

## **Análise de dados de sensoriamento remoto na estimativa da produtividade e altura final do feijão**

Priscylla Ferraz Câmara Monteiro<sup>1</sup>

Rubens Angulo Filho<sup>2</sup>

Alexandre Cândido Xavier<sup>3</sup>

Rodrigo Otávio Câmara Monteiro<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS  
Faculdade de Agronomia – 91540-000 – Porto Alegre – RS, Brasil  
{pferrazcm}@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade de São Paulo – USP/ESALQ  
Caixa Postal 9 – 13418-900 - Piracicaba – SP, Brasil  
{ruangulo}@esalq.usp.br

<sup>3</sup> Universidade Federal do Espírito Santo – UFES,  
Caixa Postal 16 – 29500-000 – Alegre – ES, Brasil  
{xavier}@cca.ufes.br

<sup>4</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – IFRS  
Av. Osvaldo Aranha 540 – 95700-000 – Bento Gonçalves – RS, Brasil  
{rodrigo.monteiro}@bento.ifrs.edu.br

**Abstract:** The study of the spectral behavior of crops, through field radiometry, contributes to a better precision in models generated by remote sensing, when they are used to estimate analyze crops' agronomic variables. Hyperspectral crop reflectance data are useful for several remote sensing applications in agriculture and can be transformed into vegetation indices that are related with crop biophysical parameters. There is a need for studies to define optimal wavebands to estimate crop biophysical parameters. Among the several developed indices distinguished the narrow-band normalized difference vegetation index (NB\_NDVI). The aim was to analyze the NB\_NDVI to estimate bean grain yield and plant height. Field canopy reflectance measurements were acquired at six bean growth stages over 48 plots with the SPECTRON SE-590 spectroradiometer. Two hundred and fifty two narrow bands between 350 and 1.100 nm with bandwidth of 2,7 nm were used. The experimental design was the randomized blocks, with split plots, with 12 treatments, 4 irrigation levels (179,5; 256,5; 357,5 e 406,2 mm) and 3 nitrogen doses (0; 80 e 160 kg ha<sup>-1</sup>), and four replicates. According to the results, the NB\_NDVI were efficient to estimate plant height and grain yield. During all the crop development, the best correlations between biophysical variables and spectral variables were observed on V4 ( $R^2 = 0.84$ ) and R6 ( $R^2 = 0.86$ ) stages, for grain yield and plant height, respectively.

**Palavras-chave:** Spectroradiometry, hyperspectral data, vegetation indice, espectralradiometria, dados hiperespectrais, índice de vegetação.

## 1. Introdução

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é um dos mais importantes componentes da dieta alimentar do brasileiro, por ser reconhecido como uma excelente fonte de proteínas, além de possuir bom conteúdo de carboidratos, vitaminas, minerais e fibras (Embrapa, 2008). Esta leguminosa, além do papel relevante na alimentação, também tem grande importância econômico-social, devido principalmente à mão-de-obra empregada durante o ciclo da cultura.

Com o avanço da tecnologia os sensores hiperespectrais estão sendo considerados um campo de enorme potencial para os estudos de vegetação, criando novas perspectivas com relação a sua potencialidade na estimativa de variáveis biofísicas. Dentre os vários índices de vegetação desenvolvidos para se relacionar com variáveis biofísicas, destaca-se o índice de vegetação da diferença normalizada de duas bandas estreitas quaisquer (NB\_NDVI; *narrow band-normalized difference vegetation index*) (Thenkabail et al., 2000). Pesquisas vêm sendo realizadas com o intuito de determinar as melhores bandas na estimativa de variáveis biofísicas utilizando-se dados hiperespectrais (Ruiliang Pu et al., 2003). Para determinar as melhores bandas, faz-se o uso da análise de regressão de todas as combinações possíveis entre duas bandas estreitas, de acordo com determinado índice hiperespectral, para se estimar uma determinada variável biofísica. Os resultados são apresentados por meio de mapas mostrando os valores de coeficientes de determinação para cada combinação de banda, sendo então possível escolher as melhores combinações entre bandas estreitas, assim como a largura da banda (Thenkabail et al., 2000).

