

## Influência de métodos de coleta de dados espectrorradiométricos sob índices de vegetação em eucalipto

### *Influence of spectroradiometric data collection methods under vegetation indexes in eucalypto*

Thomas Schroder<sup>1</sup>, Rudiney Soares Pereira<sup>2</sup>, Anna Paula Lora Zimmermann<sup>1</sup>, Cristina Gouvêa Redin<sup>1</sup>, Leonardo Mortari Machado<sup>3</sup>, Marciane Danniel Fleck<sup>3</sup> e Najila Souza da Rocha<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Engenheiro(a) Florestal, Doutorando(a) em Engenharia Florestal, Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

<sup>2</sup>, Engenheiro Florestal, Dr., Prof. Titular, Departamento de Engenharia Rural, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

<sup>3</sup> Engenheiro(a) Florestal, Doutorando(a) em Engenharia Florestal, Departamento de Defesa Fitossanitária, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

<sup>4</sup> Engenheira Florestal, Mestranda em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

### Resumo

A espectrorradiometria permite detectar a resposta espectral por meio do contato direto com o alvo. Assim, objetivou-se verificar a influência de métodos de coleta, de folhas de *Eucalyptus grandis*, em índices de vegetação como posição de coleta na copa, orientação cardinal e estação do ano. Os dados foram coletados em dois povoamentos distintos em duas árvores dominantes cada. Foram coletadas 15 folhas em cada posição e em cada orientação, acrescidas de uma amostra de mesmo tamanho no centro. O material foi analisado com o espectrorradiômetro FieldSpec®3 e a resposta espectral de cada orientação e posição foi dada pela média da leitura espectral das folhas. Foram analisados 60 diferentes índices de vegetação de acordo com a literatura. Para avaliar o efeito da estação sobre os índices foram realizadas coletas nas quatro estações do ano. Foram utilizados modelos mistos para analisar a influência nos fatores (posição e estação) e sua interação. Os dados foram considerados aninhados em cada orientação, dentro de cada árvore e de cada área. A análise estatística foi realizada no software R com o pacote nlme. Dos índices de vegetação analisados, seis apresentam dependência da posição/orientação e estação de coleta.

**Palavras-chave:** Sensoriamento remoto. Reflectância. Padrão espectral.

### Abstract

The spectroradiometry can detect the spectral response through direct contact with the target. Thus, the objective was to verify the influence of collect methods, *Eucalyptus grandis* leaves in vegetation indexes as collect position in the canopy, Cardinal point and season. Data were collected at two different stands on two dominant trees each. 15 leaves were collected at each position and in each direction, plus a sample of the same size at the center. The material was analyzed with FieldSpec®3 spectroradiometer and the spectral response of each orientation and position was given by the average spectral reading of the leaves. 60 different vegetation indexes according to the literature were analyzed. To evaluate the effect of season on the indices samples were taken in four seasons. Mixed models were used to analyze the influence in factors (position and station) and their interaction. Data were considered nested in each orientation, within each tree and each area. Statistical analysis was performed using R software with nlme package. Vegetation indexes analyzed six are dependent of the position, orientation and station.

**Keywords:** Remote sensing. Reflectance. Spectral pattern.

## 1 Introdução

Técnicas ligadas ao sensoriamento remoto têm sido utilizadas para análise do comportamento da vegetação em diferentes paisagens, entre elas, floresta, agricultura e vegetação urbana. A resposta de objetos à radiação atualmente é alvo de estudos, sendo que nas ciências agrárias, os principais elementos pesquisados são o solo e a vegetação (SILVA et al., 2012).

O Brasil apresenta em torno de 5,74 milhões de hectares (ha) de plantações arbóreas comerciais, sendo 3,55 milhões de ha plantados com *Eucalyptus* sp., 1,82 ha com *Pinus* sp., e 370,5 mil ha, com outras espécies florestais (BINKOWSKY, 2009). Conforme o mesmo autor, no país o gênero *Eucalyptus* foi introduzido no início do século XIX, onde há evidências que apontam as primeiras árvores plantadas em 1825 no Jardim Botânico do Rio de Janeiro. A madeira é utilizada para produção de celulose e papel, painéis de fibra e aglomerado, combustível industrial e doméstico além de produtos de serraria (SOARES et al., 2003).

A interação entre vegetação e o hábitat é fundamental para o entendimento dos fenômenos naturais, nesse contexto, a espectrorradiometria permite detectar a resposta espectral por meio do contato direto com o alvo, podendo ser feita em laboratório, o que minimiza as interferências dos fatores ambientais presentes nas leituras de outros sensores.

