

Distinção de espécies de eucalipto de diferentes idades por meio de imagens TM/Landsat 5

Laura Camila de Godoy Goergen⁽¹⁾, Ricardo de Vargas Kilca⁽¹⁾, Igor da Silva Narvaes⁽²⁾, Matheus Nunes Silva⁽³⁾, Emanuel Araújo Silva⁽⁴⁾, Rudiney Soares Pereira⁽⁴⁾ e Marcos Adami⁽²⁾

⁽¹⁾Universidade do Estado de Santa Catarina, Avenida Luiz de Camões, nº 2.090, Conta Dinheiro, CEP 88520-000 Lages, SC, Brasil. E-mail: lauragoergen@yahoo.com.br, rvkilka@gmail.com ⁽²⁾Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro Regional da Amazônia, Avenida Perimetral, nº 1.501/1.502 a 5.004/5.005, Terra Firme, CEP 66077-830 Belém, PA, Brasil. E-mail: igor.narvaes@inpe.br, marcos.adami@inpe.br ⁽³⁾Sul Florestas, Avenida Papa João XXIII, nº 1.555, Petrópolis, CEP 88505-200 Lages, SC, Brasil. E-mail: matheus.silva@sulflorestas.com.br ⁽⁴⁾Universidade Federal de Santa Maria, Avenida Roraima, nº 1.000, Campus Universitário, CEP 97105-900 Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: emanuelmadster@gmail.com, rudiney.s.pereira@gmail.com

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar a utilização de imagens do sensor TM/Landsat 5 na diferenciação de plantios comerciais de *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus urograndis* com diferentes idades. Demarcaram-se parcelas para identificar as duas espécies, em dois períodos distintos (2009 e 2011), a idades de 3 e 5 anos, para *E. dunnii*, e 2,2 e 4,2 anos para *E. urograndis*. Avaliaram-se seis bandas do sensor TM/Landsat 5 (B1, B2, B3, B4, B5 e B7) e seis índices de vegetação: razão simples (SR); índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI); índice de vegetação ajustado ao solo (Savi)-0,25; Savi-0,5; índice de vegetação por diferença normalizada com uso da banda verde (GNDVI); e índice de umidade na vegetação (MVI). O processamento digital das imagens consistiu de correção geométrica, radiométrica e atmosférica. Os plantios de *E. dunnii* e *E. urograndis* foram diferenciados por meio de cinco bandas do Landsat (B2, B3, B4, B5 e B7) e três índices de vegetação (Savi-0,5, Savi-0,25 e GNDVI), no ano de 2009, e por quatro bandas do Landsat (B2, B4, B5 e B7) e seis índices de vegetação (NDVI, SR, Savi-0,5, Savi-0,25, MVI e GNDVI) no ano de 2011. Os dados espectrais extraídos das imagens TM/Landsat 5 são eficazes, tanto para distinguir as espécies de eucalipto como também a mesma espécie em plantios equânios.

Termos para indexação: *Eucalyptus*, análise de componentes principais, assinatura espectral, plantios florestais.

Distinction of eucalyptus species of different ages using Landsat 5 TM images

Abstract – The objective of this work was to evaluate the use of the TM/Landsat 5 sensor images in the differentiation of commercial plantations of *Eucalyptus urograndis* and *Eucalyptus dunnii* of different ages. Plots were marked for identification of the two *Eucalyptus* species, in two different periods (2009 and 2011): for 3- and 5-year-old *E. dunnii*, and for 2.2- and 4.2-year-old *E. urograndis*. Evaluations were done for six bands of the TM/Landsat 5 sensor (B1, B2, B3, B4, B5, and B7), and for six vegetation indices – simple ratio (SR); normalized difference vegetation index (NDVI); soil-adjusted vegetation index (Savi)-0.25; Savi-0.5; green NDVI (GNDVI); and the moisture-vegetation index (MVI). Image digital processing consisted of geometric, radiometric, and atmospheric corrections. The plantations of *E. dunnii* and *E. urograndis* were distinguished by five bands of Landsat (B2, B3, B4, B5, and B7) and three vegetation indices (Savi-0.5, Savi-0.25, and GNDVI), in 2009, and by four bands of Landsat (B2, B4, B5, and B7) and six vegetation indices (NDVI, SR, Savi-0.5, Savi-0.25, MVI, and GNDVI) in 2011. The spectral data extracted from TM/Landsat 5 images are effective, both to distinguish the species of eucalyptus as well as the same species in even-aged stand.

Index terms: *Eucalyptus*, principal component analysis, spectral signature, forest plantations.

Introdução

O reconhecimento das espécies florestais é tradicionalmente feito em campo. Uma alternativa que fornece resultados com maior rapidez e menor custo envolve o emprego de técnicas de sensoriamento remoto, que pode ser realizado a partir de sensores imageadores ou não (Kovacs et al., 2005).

