
IMAGENS LANDSAT PARA MAPEAMENTO DE VARIABILIDADE DE PRODUTIVIDADE DE SOJA E MILHO EM AGRICULTURA DE PRECISÃO

Renata Cilene Dainese¹, Maurício Alves Moreira², José Paulo Molin³

Resumo

O conhecimento da variabilidade espacial da produtividade de um talhão agrícola é uma das informações mais importantes nos sistemas de gerenciamento da produção. Porém, as técnicas convencionais para mensurar essa variabilidade, dentro dos princípios de Agricultura de Precisão (AP), não têm demonstrado serem satisfatórias, principalmente para grandes propriedades agrícolas. Entre as diferentes alternativas, o Sensoriamento Remoto (SR) tem se mostrado como uma das técnicas mais promissoras, porém ainda carente de desenvolvimento. Desta forma, o objetivo principal deste trabalho foi o de explorar o potencial de imagens multiespectrais orbitais de média resolução espacial, aqui representadas pelos sensores TM e ETM⁺ a bordo dos satélites Landsat 5 e 7, respectivamente, para obter mapas de variabilidade de produtividade das culturas de milho e soja. Para tanto, foi realizada a análise de regressão múltipla entre os dados e estabelecida uma metodologia para gerar zonas de variabilidade de produtividade, chamada Mapa de Variações. Nas análises de regressão entre os mapas de produtividade, obtidos em campo por meio de colhedoras equipadas com monitores, e os valores de reflectância das imagens, os valores de correlação encontrados foram baixos. Por outro lado, foi possível observar nos Mapas de Variações uma tendência de concordância das zonas de reflectância com as zonas de anormalidade de produtividade, demonstrando o potencial dessa metodologia para a definição de zonas de manejo. Desta forma, pode-se verificar que o SR é potencialmente uma importante fonte de dados para a AP, que pode suprir algumas das necessidades deste sistema, desde que com técnicas adequadas e um detalhado trabalho de campo, principalmente para grandes áreas, ou onde dados de monitoramento de colheita não estão disponíveis.

Palavras-Chave: sensoriamento remoto; mapa de variações

LANDSAT IMAGES FOR MAPPING SOYBEAN AND CORN YIELD VARIABILITY IN PRECISION AGRICULTURE

Abstract

The knowledge of space variability of yield is one of the most important in the management information production systems. However, conventional techniques for measuring such variability, with the principles of Precision Agriculture, have not demonstrated to be satisfactory, mainly for large farms. Among different alternatives,

¹ - Eng. Agrônoma, Doutora em Sensoriamento Remoto pelo INPE; Pesquisadora da Louis Dreyfus – Coinbra S/A – Av. Brigadeiro Faria Lima, 1355 – Pinheiros – São Paulo, SP; daineser@ldcorp.com.br.

² - Doutor; Pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE – São José dos Campos – SP; mauricio@dsr.inpe.br

³ - Doutor; Professor do Depto de Engenharia Rural da ESALQ/USP – Piracicaba – SP; jpmolin@esalq.usp.br

Remote Sensing has shown to be one of the most promising techniques, however still under development. Considering it, the main objective of this work was to explore the potential of orbital multispectral images of average space resolution, obtained with the sensors TM and ETM+ on board the satellites Landsat 5 and 7, respectively, aiming at the attainment of maps of corn and soybean yield variability. A multiple regression was carried out and established a methodology of generation of yield variability zones, call Variations Map. Regression analyses were established between yield maps generated by yield monitors on the combines, and the values of reflectance of each canal of the sensor and vegetation index. The correlation values were low, with highest values corn and with the application of the GNDVI. On the other hand, it was possible to observe a trend where reflectance zones followed the zones of yield abnormality using the methodology of Variations Maps, demonstrating the potential of this methodology for the definition of management zones. It can be observed that Remote Sensing is potentially an important source of data for Precision Agriculture, being able to supply with adequate techniques and detailed field work, some of the necessities of the system, mainly for large areas, or where yield maps are not available.

Keywords: remote sensing; variation maps.

Introdução

A principal informação aguardada por todo produtor, durante o ciclo das culturas agrícolas, acontece exatamente no último momento, ou seja, durante a colheita. Esta informação, a produtividade da cultura, é conhecidamente uma função de inúmeros fatores químicos, físicos, fisiológicos tanto da planta como do solo e do microclima, onde a cultura se desenvolveu.

Diante de tantos fatores que podem influenciar esta informação final, seria candura pensar que um talhão pode ser totalmente homogêneo. A heterogeneidade, ou variabilidade espacial da produtividade da cultura, dentro de uma área de produção agrícola, é um fato.

Esta variabilidade espacial pode ser medida atualmente pelos inúmeros equipamentos desenvolvidos para tal fim, dentro dos princípios da Agricultura de Precisão (AP). Alguns modelos de sensores e monitores de produtividade são encontrados comercialmente, onde a observação dos mapas de produtividade obtidos torna-se essencial para a análise e diagnóstico dos fatores que estão afetando a produtividade, como fertilidade do solo, pragas e doenças, e para a tomada de decisão para as possíveis intervenções a serem realizadas. Segundo Chung et al. (1993), mapas de produtividade fornecem elementos básicos de entrada no balanço de nutrientes e na avaliação de manchas de fertilidade, o que permite organizar o campo em zonas específicas de manejo, permitindo uma eficiência no controle de todo o sistema.