A presente pesquisa teve por objetivo analisar a relação entre dados de sensoriamento remoto e a produtividade do feijão, assim como com a altura final desta cultura. Os objetivos específicos foram: i) mapear as melhores combinações de reflectância de bandas estreitas que melhor se relacionaram com a produtividade e com a altura final das plantas de feijão, segundo o índice NB\_NDVI; ii) analisar qual o melhor estágio fenológico da cultura do feijão para se estimar a produtividade e a altura final.

## 2. Material e Métodos

Os dados radiométricos e biofísicos foram coletados sobre dosséis de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), num experimento instalado na Fazenda Areão, pertencente ao Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ/USP, localizada no município de Piracicaba, São Paulo, à latitude de 22° 42' 30" S, à longitude de 47° 38' 39" W e à altitude aproximada de 576 m.

O material genético de feijão utilizado foi o cultivar “Pérola” (linhagem LR 720982 CPL 53). O experimento foi conduzido em blocos casualizados 3x4 metros, com parcelas subdivididas, sendo que nas parcelas foram alocados os tratamentos relacionados com os níveis de irrigação (179,5; 256,5; 357,5; e 406,2 mm de água) e nas subparcelas, os tratamentos relacionados às doses de nitrogênio (0, 80 e 160 kg de N ha<sup>-1</sup>), totalizando assim 12 tratamentos em cada bloco. Os tratamentos foram dispostos em quatro blocos (repetições), totalizando 48 parcelas experimentais. As plantas foram cultivadas de setembro a dezembro de 2007. O ciclo compreendeu 102 dias desde a semeadura, realizada no dia 4 de setembro de 2007, até a segunda colheita, realizada no dia 14 de dezembro de 2007. A semeadura foi realizada com aproximadamente 14 sementes viáveis por metro linear e a emergência das plantas ocorreu no dia 10 de setembro de 2007, ou seja, aos seis dias após a semeadura. As linhas de semeadura foram orientadas no sentido norte-sul e o espaçamento utilizado foi de 0,50 m entre linhas. As adubações de Potássio e Fósforo foram de 90 e 100 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

A aplicação de água foi realizada com o auxílio de um sistema de irrigação por aspersão disposto no campo segundo o sistema de “aspersão em linha” (“line source sprinkler system”), de acordo com a metodologia desenvolvida por Hanks et al. (1976). Este sistema consiste na colocação de aspersores em uma única tubulação no centro do campo experimental. Para o controle do manejo da irrigação e da lâmina aplicada foram instaladas baterias de tensiômetros, nas profundidades de 0,15 m e 0,30 m, em cada tratamento de irrigação. Fez-se, ainda, a estimativa da evapotranspiração da cultura para orientar o manejo da irrigação e conhecimento do consumo de água pela cultura, confrontando com a lâmina total aplicada durante o período experimental, em cada nível de irrigação.

A produtividade de grãos e a altura final de plantas foram adquiridas ao final do ciclo da cultura. Para evitar o efeito da bordadura apenas a parte central de cada canteiro foi colhida, eliminando uma linha de cada lado e 0,5 m em cada extremidade, de cada parcela. Deste modo, após a colheita, a produtividade foi obtida a partir da massa de grãos colhidos na área útil da parcela (7,0 m<sup>2</sup>), e posteriormente transformada em kg ha<sup>-1</sup>, corrigida para 12% de umidade. Para estimar a altura final das plantas foram selecionadas três plantas por parcela.

Os dados espectrais foram coletados em seis estádios fenológicos (Tabela 1), por meio do equipamento SPECTRON SE-590 que opera nos comprimentos de onda ( $\lambda$ ) de 350 a 1100 nm. Para cada parcela foram coletados 2 pares de espectros (amostra e referência), ou seja, quatro medidas de radiância, sendo dois da cultura e dois da placa de referência (sulfato de Bário), obtendo-se ao final de cada leitura um fator de reflectância de cada parcela. Estas medidas foram realizadas a uma altura de aproximadamente 3,0 m do dossel e alcance de 0,9 m com um campo de visada instantâneo de 15<sup>o</sup> (IFOV – *Instantaneous Field of View*) o que resultou em uma área amostrada de 0,49 m<sup>2</sup>. As medidas radiométricas foram coletadas entre as 11:00 e 13:00 horas, período em que o solo encontrava-se quase totalmente iluminado possibilitando a leitura das 48 parcelas, que gastava-se em média uma hora e vinte minutos. Os dados originais de reflectância foram agrupados em bandas estreitas de largura de 2,7 nm cada, a partir da média de reflectância dos dados originais, resultando em 252 bandas.

