN). SVM é uma técnica de aprendizado computacional baseada em *kernels*, que realizam a classificação construindo hiperplanos no espaço multidimensional para separar amostras de diferentes classes (VAPNIK, 1995). Este classificador tem sido utilizado com sucesso na discriminação de espécies arbóreas florestais (DALPONTE *et al.*, 2014; FÉRET e ASNER, 2013). Dentre os vários tipos de *kernels* existentes, este estudo aplicou somente o *kernel* linear, que possibilita apenas o ajuste do parâmetro de penalidade (C), estimado por um procedimento de busca exaustiva. *k*-NN é um classificador baseado em analogia, que procura *k* elementos do conjunto de treinamento que estejam mais próximos do elemento que se pretende classificar, de acordo com a menor distância euclidiana. O número ideal de vizinhos do algoritmo *k*-NN foi escolhido pelo método de validação cruzada *leave-one-out*. Todo processamento dos dados foi realizado em ambiente MatLab®.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição de frequência do brilho dos pixels mostrou um comportamento claramente bimodal para algumas espécies, principalmente as com copas de elevado diâmetro. A Figura 2 apresenta a distribuição de frequência dos pixels, em termos de intensidade, para *Cariniana legalis*. A copa de uma árvore foi inserida

na figura para ilustrar o efeito da anisotropia nos valores de brilho. Esta espécie, conhecida popularmente como Jequitibá-Rosa destaca-se por atingir grandes dimensões. Devido ao tamanho e formato das suas copas, a resposta espectral ao nível de dossel é influenciada pela anisotropia, causada tanto pela própria estrutura da copa, quanto por fatores de natureza geométrica, como os ângulos de iluminação e visada. Isto causa o efeito bimodal apresentado no histograma da Figura 2, produzindo pixels sombreados e iluminados no interior da copa de uma mesma árvore. Por este motivo, assumir que as espécies possuem distribuição normal, como é feito por métodos paramétricos, pode não ser a melhor abordagem de classificação.

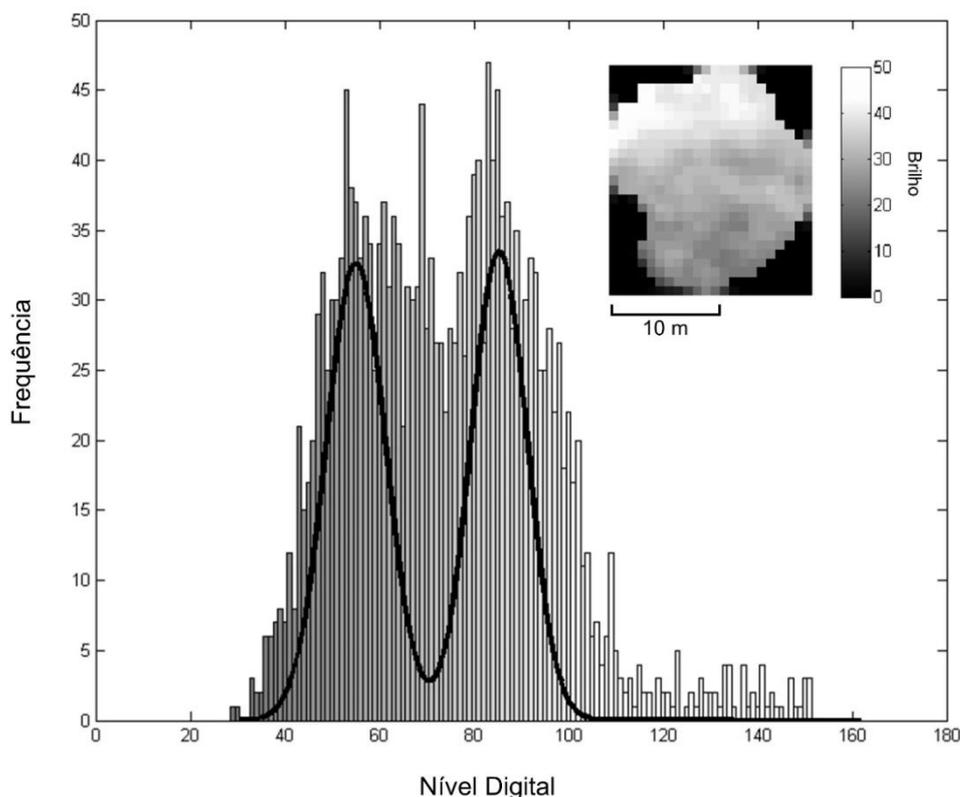


Figura 2. Distribuição de frequência dos valores de brilho dos pixels de *Cariniana legalis*, com a copa de uma árvore para ilustrar o efeito da anisotropia. Uma distribuição normal bimodal foi ajustada ao histograma (curva em preto), para representar pixels sombreados e iluminados.

Figure 2. Frequency distribution of pixel brightness values of *Cariniana legalis* with a tree crown to illustrate the effects of anisotropy. A bimodal normal distribution was fitted to the histogram (black line), in order to represent shaded and sunlit pixels.

Na realidade, após separar a distribuição dos pixels em sombreados e iluminados, observou-se um considerável ganho na exatidão de classificação, principalmente para os métodos paramétricos, como mostra a Tabela 2. Nota-se que LDA e QDA aumentaram sua performance em aproximadamente dez pontos percentuais. Dentre os métodos não-paramétricos, este aumento de performance foi maior para o SVM-linear do que para o k -NN. De modo geral, tanto para métodos paramétricos quanto não-paramétricos, a exatidão foi maior ao se utilizar apenas pixels iluminados. Acredita-se que estes pixels possuam uma relação sinal/ruído alta, o que contribuiu na caracterização da resposta espectral das espécies. A seleção de pixels iluminados provou melhorar algumas aplicações do sensoriamento remoto hiperespectral da vegetação, como, por exemplo, a extração de atributos bioquímicos do dossel (ZARCO-TERJADA *et al.*, 2004; MALENOVSKÝ *et al.*, 2013) e, inclusive, a classificação de espécies em florestas boreais (DALPONTE *et al.*, 2014). Os resultados apresentados neste trabalho, também demonstraram os benefícios da utilização de pixels iluminados na identificação de espécies arbóreas em florestas tropicais.