Segundo Ferri et al. (2001) com o desenvolvimento do sensoriamento remoto hiperespectral, tem-se aberto à possibilidade de quantificar pigmentos fotossintéticos individuais contidos na vegetação. Entre outros estudos, estas informações podem ajudar a determinar o estado fisiológico da vegetação (detecção de estresse), a discriminar diferentes espécies (monitoramento das características fenológicas) e estimar a produtividade (quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida). Porém, é de fundamental importância, observar fatores como idade da planta e tipo de solo da região, pois vários estudos demonstram que a porcentagem de cobertura, porcentagem de água nas plantas, índice de área foliar e tipo de solo, interferem nos resultados principalmente na determinação de clorofila.

Os objetos apresentam comportamento espectral distintos em relação aos comprimentos de ondas, ou seja, devido à sua composição física e química os objetos podem absorver ou refletir mais ou menos radiação solar na superfície terrestre. Assim, os tecidos fotossintéticos das plantas, por exemplo, absorvem fortemente a radiação solar incidente na região do vermelho (0,55 – 0,70  $\mu\text{m}$ ), devido à presença de alta quantidade de pigmentos de clorofila e de carotenos existentes na folha. Por outro lado, a vegetação tem uma alta reflectância na região do infravermelho próximo (0,70 – 1,30  $\mu\text{m}$ ), devido às características estruturais das folhas e efeitos fenológicos do dossel (GUYOT; GUYON; RIOM, 1989).

Índices de vegetação, que são combinações de dois ou mais comprimentos de onda designados para realçar alguma propriedade da vegetação, são comumente utilizados para avaliar aspectos sazonais de fitofisionomias de biomas distintos em estudos regionais e globais (LIESENBERG, et al., 2007). Os índices de vegetação, produtos de sensoriamento remoto, foram concebidos para ressaltar o comportamento espectral da vegetação em relação aos solos (PAIVA, 2009).

Assim, o objetivo deste estudo é de verificar a possível influência, na resposta de diferentes índices de vegetação, calculados a partir de dados hiperespectrais de folhas de *E. grandis* na orientação geográfica, estação de coleta e posição de coleta das folhas na copa das árvores.

## 2 Metodologia

### 2.1 Caracterização da área de estudo

Os dados foram mensurados de acordo com as técnicas de coletas descritas por Brandelero (2010) em área experimental pertencente à Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária, Centro de Pesquisas de Recursos Florestais (FEPAGRO FLORESTAS), localizada no município de Santa Maria. O município encontra-se na região fisiográfica da depressão central do estado do Rio Grande do Sul, localizado entre as coordenadas geográficas 29°40'31" de latitude Sul e 53°54'45" de longitude Oeste de Greenwich, com altitude média de 130 metros (Figura 1).

O relevo da região é levemente ondulado, com altitude de aproximadamente 100 metros e seu clima é classificado como do tipo fundamental Cfa, de acordo com a classificação de Köppen, sem estação seca definida (HELDWEIN; BURIOL; STRECK, 2009). O solo do local é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 1999), pertencente à Unidade de Mapeamento São Pedro (BRASIL, 1973). Essa unidade de mapeamento caracteriza-se por apresentar solos mediantemente profundos, não hidromórficos, avermelhados, com textura superficial franco arenosa, friáveis e bem drenados, possuindo horizonte B textural. São solos distróficos, ácidos e pobres em matéria orgânica (DALMOLIN; PEDRON, 2009).

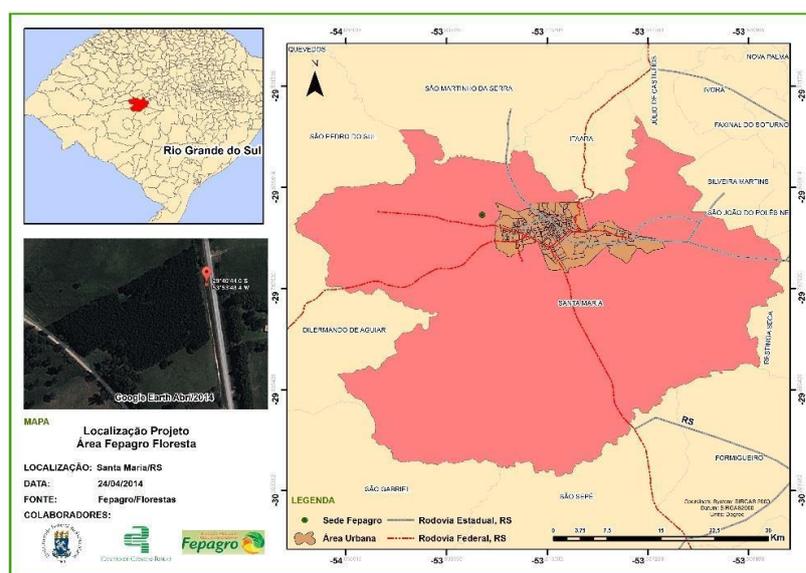


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo, Santa Maria, RS.

Fonte: Autores.