Os sensores remotos têm a capacidade de captar as diferenças de reflectância nos plantios florestais, ainda que estes sejam compostos por indivíduos de mesma espécie e idade, cultivados em um mesmo espaçamento e submetidos a tratamentos culturais idênticos (Canavesi & Ponzoni, 2010).

Espera-se que técnicas estatísticas que utilizam dados de sensoriamento remoto sejam mais sensíveis a dados

com maior resolução espectral, já que dados de sensores hiperespectrais fornecem informações mais detalhadas de determinadas faixas do espectro eletromagnético. Aardt & Norris-Rogers (2008) utilizaram dados de radiância extraídos do sensor hiperespectral Casi, em plantios equiâneos de *Eucalyptus* e *Acacia*, com o objetivo de discriminá-las e diferenciar classes de idade para a mesma espécie. Os resultados destas técnicas indicaram 85% de classificações corretas, entre espécies, e 97% entre espécies dentro do mesmo grupo etário. Aardt & Wynne (2007) diferenciaram espécies de *Pinus* sp. no Sul dos Estados Unidos, a partir do sensor aerotransportado Aviris, e encontraram acurácia entre 65 e 85%, conforme a técnica de validação cruzada utilizada. Além disso, dados multiespectrais e hiperespectrais combinados também são utilizados, como no estudo de Somers et al. (2010), em que foi possível detectar a desfolhação em plantios inequiâneos de *Eucalyptus globulus* Labill e, em última análise, fornecer inferências sobre a idade do povoamento e as variações de cobertura de copa desta espécie. Nesse mesmo estudo, os autores ilustram o potencial de utilização dos dados Landsat comparado aos dados hiperespectrais do Hyperion.

Estudos mais atuais, que envolvem o uso de imagens multiespectrais de média resolução, sobretudo da série Landsat, na análise de espécies de *Eucalyptus*, são em número consideravelmente inferior aos realizados com sensores hiperespectrais e, normalmente, voltados ao cálculo de sua capacidade produtiva (Dube & Mutanga, 2015a, 2015b; Dube et al., 2015).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a utilização de imagens do sensor TM/Landsat 5 na diferenciação de plantios comerciais de *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus urograndis* com diferentes idades.

Material e Métodos

A área do estudo localiza-se no município de Alegrete, a 55°30'W e 29°48'S, na região da Campanha do Rio Grande do Sul. A vegetação na região é predominantemente campestre, típica do Bioma Pampa (Boldrini, 2009). O clima da região, segundo a classificação de Köppen-Geiger, é subtropical (Cfa) – temperado quente –, com chuvas bem distribuídas e estações bem definidas (Kuinchtner & Buriol, 2001). O solo da região é classificado como Argissolo

Vermelho eutrófico arênico moderado (Santos et al., 2006).

Este estudo foi realizado na Fazenda Cabanha da Prata, que possui área total de 612,9 ha, dos quais 219,4 ha são plantios comerciais de *E. dunnii*, 167,2 ha de *E. urograndis*, e o restante da área compreende trechos de área de preservação permanente, reserva legal e infraestrutura. Nestes plantios, o espaçamento do *E. dunnii* foi de 3,5x2,0 m, e de *E. urograndis* foi de 3,5x2,5 m. Os plantios destes talhões foram realizados em 20/12/2006 e 19/9/2007, respectivamente. No interior dos talhões de povoamento comercial equiâneo, demarcaram-se 42 parcelas circulares, sem efeito de bordadura, das quais 23 de *E. dunnii* e 19 de *E. urograndis*. Não se realizaram tratamentos silviculturais – como poda e desbaste – em nenhum talhão.

Para a geração dos resultados, extraíram-se os valores de todos os atributos de resposta espectral das imagens TM/Landsat 5, para os anos de 2009 e 2011 (Tabela 1). Todas as parcelas permanentes de inventário florestal, alocadas em um mesmo talhão, com as mesmas condições silviculturais, com aproximadamente 314 m², representaram a informação de um mesmo elemento de resolução da imagem por cada pixel de 900 m².

Os plantios foram identificados nas imagens do satélite Landsat 5, sensor TM, órbita-ponto 224/81, dos dias 25 de setembro de 2009 e 17 de outubro de 2011. As imagens foram obtidas gratuitamente junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2012).

Para a geração dos atributos de resposta espectral, das áreas correspondentes aos pontos amostrais, efetuaram-se as operações de georreferenciamento, correção atmosférica, extração dos valores dos atributos de resposta espectral e tratamento estatístico das variáveis independentes.

Na operação de georreferenciamento das imagens, utilizou-se como base uma imagem “geocover” ortoretificada da página da Nasa, referente ao programa Global Land Cover Facility, da Universidade de Maryland (University of Maryland, 2000; Gutman et al., 2013).