Tabela 1. Período analisado e seu respectivo estágio fenológico

Data da medição	Fase	Estádio	Descrição do estágio fenológico
18/set/2007	Vegetativa	V2	Folhas primárias estiverem completamente desenvolvidas
29/set/2007	Vegetativa	V3	O primeiro trifólio completamente desenvolvido
10/out/2007	Vegetativa	V4	O terceiro trifólio completamente desenvolvido
29/out/2007	Reprodutiva	R6	Abertura da primeira flor
18/nov/2007	Reprodutiva	R8	Primeiras vagens cheias
23/nov/2007	Reprodutiva	R9	Modificação da cor das vagens (maturação fisiológica)
30/nov/2007	Reprodutiva	R9	Taxa de desfolha (maturação de colheita)

\* A descrição de todos os estádios fenológicos refere-se a características observadas em 50 % das plantas

Com o objetivo de verificar se as variáveis comprimento de onda e produtividade estão relacionadas foi realizada a correlação entre elas para todas as datas de coleta.

Para a avaliação da produtividade e da altura final das plantas do feijão foi utilizado o modelo de regressão linear tendo como variável independente NB\_NDVI (Equação 1), que é a diferença normalizada entre duas bandas estreitas quaisquer (Thenkabail et al., 2000).

$$B = a_0 + a_1 NB\_NDVI_{ij}, \text{ em que } NB\_NDVI_{ij} = \frac{NB_i - NB_j}{NB_i + NB_j} \quad (1)$$

em que: B é a produtividade do feijão (kg ha<sup>-1</sup>); NB é a reflectância de cada banda estreita i, j (i=j=1,..., n, sendo n=252, número de bandas estreitas).

Para cada estágio (coleta) foi gerado um mapa de isolinhas de R2 segundo  $\lambda \times \lambda$ , sendo  $\lambda$  o centro do comprimento de onda de cada uma das 252 bandas. Por meio destes dados foram escolhidas as regiões espectrais que apresentaram os melhores resultados, assim como o melhor estágio fenológico, tendo em vista aqueles que geraram os maiores valores de R2 e maior frequência de ocorrência destes valores.

### 3. Resultados

A Figura 1 mostra a correlação entre a reflectância em determinada banda e as variáveis biofísicas (*produtividade* e *altura de plantas*). Tendo como finalidade apresentar a correlação entre as variáveis, *produtividade* e *altura de planta*, e a reflectância durante o ciclo da cultura, cada curva representa uma data de coleta, ou seja, um estágio de desenvolvimento. Nos estádios V3, V4, R6 e R8, para as duas variáveis analisadas, pôde-se observar, na região do visível (400 a 700 nm), com exceção da região do verde (550 nm), que as correlações são negativas, ou seja, à medida que a reflectância aumenta, diminui a variável. A variável *altura de planta* apresentou certa variação no estágio V3, apresentando correlações negativas na região do visível, inclusive na região do verde, diferindo da variável *produtividade*. Pode-se observar que os valores negativos máximos de “r” foram encontrados no estágio R6, sendo estes observados na região do vermelho, no comprimento de onda em torno de 680 nm, o qual representa a máxima absorção de radiação pelos pigmentos fotossintetizantes, como já verificado por Xavier et al. (2006).

Na região do verde, os valores são positivos, pois as folhas refletem um pouco de radiação nesse intervalo de onda. O pico de correlação, nesta região, ocorre no estágio V4 para as duas variáveis analisadas. Já na região do infravermelho próximo, o pico de correlação ocorre no estágio V4 para a variável *altura de planta* e no estágio R6 para a variável *produtividade de grãos*, estádios nos quais as plantas apresentam folhas verdes e saudias, como também maior desenvolvimento foliar. Nos estádios R9-a e R9-b as correlações já são de menor magnitude devido à maturação fisiológica e a senescência.