### 2.2 Procedimento amostral e análise estatística

As coletas foram efetuadas em duas áreas experimentais distintas, ambas com povoamentos de *E. grandis*, a primeira área com povoamento de idade igual a 44 meses e a segunda área com povoamento de idade de 20 meses. Em cada área experimental foram selecionadas duas árvores dominantes, e destas foram coletadas 15 folhas em cada orientação cardinal da copa, acrescidas de uma amostra de mesmo tamanho no centro da copa nas três posições (Figura 2).

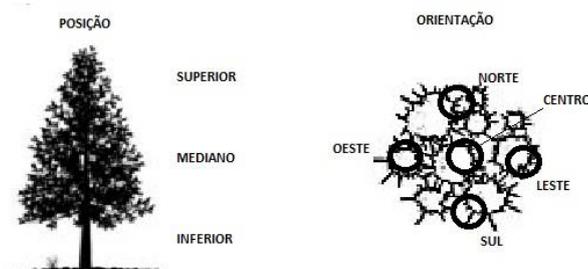


Figura 2 - Posição da coleta de folhas na copa de cada indivíduo de *E. grandis* selecionado.  
Fonte: Autores.

A coleta das folhas foi realizada em um único dia, entre 13:00 e às 15:00 horas. Após a coleta do material, as folhas foram embaladas em sacos plásticos devidamente identificados, e colocadas em caixa térmica hermeticamente fechada. No Laboratório de Sensoriamento Remoto – CCR – UFSM, todo o material vegetativo coletado foi analisado com o espectrorradiômetro FieldSpec®3 no máximo uma hora após o material vegetativo ter sido coletado. A resposta espectral de cada orientação cardinal, em cada árvore foi considerada como a média da leitura espectral das 15 folhas analisadas. Com estes dados foram analisados 60 diferentes índices de vegetação encontrados na literatura, conforme apresentado abaixo, todos baseados no perfil da reflectância do padrão da vegetação, conforme Figura 3.

**Região do visível:** (SMITH, 1995)  $(R_{554}/R_{677})$ ; (PEÑUELAS; BARET; FILELLA, 1995)  $(R_{430}/R_{680})$ ; (READ et al., 2002)  $(R_{415}/R_{695})$ ; (BARNES et al., 1992)  $(R_{415}-R_{435})/(R_{415}+R_{435})$ ; (GAMON; SERRANO; SURFUS, 1997)  $(R_{531}-R_{570})/(R_{530}+R_{570})$ ; (STEDDOM et al., 2003)  $(R_{612}+R_{660})/(R_{510}+R_{560})$ ; (HANSEN; SCHJOERRING, 2003)  $(R_{573}-R_{440})/(R_{573}+R_{440})$ ; (STROPPIANA et al., 2009)  $(R_{503}-R_{483})/(R_{503}+R_{483})$ ;

**Relações entre visível e infra-vermelho próximo:** (BLACKBURN, 1998)  $(R_{800}/R_{600})$ ,  $(R_{800}/R_{635})$ ,  $(R_{800}/R_{470})$ ,  $(R_{800}+R_{635})/(R_{800}-R_{635})$ ,  $(R_{800}-R_{470})/(R_{800}+R_{470})$ ; (DAUGHTRY; WALTHALL, 2000)  $(R_{810}/R_{670})$ ,  $(R_{801}-R_{550})/(R_{800}+R_{550})$ ,  $((R_{700}-R_{670})-0.2*(R_{700}-R_{550}))*(R_{700}/R_{670})$ ; (BUSCHMANN; NAGEL, 1993)  $(R_{800}/R_{550})$ ,  $(R_{800}-R_{550})$ ; (MCMURTREY et al., 1994)  $(R_{700}/R_{670})$ ; (CHAPPELLE; KIM; MCMURTREY, 1992)  $(R_{675}/(R_{700}*R_{650}))$ ,  $(R_{675}/R_{700})$ ; (DATT, 1998)  $(R_{672}/(R_{550}*R_{708}))$ ,  $(R_{860}/(R_{550}*R_{708}))$ ; (GITELSON; MERZLYAK, 1996)  $(R_{750}/R_{550})$ ,  $(R_{780}-R_{550})/(R_{780}+R_{550})$ ,  $(R_{800}-R_{600})/(R_{800}+R_{600})$ ; (SCHEPERS et al., 1996)  $(R_{550}/R_{850})$ ; (READ et al., 2002)  $(R_{415}/R_{710})$ ; (JORDAN, 1969)  $(R_{800}/R_{680})$ ; (GITELSON, 2005)  $(R_{750}/R_{550})-1$ ; (PEÑUELAS et al., 1994)  $(R_{680}-R_{430})/(R_{680}+R_{430})$ ; (PEÑUELAS; BARET; FILELLA, 1995)  $(R_{800}-R_{445})/(R_{800}+R_{680})$ ; (SIMS; GAMON, 2002)  $(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705}-2*R_{445})$ ,  $(R_{750}-R_{445})/(R_{705}-R_{445})$ ,  $(R_{680}-R_{500})/R_{750}$ ; (HABOUDANE et al., 2002)  $3*((R_{700}-R_{670})-0.2*(R_{700}-R_{550})*(R_{700}/R_{670}))$ ,  $3*((R_{700}-R_{670})-0.2*(R_{700}-R_{550})*(R_{700}/R_{670}))/((1+0.16)*(R_{800}-R_{670}))/((R_{800}+R_{670})+0.16)$ ; (BROGE; LEBLANC, 2001)  $0.5*(120*(R_{750}-R_{550})-200*(R_{670}-R_{550}))$ ; Índice Simple ratio 17 (SR17), XUE et al. (2004)  $(R_{810}/R_{560})$ ;