Para realizar a correção atmosférica, cada imagem – B1 (0,45 a 0,52 µm), B2 (0,52 a 0,60 µm), B3 (0,63 a 0,69 µm), B4 (0,76 a 0,90 µm), B5 (1,55 a 1,75 µm) e B7 (2,09 a 2,35 µm) –, do TM/Landsat 5, foi inicialmente convertida de número digital (ND) para radiância no topo da atmosfera. Os parâmetros de radiância

espectral do satélite Landsat 5 (Chander et al., 2007) foram obtidos por meio da página referente às missões Landsat do United States Geological Survey (Estados Unidos, 2012).

Em seguida, as imagens de radiância no topo da atmosfera foram convertidas para reflectância na superfície terrestre, por meio do módulo de correção atmosférica denominado Flaash, disponível no Envi 4.5 (ITT Visual Information Solutions, 2009). Neste módulo, os principais dados exigidos na etapa de conversão foram: data e horário da passagem do satélite; coordenadas centrais da imagem; ângulo de elevação solar; altitude média do terreno; valores de radiância espectral máxima e mínima do sensor; e condições da atmosfera, no momento da passagem do satélite (visibilidade, concentração de gases e aerossóis). Para cada imagem (B1, B2, B3, B4, B5 e B7), foram inseridas as informações referentes à altitude nominal do sensor, data e hora do voo e coordenadas centrais. Assim, a elevação média do terreno assumida foi de 0,14 km, modelo atmosférico denominado “mid-latitude summer”, e o modelo de aerossol rural. A visibilidade adotada foi de 100 km.

Selecionaram-se 12 atributos de respostas espectrais (AREs) referentes às bandas espectrais e aos seguintes índices de vegetação: B1, B2, B3, B4, B5, B7, SR, NDVI, Savi-0,25, Savi-0,5, GNDVI e MVI. Índices de vegetação consagrados (Ponzoni et al., 2012), foram introduzidos na análise para o monitoramento da atividade fotossintética, funcionamento e

desenvolvimento de plantas, estresse por nitrogênio, qualidade de plantios, estresse por seca, acúmulo de carbono e rendimento de produção, entre outros (Dorigo et al., 2007) (Tabela 1).

Para cada parcela, foram obtidos os valores da média e desvio-padrão da reflectância dos 12 atributos de resposta espectral (AREs). O valor de desvio-padrão foi utilizado para verificar qual a variação interna dos AREs de cada uma das parcelas.

A normalidade dos dados foi analisada pelo teste de Shapiro-Wilk (Shapiro et al., 1968). Uma vez verificada a normalidade, utilizou-se o teste t de Student para amostras independentes, para avaliar as diferenças entre os valores médios dos atributos espectrais entre os plantios (duas espécies). Para avaliar as diferenças nesses atributos (AREs), para o mesmo plantio (mesma espécie), nos dois diferentes períodos, utilizou-se o teste t de Student para amostras dependentes. Para todos os testes, foi utilizado o nível de significância de 5% .

A análise de componentes principais foi empregada para verificar se há combinação linear entre as AREs, para a identificação de diferentes padrões de respostas espectrais dos plantios florestais, nos dois períodos de análise. Para tratamento uniforme na análise, todas as variáveis foram padronizadas com média zero e variância um. Para calcular as principais componentes, utilizaram-se matrizes de correlação dos dados, sem rotação ortogonal dos eixos. A fim de avaliar a confiabilidade interna dos dados, realizou-se o teste alfa de Cronbach (Manly, 2005).

Tabela 1. Principais índices de vegetação utilizados.

Índice de vegetação	Autor	Formulação
Razão simples (“simple ratio” – SR)	Jordan (1969)	$SR = \rho_{IVP} / \rho_V$ em que: ρ_{IVP} é a reflectância no infravermelho próximo e ρ_V é a reflectância no vermelho.
Índice de vegetação da diferença normalizada (“normalized difference vegetation index” - NDVI)	Rouse et al. (1974)	$NDVI = (\rho_{IVP} - \rho_V) / (\rho_{IVP} + \rho_V)$ em que: ρ_{IVP} é a reflectância no infravermelho próximo e ρ_V é a a reflectância no vermelho.
Índice de vegetação ajustado ao solo (“soil-adjusted vegetation index” - Savi)	Huete (1988)	$Savi = [(\rho_{IVP} - \rho_V) / (\rho_{IVP} + \rho_V + L)] \times (1 + L)$ em que: L é a constante que minimiza o efeito do solo e varia de 0 a 1 (L=1 utilizado para vegetações densas, L = 0,5 para dosséis médios e L = 0,25 para vegetações abertas).
Green NDVI (“green normalized difference vegetation index” GNDVI)	Gitelson et al. (1996)	$GNDVI = (\rho_{IVP} - \rho_{Verde}) / (\rho_{IVP} + \rho_{Verde})$ em que: ρ_{Verde} é a reflectância no verde.
Índice de umidade na vegetação (“moisture-vegetation index” - MVI)	Gao (1996)	$MVI = (\rho_{IVP} - \rho_{IVM}) / (\rho_{IVP} + \rho_{IVM})$ em que: ρ_{IVM} é a reflectância no infravermelho médio.