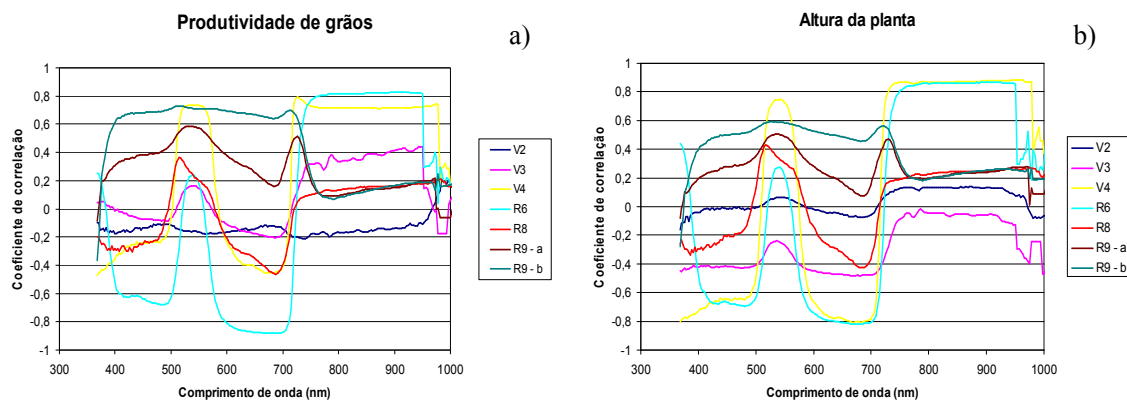


Figura 1. Coeficiente de correlação entre as reflectâncias espectrais de bandas estreitas e: a) produtividade de grãos e b) altura de planta, nos diferentes estádios fenológicos da cultura – Piracicaba, SP, 2007. R9-a (maturação fisiológica); R9-b (maturação de colheita).

Os maiores valores de “r” positivos observados na altura de plantas e na produtividade de grãos, foram nos estádios V4 e R6, com valores de 0,88 e 0,83, respectivamente, indicando uma forte correlação com o comprimento de onda, em torno de 902 nm. Xavier et al. (2006), trabalhando com a cultura do trigo, também observaram que a produtividade da cultura teve uma forte correlação com o comprimento de onda de 902 nm, observando-se o valor máximo

positivo de “r” de 0,72 (estádio espigamento I). Para a variável *altura da planta*, o valor máximo positivo, observado pelos autores, foi de 0,62, no comprimento de onda de 813 nm (fase de alongamento).

De acordo com os resultados apresentados anteriormente, correlações entre as variáveis biofísicas e as reflectâncias nos determinados comprimentos de onda, fica evidente que os maiores valores de “r” foram observados nos estádios V4 e R6. Neste contexto, para a análise das demais variáveis serão apresentados apenas os mapas de isolinhas referentes a estes dois estádios fenológicos.

Na Figura 2, são apresentados os mapas de isolinhas de  $R^2$ , segundo o índice NB\_NDVI, para todas as combinações de bandas estreitas, nos comprimentos de onda  $\lambda_i$  e  $\lambda_j$ , com largura de banda de  $(\Delta\lambda)$  3 nm, na estimativa das variáveis *produtividade* e *altura de plantas* da cultura do feijão com base nas medidas radiométricas obtidas nos diferentes estádios fenológicos. Os resultados dos estádios V2, V3, R8, R9-a e R9-b foram excluídos desta análise por apresentarem baixos valores de  $R^2$  ( $p < 0,05$ ). Esses resultados foram causados, provavelmente, pela baixa resposta espectral da vegetação, comparada à resposta do solo, pois, nesses estádios a quantidade de biomassa verde é baixa e o solo fica mais exposto, tendo grande influência sobre a resposta espectral do dossel. Os gráficos mostram apenas os valores significativos de  $R^2$  ( $p < 0,05$ ). As regiões em branco identificam aquelas em que o NB\_NDVI não teve relação significativa com a determinada variável.