Apesar de estes equipamentos fornecerem dados que possibilitem observar, investigar e intervir nas causas da variabilidade espacial de produtividade das culturas, são restritos à área potencial de colheita de uma máquina. Ou seja, tais informações ficam restritas à área colhida com máquinas equipadas por tais sensores, não podendo ser extrapoladas a áreas vizinhas, além de serem adquiridas num aspecto tardio, sem a possibilidade de intervenção na cultura durante a própria safra.

Com os avanços observados nas pesquisas e nos equipamentos lançados na área de Sensoriamento Remoto (SR), surgem ferramentas potenciais para completar as informações da variabilidade espacial de produtividade. Uma das contribuições dos produtos de sensores remotos é a possibilidade de aquisição de dados sobre grandes áreas e gerar informações em um tempo hábil, para a intervenção, se necessário.

Dados de SR, como as fotografias aéreas, imagens de satélite e radiometria de campo, podem fornecer informações mais precisas da variabilidade do campo, pois apresentam potencial para o monitoramento de parâmetros biofísicos ligados à produtividade ao longo de todo o ciclo da cultura (Yang et al., 2001). No entanto, as imagens de satélite de média resolução espacial apresentam um maior potencial para grandes áreas agrícolas, por causa da grande área imageada e do baixo custo na obtenção das informações, quando comparado com fotografias aéreas ou radiometria de campo.

Apesar de algumas barreiras ainda impostas, como o alto custo das imagens adquiridas por sensores de alta resolução espacial, a periodicidade na aquisição das imagens e, principalmente, a conscientização do potencial de uso de tais informações para a agricultura brasileira, algumas pesquisas têm incentivado a continuidade no desenvolvimento da área. Nesse sentido, o uso de imagens obtidas por sensores de média resolução espacial, como as do Landsat-TM, do CBERS-CCD, entre outras, deve ser explorado por duas razões: as imagens têm custo reduzido e os satélites possuem regularidades temporais.

Numerosos estudos relatam, por exemplo, o emprego de índices de vegetação, obtidos pela razão da reflectância nas bandas do vermelho e do infravermelho para estimar vigor vegetativo e condições da cultura e biomassa. Entre eles pode-se citar os trabalhos de Dusek et al. (1985), Gardner et al. (1985), Boatwright et al. (1988), Jasinski (1990), entre outros.

Quanto à variabilidade da produtividade, Senay et al. (1998) obtiveram boas correlações entre dados obtidos na colheita e dados de SR. Esse resultado, segundo os autores, demonstrou o potencial do SR para estudos de variabilidade espacial de culturas agrícolas. No trabalho elaborado por Yang et al. (2001), foram sugeridas formas de integrar imagens multiespectrais, observações de campo, dados obtidos por GPS, Sistema de Informação Geográfica (SIG), e processamento de imagens para mapeamento de variabilidade espacial em crescimento e produtividade de culturas.

Desta forma, este trabalho objetivou explorar o potencial das imagens multiespectrais adquiridas pelos sensores TM (Thematic Mapper) e ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) a bordo dos satélites Landsat 5 e 7, respectivamente, para obter mapas de variabilidade de produtividade das culturas de milho e soja visando à definição de zonas menos heterogêneas em um sistema de AP.

Material e Método

Áreas de estudo

Para o estudo, foram selecionadas áreas de cultivo agrícola localizadas em duas regiões distintas quanto a clima, tipo de solo e sistema de manejo. A primeira região localiza-se no centro-oeste do Estado de São Paulo, no município de Campos Novos Paulista – SP. As áreas dos talhões são de 22,2 ha (Talhão A) e 70,4 ha (Talhão B). O talhão B foi cultivado com milho no ano safra de 2001/2002 e o A com soja na safra de

2000/2001. A classe de solo local é Latossolo Vermelho-Escuro, o sistema de manejo é o tradicional com rotação de culturas em semeadura direta, e os talhões apresentam pouca heterogeneidade de variabilidade de produtividade. É comum a prática de dois ciclos agrícolas por ano. Na estação de verão a principal espécie cultivada é a soja, com menor destaque para o milho, utilizado em rotação com a soja.

A segunda região localiza-se nos Campos Gerais, a Leste do Estado do Paraná, na área de ação da Fundação ABC, instituição criada e mantida pelos produtores da região através das cooperativas Arapoti, Castrolanda e Batavo.

Nesta região foram selecionados quatro talhões (Talhão C, D, E e F), localizados nos municípios de Carambeí e Castro, cultivados com milho e soja nas safras 00/01 e 01/02. O tipo de solo foi variado para os diversos talhões e o sistema de manejo é a semeadura direta em todos os talhões. As variedades de milho e soja dentro do talhão são as mesmas, porém variam de talhão para talhão. A variabilidade de produtividade é grande dentro dos talhões.