Resultados e Discussão

Os testes de comparação de médias mostraram que, para as duas espécies, as variáveis B2, B3, B4, B5, Savi-0,5, Savi-0,25 e GNDVI diferiram entre si ($\alpha = 0,05$) no ano de 2009 e, para as demais variáveis, exceto B1 e B3, no ano de 2011 (Tabela 2). Alguns fatores biofísicos e estruturais podem estar associados a esta variabilidade espectral, como o índice de área foliar, o sub-bosque, a estrutura do dossel da espécie, condições da anatomia e arquitetura foliar (Goodwin et al., 2005; Canavesi & Ponzoni, 2010). Além disso, as bandas B1 e B3 estão associadas a comprimentos de onda relacionados à absorção da planta na realização da fotossíntese (Feilhauer et al., 2015), o que levou à ocorrência de valores baixos que dificultam a diferenciação de espécies nestas regiões do espectro eletromagnético.

Ademais, houve diferenças significativas entre todas as variáveis, quando foi analisada a mesma espécie

em diferentes anos, 2009 e 2011. Esta diferença pode estar associada às características de reflexão da energia eletromagnética, que têm um comportamento não lambertiano e são dependentes do comprimento de onda e da geometria de iluminação do alvo e visada do sensor (Dorigo et al., 2007). Esta diferença também pode estar associada com alterações na estrutura de dossel, próprias das variações de desenvolvimento dos povoamentos ligadas às condições de sítio, conforme observado por Canavesi & Ponzoni (2010), que relataram que espécies mais jovens de *Eucalyptus* spp. se diferenciaram de espécies mais velhas em consequência da variação da penetrabilidade da luz solar. Acrescente-se, ainda, que a maioria dos atributos de resposta espectral (AREs) tiveram para *E. urograndis* valores significativamente superiores aos de *E. dunnii*, o que pode estar associado à diferença de espaçamento entre os dois plantios.

Os dois modelos de componentes principais apresentaram elevados valores de variância total nos

Tabela 2. Valores das médias, desvio-padrão e significância dos testes de comparação de média e normalidade, realizados para as 12 variáveis (reflectâncias nas bandas espectrais e índices de vegetação - IVs).

Banda espectral	Espécie ⁽¹⁾	<i>Eucalyptus urograndis</i>		Espécie ⁽¹⁾	<i>Eucalyptus dunnii</i>	
		Ano 2009	Ano 2011		Ano 2009	Ano 2011
B1	1	0,0012±0,002	0,0085±0,0019**	2	0,0008±0,001	0,0081±0,0014**
B2	1	0,019±0,0038	0,023±0,0037**	2	0,013±0,003	0,017±0,0020**
B3	1	0,014±0,003	0,017±0,0018**	2	0,011±0,002	0,017±0,0015**
B4	1	0,36±0,034	0,34±0,021**	2	0,29±0,013	0,23±0,0091**
B5	1	0,10±0,012	0,085±0,0042**	2	0,09±0,005	0,079±0,0049**
B7	1	0,033±0,010	0,024±0,0032**	2	0,031±0,005	0,027±0,0029**
NDVI	1	0,92±0,017	0,90±0,009**	2	0,92±0,016	0,85±0,011**
SR	1	26,30±5,33	19,34±01,85**	2	26,21±6,05	13,21±01,18**
Savi-0,5	1	0,60±0,033	0,56±0,022**	2	0,52±0,016	0,43±0,012**
Savi-0,25	1	0,69±0,029	0,66±0,019**	2	0,63±0,015	0,53±0,012**
MVI	1	0,55±0,063	0,59±0,025**	2	0,52±0,022	0,49±0,017**
GNDVI	1	0,90±0,016	0,87±0,014**	2	0,91±0,019	0,85±0,014**
		Ano 2009	Ano 2009		Ano 2011	Ano 2011
B1	1 X 2	0,0012±0,002	0,0008±0,001 ^{ns}	1 X 2	0,0085±0,0019	0,0081±0,0014 ^{ns}
B2	1 X 2	0,019±0,0038	0,013±0,003**	1 X 2	0,023±0,0037	0,017±0,0020**
B3	1 X 2	0,014±0,003	0,011±0,002**	1 X 2	0,017±0,0018	0,017±0,0015 ^{ns}
B4	1 X 2	0,36±0,034	0,29±0,013**	1 X 2	0,34±0,021	0,23±0,0091**
B5	1 X 2	0,10±0,012	0,09±0,005**	1 X 2	0,085±0,0042	0,079±0,0049**
B7	1 X 2	0,033±0,010	0,031±0,005*	1 X 2	0,024±0,0032	0,027±0,0029**
NDVI	1 X 2	0,92±0,017	0,92±0,016 ^{ns}	1 X 2	0,90±0,009	0,85±0,011**
SR	1 X 2	26,30±5,33	26,21±6,05 ^{ns}	1 X 2	19,34±01,85	13,21±01,18**
Savi-0,5	1 X 2	0,60±0,033	0,52±0,016**	1 X 2	0,56±0,022	0,43±0,012**
Savi-0,25	1 X 2	0,69±0,029	0,63±0,015**	1 X 2	0,66±0,019	0,53±0,012**
MVI	1 X 2	0,55±0,063	0,52±0,022 ^{ns}	1 X 2	0,59±0,025	0,49±0,017**
GNDVI	1 X 2	0,90±0,016	0,91±0,019**	1 X 2	0,87±0,014	0,85±0,014**