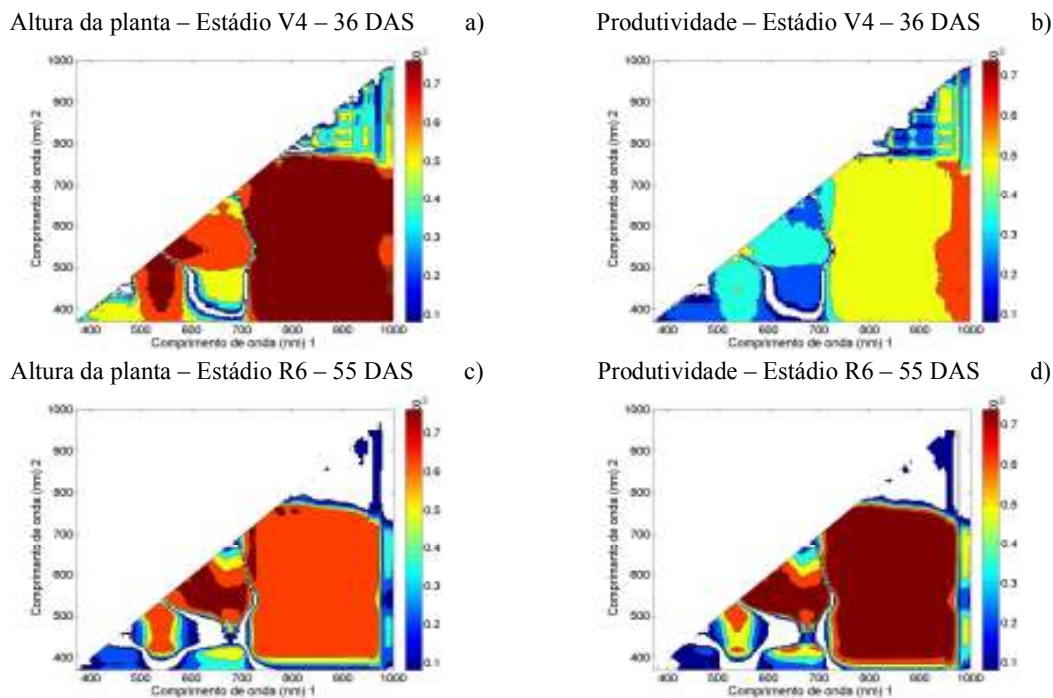


Figura 2. Mapas de isolinhas dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para estimativa da altura de planta (AP) e da produtividade de grãos (PG) do feijão por meio do índice NB\_NDVI, para os diferentes estádios fenológicos V4 (a,b), R6 (c,d). As regiões em branco foram as que não apresentaram correlação ( $R^2 < 0,1$ ) – Piracicaba, SP, 2007.

As diferentes coletas (V4 e R6) permitiram verificar que o estágio V4 apresentou melhores resultados na estimativa da altura da planta (Figura 2a). Os maiores valores de  $R^2$  foram para o NB\_NDVI, calculados com NB1 variando, aproximadamente, de 750 a 950 nm, e NB2, entre 400 e 700 nm. Outra região que apresenta maiores valores de  $R^2$  é NB1,

variando de 500 a 600 nm, além de NB2, variando de 400 a 550 nm, representando a combinação entre bandas do verde e bandas da região do azul e do verde.

Para a estimativa da produtividade, o estágio R6 apresentou melhores resultados (Figura 2d), sendo que os maiores valores de  $R^2$  foram para o NB\_NDVI calculados com NB1 variando, aproximadamente, de 750 a 950 nm e NB2, entre 400 e 700 nm, que representa a combinação entre bandas do visível e do infravermelho próximo. Outra região que apresenta altos valores de  $R^2$  é NB1, variando de 600 a 700 nm, além de NB2, variando de 500 a 600 nm, combinação entre bandas do vermelho e bandas da região do verde.

A Tabela 2 apresenta os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) da relação entre as variáveis biofísicas e o índice NB\_NDVI, nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura.

Tabela 2. Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e comprimento de onda (nm) da relação entre as variáveis biofísicas (altura da planta e produtividade de grãos) e o índice NB\_NDVI nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura – Piracicaba, SP, 2007.