**Índices da borda do vermelho:** (ZARCO-TEJADA et al., 2001)  $(R_{750}/R_{710})$ ; (JASPER; REUSCH; LINK, 2009)  $(R_{760}/R_{730})$ ,  $(\log(R_{760})-\log(R_{730}))$ ; (VOGELMANN; ROCK; MOSS, 1993)  $(R_{740}/R_{720})$ ,  $(R_{734}-R_{747})/(R_{715}+R_{726})$ ; (GITELSON; MERZLYAK, 1996)  $(R_{750}/R_{700})$ ; (SERRANO; FILELLA; PENUELAS, 2000)  $(R_{900}/R_{680})$ ,  $(R_{900}-R_{680})/(R_{900}+R_{680})$ ; (SCHEPERS et al., 1996)  $(R_{710}/R_{850})$ ; (SIMS; GAMON, 2002)  $(R_{750}/R_{705})$ ,  $(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705})$ ; (FAVA et al., 2009)  $(R_{787}/R_{765})$ ; (LE MAIRE et al., 2005)  $((R_{750}-R_{720})-(R_{700}-R_{670}))$ ; (GITELSON, 2005)  $(R_{750}/R_{720})-1$ ; (DASH; CURRAN, 2004)  $(R_{750}-R_{710})/(R_{710}-R_{680})$ ; (DATT, 1999)  $(R_{780}-R_{710})/(R_{780}-R_{680})$ ,  $(R_{850}+R_{710})/(R_{850}+R_{680})$ ; (GITELSON; MERZLYAK, 1994)  $(R_{800}-R_{700})/(R_{800}+R_{700})$ ; (STEDDOM et al., 2003)  $(R_{760}-R_{708})/(R_{760}+R_{708})$ ; (RONDEAUX; STEVEN; BARET, 1996)  $(1+0.16)*(R_{800}-R_{670})/(R_{800}+R_{670})+0.16$ ; (GUYOT; BARET, 1988)  $700+40*((R_{670}+R_{780})/2)-R_{700})/(R_{740}-R_{700})$ ; (ROUJEAN; BREON, 1995)  $(R_{800}-R_{670})/(R_{800}+R_{670})^{0.5}$ ;

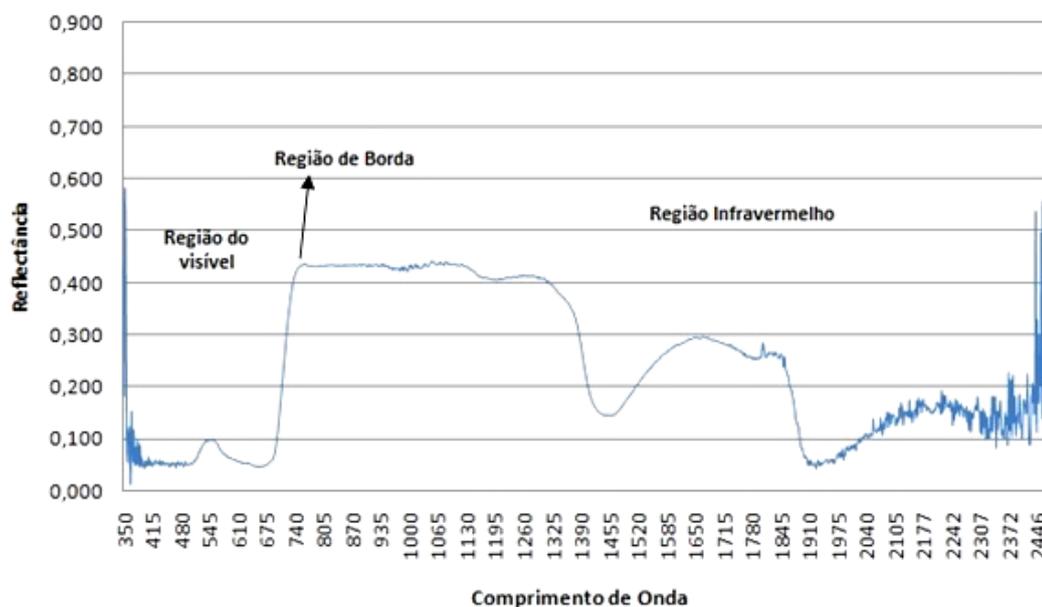


Figura 3 - Exemplo de curva de padrão espectral para espécies florestais.  
Fonte: Autores.