Tabela 2. Exatidão de classificação das espécies apresentadas na Tabela 1, utilizando classificadores paramétricos e não-paramétricos, bem como pixels iluminados e sombreados simultânea e separadamente.

Table 2. Classification accuracy of the species listed in Table 1, using parametric and non-parametric methods for classification of shaded and sunlit pixels simultaneous and separately.

Exatidão de classificação (%)					
Dados de entrada	Paramétrico		Não-paramétrico		Nº Bandas selecionadas
	LDA	QDA	SVM linear	k-NN	
Todos os pixels	74.3	83.3	82.1	89.8	30
Pixels iluminados	85.9	93	94.7	95	40
Pixels sombreados	82.5	94.1	90.2	91.3	26

CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi avaliado o efeito da anisotropia das copas na classificação de espécies arbóreas em floresta tropical utilizando dados de sensoriamento remoto hiperespectral de alta resolução espacial. A performance de métodos paramétricos e não-paramétricos foi avaliada em termos de exatidão de classificação, com a separação dos pixels de cada espécie em duas classes: iluminados e sombreados. A estrutura e dimensão das copas, bem como parâmetros de natureza geométrica (ângulos de iluminação e visada), contribuíram para o comportamento anisotrópico do dossel, principalmente de espécies de grande porte, influenciando sua resposta espectral. Métodos paramétricos (LDA e QDA) mostraram-se mais sensíveis ao caráter bimodal de distribuição dos pixels do que métodos não-paramétricos. Em todos os testes, a utilização de pixels iluminados mostrou-se mais adequada para classificar as espécies.

Os resultados apresentados neste trabalho mostram a importância de se considerar a anisotropia das copas na classificação de espécies arbóreas tropicais com imagens de alta resolução espacial e espectral. Esta questão deve ser mais profundamente estudada, visando o aperfeiçoamento de técnicas de processamento de imagens e a elaboração de metodologias de mapeamento de espécies com dados hiperespectrais. Visto que, em um futuro próximo, a disponibilidade destes dados irá aumentar, tanto pelo surgimento de missões hiperespectrais em nível orbital, quanto pela crescente popularização dos veículos aéreos não tripulados (VANTs) e sensores de alta resolução espectral especialmente projetados para estes veículos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão de auxílio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa, através do projeto nº 2013/11.589-5, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro para realização do trabalho de campo e a empresa FotoTerra por gentilmente ceder as imagens hiperespectrais.

REFERÊNCIAS

- CASTRO-ESAU, K.L. *et al.* Variability in leaf optical properties of Mesoamerican trees and the potential for species classification. *American Journal of Botany*, v. 93, n. 4, p. 517-530, 2006.
- COCHRANE, M.A. Using vegetation reflectance variability for species level classification of hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 21, n. 10, p. 2075-2087, 2000.
- DALPONTE, M. *et al.* Tree crown delineation and tree species classification in boreal forests using hyperspectral and ALS data. *Remote sensing of environment*, v. 140, p. 306-317, 2014.
- FÉRET, J.B.; ASNER, G.P. Tree Species Discrimination in Tropical Forests Using Airborne Imaging Spectroscopy. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, v. 51, n. 1, p. 73-84, 2013.

- FERREIRA, M.P. *et al.* Analyzing the spectral variability of tropical tree species using hyperspectral feature selection and leaf optical modeling. *Journal of Applied Remote Sensing*, v. 7, 073502-1-073502-13, 2013.
- GATES, D. M. *et al.* Spectral Properties of Plants. *Applied Optics*, v. 4, n. 1, 1965.
- GOETZ, A.; VANE, G. Imaging spectrometry for earth remote sensing. *Science*, v. 228, n. 4704, p. 1147-1153, 1985.
- GUARATINI, M.T.G. *et al.* Composição florística da Reserva Municipal de Santa Genebra, Campinas, SP. *Revista Brasileira de Botânica*, v. 31, n. 2, p. 323-337, 2008.
- HUGHES, G.F. On the mean accuracy of statistical pattern recognizers. *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. IT-14, n. 1, p. 55-63, 1968.
- ITT Visual Information Solutions, 2009. Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide. Version 4.7. *ITT Visual Information Solutions*, Boulder, CO.
- MALENOVSKÝ, Z. *et al.* Retrieval of spruce leaf chlorophyll content from airborne image data using continuum removal and radiative transfer. *Remote Sensing of Environment*, v. 131, p. 85-102, 2013.
- OTSU, N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. 9, n. 1, p. 62-66, 1979.
- PONZONI, F.J. *et al.* *Sensoriamento remoto da vegetação*, 2012. 160 p.
- VAPNIK, V.N. *The Nature of Statistical Learning Theory*. New York: Springer-Verlag, 1995.
- VELOSO, H.P. *et al.* *Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal*. IBGE, Rio de Janeiro, 1991.
- ZARCO-TEJADA, P.J. *et al.* Needle chlorophyll content estimation through model inversion using hyperspectral data from boreal conifer forest canopies. *Remote sensing of environment*, v. 89, n. 2, p. 189-199, 2004.
- ZHANG, J. *et al.* Intra and interclass 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.