Variável dependente	Estádio	Variável independente (NB_NDVI)				$R^2$
		V (400 a 700 nm)		IVP (701 a 950 nm)		
Altura	V2	469	483	-	-	0,28
	V3	-	-	753	762	0,44
	V4	-	561	732	-	<b>0,86</b>
	R6	593	608	-	-	0,81
	R8	533	550	-	-	0,57
	R9	-	-	829	839	0,46
	R9	-	-	792	810	0,40
Produtividade	V2	425	435	-	-	0,32
	V3	404	433	-	-	0,42
	V4	-	-	762	783	0,63
	R6	-	-	759	765	<b>0,84</b>
	R8	-	-	792	823	0,62
	R9	-	-	829	839	0,62
	R9	539	-	726	-	0,60

Os melhores valores de  $R^2$ , em todo o desenvolvimento da cultura, foram observados nos estádios V4 e R6, de acordo com a variável analisada (Tabela 2). As únicas relações entre NB\_NDVI e as variáveis biofísicas que não foram significativas, no nível de 5%, foram as referentes ao estágio V2. Resultados similares foram observados, por Xavier et al. (2006), na cultura do trigo, em que o estágio espigamento I foi o que melhor estimou a altura e a produtividade de grãos, pois, corresponde ao período de pleno desenvolvimento vegetativo da cultura e, os estádios afilhamento e maturação, foram os que apresentaram menores valores de  $R^2$ , que correspondem aos períodos de início e fim do desenvolvimento da cultura.

O índice NB\_NDVI foi capaz de explicar em 86% e 84%, a variação da altura da planta e da produtividade de grãos, respectivamente (Tabela 2). Os melhores resultados foram observados nas bandas da região do visível, para a variável *altura da planta*, e na região do infravermelho próximo, para a variável *produtividade de grãos*. Como se esperava, as relações entre o índice de vegetação e a variável *produtividade* foram positivas, respondendo esses índices crescentemente à biomassa verde, que, por sua vez, está associada positivamente à produtividade (Asrar et al., 1984).

#### 4. Conclusões

Para este trabalho, as regiões espectrais com maior potencial para serem utilizadas no modelo NB\_NDVI, na estimativa da produtividade e da altura da planta, foram as regiões do verde e do infravermelho próximo. Dentro destas faixas espectrais, as melhores combinações de bandas, na estimativa da altura de plantas e da produtividade de grãos, foram 561 e 732 nm; 759 e 765 nm, respectivamente.

Durante todo o desenvolvimento da cultura, as melhores correlações entre as variáveis biofísicas (altura de plantas e produtividade de grãos) e o índice NB\_NDVI foram observadas nos estádios V4 e R6, constituindo-se, portanto, estes os melhores estádios para monitorar espectralmente a cultura.

#### Referências Bibliográficas

Asrar, G.; Fuchs, M.; Kanemasu, E.T.; Hatfield, J.L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 76, p. 300-306, Jun. 1984.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Disponível em:  
<[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia4/AG01/arvore/AG01\\_2\\_28102004161635.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia4/AG01/arvore/AG01_2_28102004161635.html)>. Acesso em: 25 set. 2008.

Hans, R. J.; Keller, J.; Rasmussen, V. P.; Wilson, G. D. Line source sprinkler for continuous variable irrigation crop production studies. **Soil Science Society of America Journal**, v.40, p.426-429, 1976.

Ruiliang Pu, P. G.; Biging, G. S.; Larrieu, M. R. Estimation of forest leaf area index using vegetation indices derived from Hyperion hyperspectral data. **IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, p. 1355-1362, 2003.

Thenkabail, P.S.; Smith, R.B.; De-Pauw, E. Hyperspectral vegetation indices for determining agricultural crop characteristics. **Remote Sensing of Environment**, v.71, p.158-182, 2000.

Xavier, A.C.; Rudorff, B.F.T.; Moreira, M.A.; Alvarenga, B.S.; Freitas, J.G.; Salomom, M.V. Hyperspectral field reflectance measurements to estimate wheat grain yield and plant height. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 2, p. 130-138, 2006.