Para avaliar o efeito da estação sobre os índices de vegetação foram realizadas coletas nas diferentes estações do ano, configurando 4 tratamentos: maio de 2008, estação climática outono; agosto de 2008, estação climática inverno; outubro de 2008, estação climática primavera; fevereiro de 2009, estação climática verão.

Foram utilizados modelos mistos para analisar a influência da estação e da orientação sobre os diferentes índices de vegetação. O modelo foi completo com os fatores (orientação e estação) e sua interação, os dados foram considerados aninhados em cada orientação, dentro de cada árvore, dentro de cada área. A análise estatística foi realizada no *software* R (R CORE TEAM, 2013) com o pacote *nlme* (PINHERIO et al., 2010).

### 3 Resultados e Discussão

Dentre os índices de vegetação estudados, seis deles apresentaram dependência da posição das folhas na copa das árvores (Tabela 1), sendo eles: Índice de vegetação da Diferença Normalizada de Hansen e Schjoerring (2003); Diferença normalizada do pigmento específico de Blackburn (1998); Índice da Estrutura de pigmento intenso de Peñuelas, Baret e Filella (1995); Índice Simple Ratio de Read et al. (2002); Índice de Vegetação da Diferença Normalizada 705 Modificado de Sims e Gamon (2002); Índice Simple Ratio de Read et al. (2002). Nenhum destes índices foi classificado como índice de borda do vermelho, ou seja, todos os índices que foram dependentes da posição das folhas na copa utilizaram-se de reflectâncias da faixa do visível no seu cálculo.

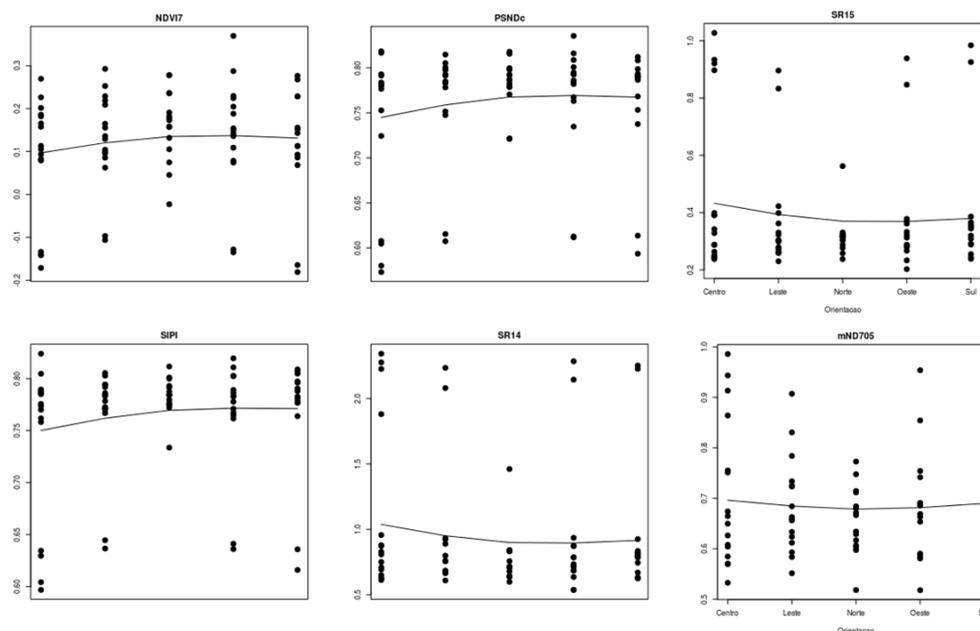
Tabela 1 - Resultados da análise de variância, por modelos mistos, dos índices de vegetação influenciados pela orientação das folhas na copa de *E. grandis* em Santa Maria - RS.

Índice	Fator	Graus de liberdade	Valor de F	Valor de p
DVI7	Orientação	4	3,28	0,0177
	Estação*Orientação	12	2,61	0,0081
PSNDc	Orientação	4	3,07	0,0238
	Estação*Orientação	12	2,55	0,0094
SIPI	Orientação	4	2,95	0,0283
	Estação*Orientação	12	2,55	0,0095
SR14	Orientação	4	2,51	0,0522
	Estação*Orientação	12	2,49	0,0112
SR15	Orientação	4	3,06	0,0241
	Estação*Orientação	12	3,15	0,0019
mND705	Orientação	4	1,86	0,0131
	Estação*Orientação	12	4,01	0,0002

Os efeitos de cada posição de coleta nestes índices podem ser visualizados na Figura 4. É possível observar que de todos os índices a posição de coleta que apresenta diferenças significativas é a posição norte das copas. Este fato deve-se à maior radiação solar a que estas folhas estão expostas, necessitando de adaptações morfológicas e fisiológicas para tal situação. Neste contexto, Pezzopane (2001), afirma que a influência do relevo pode modificar a disponibilidade de radiação de acordo com o grau de inclinação e face de exposição do terreno, provocando aumento ou diminuição da energia disponível para a biossíntese, podendo ocorrer alterações no balanço de energia e, conseqüentemente, no microclima local.