⁽¹⁾1, *Eucalyptus urograndis*; 2, *E. dunnii*. ^{ns}Não significativo. *, **Significativo pelo teste t a 5% e a 1% de probabilidade.

dados, para as duas primeiras componentes principais, com 78% em 2009 e 80% no ano de 2011 (Tabela 3).

Os elevados autovalores dos dois primeiros componentes indicam sua importância para explicar a variação dos dados, comprovados pelos elevados valores do coeficiente de fidedignidade de Cronbach ($>0,9$). Estes valores indicam que os primeiros fatores estão coerentes com as variáveis que os compõem. Ademais, a combinação dos dois primeiros componentes permitiu maior separação entre os fatores estudados (espécies x anos). Resultados similares foram obtidos por Aardt & Norris-Rogers (2008), todavia, estes autores utilizaram imagens de maior resolução espectral, com 36 bandas na faixa de 426–952 nm, e resolução espacial de 1 m.

A ACP revelou características específicas na resposta espectral, para cada espécie, nos dois diferentes anos de análise. Em 2009, todas as parcelas com *E. urograndis* (de 1 a 19) apresentaram variáveis com escores positivos (B1, B2, B3, B4 e B5) no eixo principal da ordenação, e *E. dunnii* (parcelas com os números de 20 a 42) apresentou forte correlação com as outras variáveis (SR, NDVI e GNDVI), com escores negativos nos mapas bidimensionais (Figura 1). A espécie de *E. urograndis* apresentou os maiores valores de médias para todas as variáveis, em comparação aos de *E. dunnii* (Tabela 2). Novamente, em 2011, na primeira componente principal (CP1), *E. urograndis* apresentou escores positivos para cinco variáveis (Savi-0,25, Savi-0,5, B4, SR, MVI, NDVI e

Tabela 3. Componentes principais gerados pelos modelos em 2009 e 2011, seguidos de valores de alfa de Cronbach, autovalores e suas respectivas percentagens de variância explicada.

Componente	Ano 2009			Ano 2011		
	Alfa de Cronbach	Autovalores	Variância (%)	Alfa de Cronbach	Autovalores	Variância (%)
1	0,885	5,302	44,731	0,937	7,087	59,061
2	0,829	4,159	34,6555	0,674	2,615	21,789
Total	0,976	9,460	78,836	0,978	9,702	80,850