Como a área de coleta se situa abaixo da latitude de 29°, o efeito de maior insolação na parte norte da copa foi captada por índices de vegetação sensíveis às adaptações que as folhas apresentam nestas condições ambientais. Estes efeitos devem se apresentar de forma mais acentuada em latitudes maiores e devem se diluir em áreas mais próximas à linha do equador. O relevo pode modificar o regime de radiação de acordo com a face de exposição e o grau de inclinação do terreno, promovendo aumento ou diminuição da energia disponível para a biossíntese, podendo ocorrer alterações no balanço de energia e, conseqüentemente, no microclima local (PEZZOPANE, 2001).

Estudos de sensoriamento remoto com dados hiper-espectrais de *E. grandis*, que utilizam os índices de vegetação supra-citados, devem manter controlada a posição de coleta das informações de reflectância em relação à orientação cardinal das folhas. Entretanto, de forma geral, pode-se enfatizar que índices de vegetação obtidos de dados hiper-espectrais, são independentes do efeito da orientação das folhas na copa das árvores, uma vez que 90% dos índices testados não foram significativamente influenciados por este fator.



**Figura 4.** Resultados de cada observação dos índices testados que foram influenciados pela posição de coleta das folhas dentro da copa de *E. grandis* em Santa Maria - RS. As linhas representam *splines* quadráticas ajustadas aos dados.

Segundo Holben (1986) citado por Gurgel (2003) os valores de NDVI para as áreas com vegetação dependem da sua arquitetura, densidade e umidade e variam entre 0,1 e 0,6. Os maiores valores desta variável estão associados a coberturas vegetais mais densas. Quando se fala em arquitetura não fica explícito que parâmetros são distintos, nesse caso posição foliar poderia ser um diferencial. Ainda sobre esse índice, pode-se afirmar que a presença de nuvens e água, geralmente está associada a valores negativos de NDVI. Rochas e solos expostos possuem reflectância similares nas duas regiões espectrais utilizadas para o cálculo do NDVI, ocasionando, portanto, valores próximos a zero.

Conforme Ramos et al. (2010) a radiação que chega à superfície da Terra (radiação global), ao atingir a planta, interage com esta e resulta em três frações. Uma parte dessa radiação é absorvida pelos pigmentos contidos na folha e participa na síntese de compostos ricos em energia, outra parte dessa radiação é refletida pelas folhas, fenômeno denominado reflexão, faixa que se aplica o NDVI. Conforme Moreira (2003), estes pigmentos, citados a cima, são compostos pelas clorofilas "a" e "b", em maior quantidade, e pelos carotenóides, xantofilas e antocianinas.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI - Normalized Difference Vegetation Index) tem sido amplamente utilizado por proporcionar um forte sinal da vegetação, e oferecer um bom contraste com outros objetos da superfície terrestre, ou seja, a sua utilização se torna de fácil compreensão e traz resultados mais rápidos para o ambiente em que se estuda (TUCKER; SELLERS, 1986).

Em estudos anteriores aplicando-se esse índice, constatou-se que períodos chuvosos possuem valores de variação mais elevados. Gurgel et al. (2003) estudando o Bioma Caatinga, bioma que apresenta períodos chuvosos bem representativos entre dezembro e maio verificou que essa variação caracteriza diferenças na cobertura vegetal, tendo como resultados análises rápidas. Porém, não é encontrado nenhum estudo que indica a relação entre orientação da folha na árvore e a reflectância que resulta por meio desse índice.

## 4 Conclusões

Dos índices testados há influência da posição na copa das árvores, da orientação e/ou estações do ano que foram realizadas as coletas, em seis dos índices encontrados na literatura, sendo DVI7, PSND, SIPI, SR14, SR15, mND705. Sendo assim, para o uso destes índices nos próximos estudos devem-se observar essas variáveis. Porém, vale ressaltar que 90% dos índices não foram influenciados por nenhuma dessas características e podem ser testados com menor dependência desses fatores.

Verifica-se a influência significativa da orientação geográfica, estação de coleta e posição das folhas nas copas de *E. grandis* em diferentes índices de vegetação, sendo eles: DVI7, PSND, SIPI, SR14, SR15, mND705. Deste modo recomenda-se que, ao utilizar estes índices, estes fatores sejam levados em consideração.

## Referências

BARNES JD, BALAGUER L, MANRIQUE E, ELVIR S, DAVISON AW. A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls *a* and *b* in lichens and higher plants. **Environmental and Experimental Botany**, v. 32, n. 2, p. 85–100, 1992.