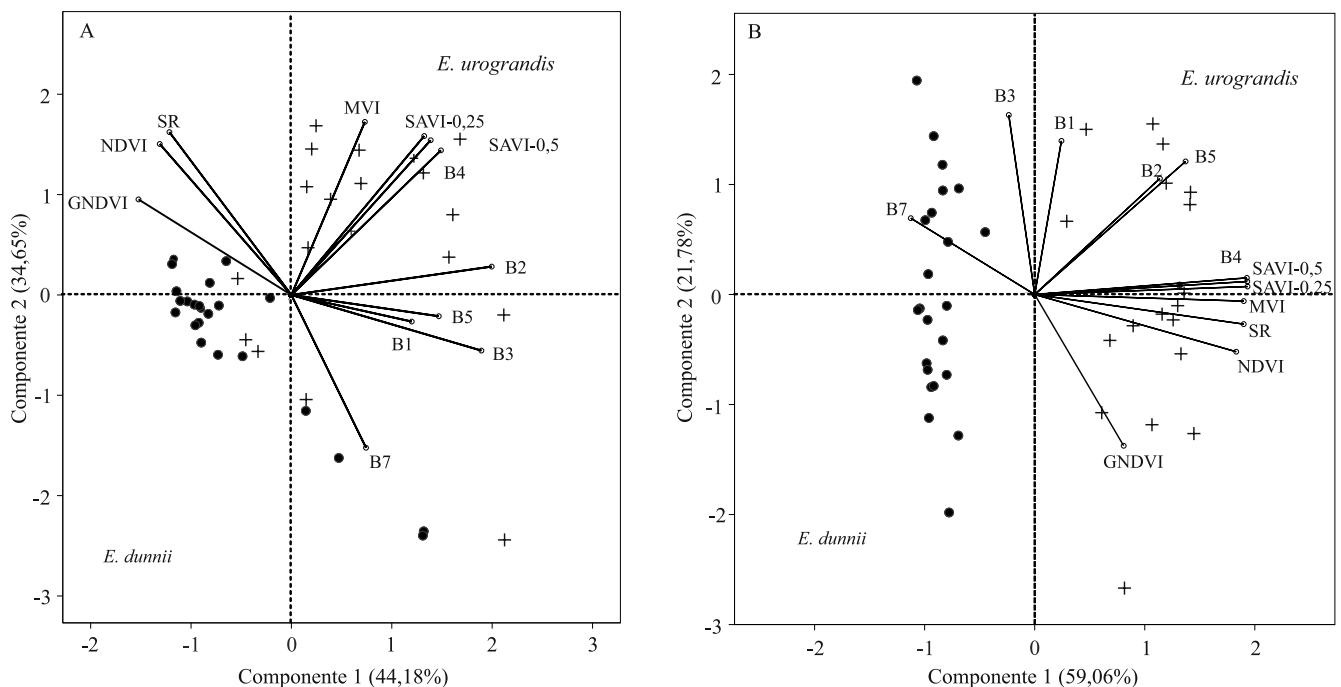


Figura 1. Mapas bidimensionais dos modelos de componentes principais para as respostas dos sensores TM/Landsat 5, e índices de vegetação em plantios de *Eucalyptus urograndis* (+) e *E. dunnii* (•), para os anos de 2009 (A) e 2011 (B).

B2), no eixo 1 da ordenação nos mapas bidimensionais (Figura 1). No mesmo ano, estas variáveis apresentaram para *E. urograndis* valores de média maiores do que os de *E. dunnii* (Tabela 2).

Wink et al. (2012) observaram que o índice de abrangência (IA) – razão entre o diâmetro de copa e a altura total da árvore – diminuiu em povoamentos de *Eucalyptus* sp. com 44 meses de idade, em comparação ao povoamento com 24 meses, assim como o índice de saliência (IS) – relação entre o diâmetro de copa e o DAP. Isto mostra que o crescimento das árvores pode não ter relação direta com o aumento da copa e, conseqüentemente, com a quantidade de folhas verdes ou IAF. Mesmo assim, um aumento do IAF provoca aumento da reflectância, na banda do infravermelho próximo (B4), e aumento da absorção da radiação visível (B1 e B3) pelos pigmentos foliares (Dorigo et al., 2007; Clevers et al., 2008), ocasionado pelo tamanho de copa e quantidade de folhas fotossinteticamente ativas. Essas alterações em B3 e B4 afetam diretamente todos os resultados dos índices de vegetação utilizados.

Os mapas bidimensionais também complementam as correlações dos autovetores com as parcelas em que três variáveis (NDVI, GNDVI, e SR) estariam mais correlacionadas a *E. dunnii*, e as demais variáveis com *E. urograndis*, no ano de 2009 (Figura 1A). No entanto, para o ano de 2011, apenas B7 e B3, que correspondem às bandas do infravermelho curto e vermelho, respectivamente, estiveram correlacionadas com as parcelas de *E. dunnii*, sendo que as demais foram correlacionadas com *E. urograndis* (Figura 1B). A configuração das parcelas das duas espécies, no eixo 1 dos dois modelos, indicou assinaturas espectrais bem distintas, com elevadas correlações de AREs para *E. urograndis* em relação a *E. dunnii*, e seguiu o padrão mostrado nos testes de comparação de médias. Efeitos de geometria de iluminação podem estar associados à diferença de reflectância associada à idade em plantios comerciais de eucaliptos, conforme destacado por Ponzoni et al. (2015).

A maior correlação de *E. urograndis* (em 2009) com as bandas do verde (B2), vermelho (B3), infravermelho próximo (B4) e infravermelho médio (B5) é decorrente da idade do povoamento e de suas características. Todavia, para *E. dunnii*, a correlação com estas variáveis foi menor. Por se tratar de plantio proveniente de sementes, *E. dunnii* apresenta muito mais falhas e árvores mortas do que o plantio de *E. urograndis*,

que provem de clones e, portanto, é mais homogêneo. Povoamentos clonais tendem a ter maior densidade de cobertura de dossel e também maior uniformidade. Isso interfere no efeito das sombras e na mistura espectral com o sub-bosque, pois, quando a cobertura vegetal não é tão uniforme, outros fatores como a liteira, a sombra e galhos secos interferem na resposta espectral (Ponzoni et al., 2015).

Os valores elevados da razão simples (SR) em 2011, para ambas as espécies (Tabela 2), são referentes à maior resposta da vegetação para as bandas do infravermelho-próximo e vermelho, conforme Huete et al. (2002), que relatam elevada sensibilidade à variação da biomassa e do índice de área foliar em áreas florestais. A mesma condição encontra correspondência no estudo desenvolvido por Quarto Júnior et al. (2008), que relataram que o aumento dos valores de reflectância da região do infravermelho próximo, em detrimento da região do vermelho, com uso dos sensores ETM+, Modis e HRV para cultivos de cana-de-açúcar e vegetação nativa densa, é decorrente do aumento da densidade da vegetação, o que acarreta o aumento dos índices de vegetação que utilizam esta relação.