BLACKBURN G. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: An evaluation of some hyperspectral approaches. **Remote sensing of environment**, v. 4257, n. 98, p. 273–285, 1998.

BINKOWSKY P. **Conflitos ambientais e significados sociais em torno da expansão da silvicultura de eucalipto na “metade sul” do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, RS: UFRGS, 212 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Rural) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

BRANDELERO C. **Espetro radiometria do visível e infravermelho próximo em povoamento de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden**. Santa Maria, RS: UFSM, 2010. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, RS. 82f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

BRASIL, Ministério da Agricultura. **Divisão de Pesquisas Pedológicas**. Levantamento de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Sul. Recife, 431 p. (Boletim Técnico N° 30), 1973.

BROGE NH, LEBLANC E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. **Remote sensing of environment**, v. 76, n. 2, p. 156–172, 2001.

BUSCHMANN C, NAGEL E. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 4, p. 711–722, 1993.

CHAPPELLE EW, KIM MS, MCMURTREY III JE. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): an algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, and carotenoids in soybean leaves. **Remote Sensing of Environment**, v. 39, n. 3, p. 239–247, 1992.

DALMOLIN RSD, PEDRON FA. Solos do município de Santa Maria. **Ciência & Ambiente**, n. 38, p. 59–78, 2009.

DASH J, CURRAN PJ. The MERIS terrestrial chlorophyll index. **International Journal of Remote Sensing**, v.25, n.23, p. 5403-5413, 2004.

DATT B. Remote Sensing of Chlorophyll *a*, Chlorophyll *b*, Chlorophyll *a + b*, and Total Carotenoid Content in Eucalyptus Leaves. **Remote Sensing of Environment**, v. 66, n. 2, p. 111-121, 1998.

DATT BA. A New Reflectance Index for Remote Sensing of Chlorophyll Content in Higher Plants: Tests using Eucalyptus Leaves. **Journal of Plant Physiology**, v. 154, n. 1, p. 30-36, 1999.

DAUGHTRY C, WALTHALL C. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, n. 2, p. 229-239, 2000.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: EMBRAPA - **Embrapa Produção de Informação**, 1999. 412 p.

ZAVA F, COLOMBO R, BOCCHI S, MERONI M, SITZIA M, FOIS N, ZUCCA C, Identification of hyperspectral vegetation indices for Mediterranean pasture characterization. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 11, n. 4, p. 233-243, 2009.

FERRI CP, FORMAGGIO AR, SCHIAVINATO MA. Avaliação de índices de pigmentos fotossintéticos na estimativa da concentração de clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total e carotenóides nas diferentes fases de desenvolvimento da cultura da soja (*Glycine max* [L], Merrill). **Anais... X SBSR**, Foz do Iguaçu, 2001.

GAMON JA, SERRANO L, SURFUS JS. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. **Oecologia**, v. 112, n. 4, p. 492-501, 1997.

GITELSON AA. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 8, p. L08403, 2005.

GITELSON A, MERZLYAK M. Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll. **Journal of plant physiology**, v. 148, p. 494-500, 1996.

GITELSON A, MERZLYAK MN. Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. Leaves. Spectral Features and Relation to Chlorophyll Estimation. **Journal of Plant Physiology**, v. 143, n. 3, p. 286-292, 1994.

GUYOT G, BARET F. Utilisation de la haute resolution spectrale pour suivre l'état des couverts vegetaux Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing. In: **Proceedings 4<sup>th</sup> International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing**, Aussois, France, ESA SP – 287 (Paris), 18-22 January, p. 279-286, 1988.

GUYOT G, GUYON D, RIOM J. Factors affecting the spectral response of forest canopies: a review. **Geocarto International**, v. 4, n. 3, p. 3–18, 1989.

GURGEL HC, FERREIRA NJ, LUIZ, AJB. Estudo da variabilidade do NDVI sobre o Brasil utilizando-se a análise de agrupamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.1, p.85-90, 2003.

HABOUDANE D, MILLER JR, TREMBLAY N, ZARCO-TEJADA PJ, DEXTRAZE L. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n. 2-3, p. 416–426, 2002.

HANSEN PM, SCHJOERRING JK. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. **Remote sensing of environment**, v. 86, n. 4, p. 542–553, 2003.

HELDWEIN AB, BURIOL GA, STRECK NA. O clima de Santa Maria. **Ciência & Ambiente**, v. 38, p. 43–58, 2009.

JASPER J, REUSCH S, LINK A. Active sensing of the N status of wheat using optimized wavelength combination: impact of seed rate, variety and growth stage. In: E. J. Van Henten, D. Goense, & C. Lokhorst (Eds.). **Precision agriculture'09 Proceedings of the 7<sup>th</sup> European conference on precision agriculture**. Wageningen, The Netherlands: Academic Publishers, July 5-8, p. 23-30, 2009.

JORDAN CF. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, v. 50, n. 4, p. 663–666, 1969.

LIESENBERG V, PONZONI FJ, GALVÃO LS. Análise da dinâmica sazonal e separabilidade espectral de algumas fitofisionomias do cerrado com índices de vegetação dos sensores MODIS/TERRA e AQUA. **Revista Árvore**, v.31, n.2, p.295-305, 2007.

LE MAIRE G. et al. Modeling annual production and carbon fluxes of a large managed temperate forest using forest inventories, satellite data and field measurements. **Tree physiology**, v. 25, n. 7, p. 859–72, 2005.

MCMURTREY JE, CHAPPELLE E, DAUGHTRY C, KALSHOVEN J, CORP L, KIM M. Field canopy and leaf level fluorescence for distinguishing plant condition differences due to nitrogen fertilization level Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. IGARSS'94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation., International. **Anais...IEEE**, 1994.

MOREIRA MA. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2.ed. Viçosa - MG: UFV, 2003. 307 p.

PAIVA YG. **Estimativa do índice de área foliar por métodos óticos e sensoriamento remoto para calibrar o modelo ecofisiológico em plantios de eucalipto em áreas de relevo ondulado**. Viçosa, MG: 63f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

PEÑUELAS J, GAMON JA, FREDEEN AL, MERINO J, FIELD CB.. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen-and water-limited sunflower leaves. **Remote Sensing of Environment**, v. 48, n. ..., p. 135–146, 1994.

PEÑUELAS J, BARET F, FILELLA I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. **Photosynthetica**, v. 31, n. 2, p. 221–230, 1995.

PEZZOPANE JEM. **Caracterização Microclimática, Ecofisiológica e Fitossociológica em uma Floresta Estacional Semidecidual Secundária, em Viçosa, MG**. Viçosa, MG: UFV, 240f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

PINHERIO J, BATES D, DEBROY S, DEEPAYAN S, **R Development Core Team**. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-97, 2010.

RAMOS MFS, SANTOS EP, DELLAMORA-ORTIZ GM. Avaliação da atividade antissolar e estudos preliminares de fotodegradação de própolis. **Revista Fitos**, v. 5, n. 3, p. 73-84, 2010.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing [Internet]**. Vienna (Austria): R Foundation for Statistical Computing, 2013.

READ JJ. et al. Narrow-waveband reflectance ratios for remote estimation of nitrogen status in cotton. **Journal of environmental quality**, v. 31, n. 5, p. 1442–1452, 2002.

RONDEAUX G, STEVEN M, BARET F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, n. 2, p. 95–107, 1996.

ROUJEAN JL, BREON FM. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, n. 3, p. 375–384, 1995.

SCHEPERS JS, BLACKMER TM, WILHELM WW, RESENDE MT. Transmittance and Reflectance Measurements of CornLeaves from Plants with Different Nitrogen and Water Supply. **Journal of plant physiology**, v. 148, p. 523–529, 1996.

SERRANO L, FILELLA I, PENUELAS J. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. **Crop Science**, v. 40, p. 723–731, 2000.

SILVA SDR, FERREIRA AM, LUCENA RL, MARINHO GS. Níveis de insolação no Seridó potiguar e suas implicações: o caso de Caicó-RN. **Revista Geonorte**, v. 2, p. 800-812, 2012.

SIMS DA, GAMON JA. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n. 2-3, p. 337-354, 2002.

SMITH JR. Single color extraction and image query. **Proceedings, International Conference on Image Processing**, v. 3, p. 528-531, 1995.

SOARES TS, CARVALHO RMMA, VALE AB. Avaliação econômica de um povoamento de *Eucalyptus grandis* destinado a multiprodutos. **Revista Árvore**, v.27, n.5, p.689-694, 2003.

STEDDOM K, HEIDEL G, JONES D, RUSH CM. Remote detection of rhizomania in sugar beets. **Phytopathology**, v. 93, n. 6, p. 720-726, 2003.

STROPPIANA D, BOSCHETTI M, BRIVIO PA, BOCCHI S. Plant nitrogen concentration in paddy rice from field canopy hyperspectral radiometry. **Field crops research**, v. 111, n. 1, p. 119-129, 2009.

TUCKER CJ, SELLERS PJ. Satellite remote sensing of primary production. **International Journal of Remote Sensing**, 7, pp. 1395-1416, 1986.

VOGELMANN J, ROCK B, MOSS D. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 8, p. 1563-1575, 1993.

ZARCO-TEJADA PJ, MILLER JR, MOHAMMED GH, NOLAND TL, SAMPSON PH. Scaling-up and model inversion methods with narrowband optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing** v. 39, n. 7, p. 1491-1507, 2001.

XUE Q, WEISS A, BAENZIGER PS. Predicting leaf appearance in field grown winter wheat: Evaluating linear and non-linear models. **Ecological Modelling**, v.175, p.261-270, 2004.