Os valores elevados para o índice de vegetação e umidade (MVI), encontrados em 2011 para as duas espécies (Tabela 2), estão relacionados à alta reflectância encontrada na região do infravermelho próximo em comparação ao infravermelho médio, o que evidencia a potencialidade deste índice e motiva a finalidade de explorar o contraste entre ambas. Essas duas regiões, segundo Ponzoni et al. (2012), apresentam comportamento inversamente proporcional: o aumento da vegetação aumenta a absorção de REM pela água contida nas folhas, na região do infravermelho médio, o que é corroborado pelos resultados encontrados no presente estudo.

Conclusões

1. Os dados espectrais extraídos das imagens TM/Landsat 5 são eficazes, tanto para distinguir as espécies de eucalipto como também a mesma espécie em plantios equiâneos, nos dois anos de análise.

2. Os doze atributos testados diferem significativamente para a mesma espécie, nos dois períodos de estudo, e é possível a utilização de qualquer um desses

atributos para diferenciar a idade dos plantios de *Eucalyptus dunnii* e *E. urograndis*.

3. As espécies *E. dunnii* e *E. urograndis* são diferenciadas por cinco bandas do Landsat – B2, B3, B4, B5, e B7 – e três índices de vegetação – Savi-0,5, Savi-0,25 e GNDVI –, em 2009, e por quatro bandas do TM/Landsat 5 – B2, B4, B5, e B7 – e seis índices de vegetação – NDVI, SR, Savi-0,5, Savi-0,25, MVI, GNDVI –, no ano de 2011.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo apoio financeiro.

Referências

- AARDT, J.A.N. van; NORRIS-ROGERS, M. Spectral-age interactions in managed, even-aged *Eucalyptus* plantations: application of discriminant analysis and classification and regression trees approaches to hyperspectral data. **International Journal of Remote Sensing**, v.29, p.1841-1845, 2008. DOI: 10.1080/01431160701874546.
- AARDT, J.A.N. van; WYNNE, R.H. Examining pine spectral separability using hyperspectral data from an airborne sensor: an extension of field-based results. **International Journal of Remote Sensing**, v.28, p.431-436, 2007. DOI: 10.1080/01431160500444772.
- BOLDRINI, I.I. A flora dos campos do Rio Grande do Sul. In: PILLAR, V.D.P.; MÜLLER, S.C.; CASTILHOS, Z.M. de S.; JACQUES, A.V.A. (Ed.). **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2009. p.63-77.
- CANAVESI, V.; PONZONI, F.J. Caracterização espectral de plantios de *Eucalyptus* utilizando dados Hyperion EO-1 e SRTM. **Ambiência**, v.6, p.127-136, 2010. Edição especial.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B.L.; BARSÍ, J.A. Revised Landsat-5 thematic mapper radiometric calibration. **Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE**, v.4, p.490-494, 2007. DOI: 10.1109/LGRS.2007.898285.
- CLEVERS, J.G.P.W.; KOOISTRA, L.; SCHAEPMAN, M.E. Using spectral information from the NIR water absorption features for the retrieval of canopy water content. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.10, p.388-397, 2008. DOI: 10.1016/j.jag.2008.03.003.
- DORIGO, W.A.; ZURITA-MILLA, R.; DE WIT, A.J.W.; BRAZILE, J.; SINGH, R.; SCHAEPMAN, M.E. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.9, p.165-193, 2007. DOI: 10.1016/j.jag.2006.05.003.
- DUBE, T.; MUTANGA, O. Investigating the robustness of the new Landsat-8 Operational Land Imager derived texture metrics in estimating plantation forest aboveground biomass in resource constrained areas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.108, p.12-32, 2015b. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.06.002.
- DUBE, T.; MUTANGA, O. Evaluating the utility of the medium-spatial resolution Landsat 8 multispectral sensor in quantifying aboveground biomass in uMgeni catchment, South Africa. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.101, p.36-46, 2015a. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.11.001.
- DUBE, T.; MUTANGA, O.; RAHMAN-ABDEL, E.M.; ISMAIL, R.; SLOTO, R. Predicting *Eucalyptus* spp. stand volume in Zululand, South Africa: an analysis using a stochastic gradient boosting regression ensemble with multi-source data sets. **International Journal of Remote Sensing**, v.36, p.3751-3772, 2015. DOI: 10.1080/01431161.2015.1070316.
- SANTOS, H.G. dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; OLIVEIRA, J.B. de; COELHO, M.R.; LUMBRERAS, J.F.; CUNHA, T.J.F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- ESTADOS UNIDOS. Department of the Interior. Geological Survey. **Landsat 5 (L5) Thematic Mapper (TM): calibration parameter files (CPFs)**. Oct./Dec. 2012. Available at: <http://landsat.usgs.gov/science_L5_cpf.php>. Accessed on: 15 June 2013.
- FEILHAUER, H.; ASNER G.P.; MARTIN, R.E. Multi-method ensemble selection of spectral bands related to leaf biochemistry. **Remote Sensing of Environment**, v.164, p.57-65, 2015. DOI: 10.1016/j.rse.2015.03.033.
- GAO, B.C. NDWI a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v.58, p.257-266, 1996. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
- GITELSON, A.A.; KAUFMAN, Y.J.; MERZLYAK, M.N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v.58, p.289-298, 1996. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00072-7.
- GOODWIN, N.; TURNER, R.; MERTON, R. Classifying *Eucalyptus* forests with high spatial and spectral resolution imagery: an investigation of individual species and vegetation communities. **Australian Journal of Botany**, v.53, p.337-345, 2005. DOI: 10.1071/BT04085.
- GUTMAN, G.; HUANG, C.; CHANDER, G.; NOOJIPADY, P.; MASEK, J.G. Assessment of the NASA-USGS Global Land Survey (GLS) datasets. **Remote Sensing of Environment**, v.134, p.249-265, 2013. DOI: 10.1016/j.rse.2013.02.026.
- HUETE, A.R.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E.P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v.83, p.195-213, 2002. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2.
- HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v.25, p.295-309, 1988. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.

- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Centro de Dados de Sensoriamento Remoto. **Catálogo de imagens:** satélite Landsat 5. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: 15 mar. 2012.
- ITT VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **Atmospheric correction module:** QUAC and FLAASH user's guide. 2009. 44p. Available at: <https://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/Flaash_Module.pdf>. Accessed on: 24 Feb. 2014.
- JORDAN, C.F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, v.50, p.663-666, 1969. DOI: 10.2307/1936256.
- QUARTO JÚNIOR, P.; XAVIER, A.C.; LIMA, J.S. de S. Investigação do NDVI e reflectância das bandas do vermelho e infravermelho-próximo de sensores distintos simulados por meio de dados do Hyperion para cana-de-açúcar e floresta natural. **Engenharia na Agricultura**, v.16, p.408-415, 2008. DOI: 10.13083/1414-3984.v16n04a04.
- KOVACS, J.M.; WANG, J.; FLORES-VERDUGO, F. Mapping mangrove leaf area index at the species level using IKONOS and LAI-2000 sensors for the Agua Brava Lagoon, Mexican Pacific. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.62, p.377-384, 2005. DOI: 10.1016/j.ecss.2004.09.027.
- KUINCHTNER, A.; BURIOL, G.A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia. Série Ciências Exatas**, v.2, p.171-182, 2001.
- MANLY, B.F.J. **Multivariate Statistical Methods:** a primer. 3rd ed. New York: Chapman & Hall/CRC, 2005. 214p.
- PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento remoto da vegetação.** 2. ed. atual. ampl. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 176p.
- PONZONI, F.J.; PACHECO, L.R.F.; SANTOS, S.B. dos; ANDRADES FILHO, C. de O. Caracterização espectro-temporal de dosséis de *Eucalyptus* spp. mediante dados radiométricos TM/Landsat5. **Cerne**, v.21, p.267-275, 2015. DOI: 10.1590/01047760201521021457.
- ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; DEERING, D.W.; SCHELL, J.A. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation.** College Station: Texas A&M University, 1974. 87p. (Progress Report RSC 1978-2). Available at: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740004927_1974004927.pdf>. Accessed on: 22 Mar. 2014.
- SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B.; CHEN, H.J. A comparative study of various tests for normality. **Journal of the American Statistical Association**, v.63, p.1343-1372, 1968. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480932.
- SOMERS, B.; VERBESSELT, J.; AMPE, E.M.; SIMS, N.; VERSTRAETEN, W.W. COPPIN, P. Spectral mixture analysis to monitor defoliation in mixed-aged *Eucalyptus globulus* Labill plantations in southern Australia using Landsat5-TM and EO-1Hyperion data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.12, p.270-277, 2010. DOI: 10.1016/j.jag.2010.03.005.
- WINK, C.; MONTEIRO, J.S.; REINERT, D.J.; LIBERALESSO, E. Parâmetros da copa e a sua relação com o diâmetro e altura das árvores de eucalipto em diferentes idades. **Scientia Forestalis**, v. 40, p.57-67, 2012.
- UNIVERSITY OF MARYLAND. Global land cover facility. A **Landcover Earth Science Information Partnership**. College Park, [2000]. Available at: <<http://www.landcover.org/library/pdf/proposal.pdf>>. Accessed on: 4 Jan. 2016.

Recebido em 19 de junho de 2015 e aprovado em 26 de novembro de 2015