Imagens de satélite

As imagens utilizadas neste estudo são dos satélites Landsat 5, sensor TM, e Landsat 7, sensor ETM⁺, na órbita-ponto 221/76 para a Área 1 e 221/77 para a Área 2. Na Tabela 1, estão contidas algumas informações para cada um dos talhões selecionados, tipo de cultura, safra, data de passagem do satélite (data da cena) e o tipo de sensor.

Tabela 1 - Resumo das áreas de estudo e cenas Landsat adquiridas.

Área	Localização	Talhão	Cultura	Safra	Data Cena	Sensor
1	Campos Novos Paulista - SP	A	Soja	00/01	01/01/01	TM
					17/01/01	TM
		B	Milho	01/02	09/11/01	ETM ⁺
					27/12/01	ETM ⁺
2	Campos Gerais - PR	C a F	Soja	00/01	05/02/02	TM
					17/01/2001	TM
					26/02/2001	ETM ⁺
					06/03/01	TM
		C e D – Soja E e F – Milho	Milho/Soja	01/02	09/11/01	ETM ⁺
					19/12/2001	TM
					05/02/02	TM
					09/03/02	TM
					17/03/2002	ETM ⁺

Sistema de Informação Geográfica

Para tratamento das imagens de satélite, bem como cadastramento e obtenção de cruzamento de dados obtidos de diferentes fontes, o SIG utilizado foi o SPRING - Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas, na versão 4.1, desenvolvido no INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais em conjunto com a EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Câmara et al., 1996).

Filtragem dos dados de produtividade

Os dados de produtividade das culturas obtidos pelos monitores instalados nas colhedoras foram previamente filtrados, segundo a metodologia proposta por Molin e Menegatti (2002).

Importação dos dados para o sistema

Os dados filtrados de produtividade foram inicialmente importados pelo SIG SPRING como amostras “3D”, em categorias numéricas (10 x 10m), as quais foram posteriormente interpoladas pelo método da Média Ponderada, agregados para a mesma resolução espacial da imagem (30 x 30m). Apesar de se perderem informações de produtividade com a interpolação, essa foi necessária para a realização da análise de regressão.

As imagens foram georeferenciadas, importadas pelo SPRING e empregou-se a metodologia de transformação radiométrica proposta por Luiz et al. (2003). Depois de realizados os procedimentos de registro e transformações radiométricas, foi aplicado o processamento de razão entre bandas, ou seja, NDVI¹ e GNDVI².

Análise de Regressão

Para cada parâmetro em estudo, ou seja, cada banda ou índice de vegetação, foi realizada a análise de regressão simples com os valores de produtividade, a fim de verificar o melhor ajuste da linha de tendência.

Os melhores modelos de regressão foram obtidos tomando como base a análise dos melhores coeficientes de determinação (r^2), através da metodologia de análise do gráfico de dispersão dos r^2 e da permutação dos parâmetros de análise no modelo.

Mapa de Variações

Devido ao enfoque dado pela AP à variabilidade espacial da produção e dos fatores a ela relacionados, foi desenvolvido um método de análise espacial das informações agrícolas para posterior correlação dos dados. Assim, a partir dos estudos realizados por Aguiar et al. (2004) e Dainese et al. (2004), foi desenvolvido um procedimento para identificar áreas com variações especiais (de produtividade e de resposta espectral), segundo o critério de Controle Estatístico de Processos, a partir dos valores de produtividade adquiridos em campo durante a colheita e dos valores de reflectância coletados na imagem. Essa identificação de áreas de variações auxiliou, além disso, no desenvolvimento de um método para gerar zonas homogêneas dentro dos talhões.

¹ $NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V}$, sendo IVP a reflectância na banda do infravermelho próximo (760 a 900 nm) e V a reflectância na banda

do vermelho (630 a 690 nm), no caso dos sensores TM e ETM+ do Landsat 5 e 7, respectivamente.

² $GNDVI = \frac{IVP - G}{IVP + G}$, sendo que G é a reflectância na banda do verde.

Este critério fundamentou-se na correlação espacial entre os valores de produtividade, onde a área com variações especiais é considerada como uma região de um talhão agrícola com características diferentes da média encontrada no talhão, circundada por n regiões similares. Esta região, formada por células de resolução espacial pré-definida, por exemplo, apresenta valores de produtividade acima (potencial) ou abaixo (problema) da média dos valores apresentados no talhão, o que resultou em um mapa de zonas homogêneas, denominado de *Mapa de Variações*.

Depois de várias análises preliminares, chegou-se à conclusão que 20 vizinhos foi a melhor vizinhança para avaliar a variabilidade espacial, ou seja, a que representava um número maior de zonas homogêneas. A figura 1 apresenta um esquema da vizinhança no centro do talhão, com 20 vizinhos, e exemplos das possíveis vizinhanças de borda. Os grupos com menor número de vizinhos são considerados para os valores de bordas em talhões assimétricos.

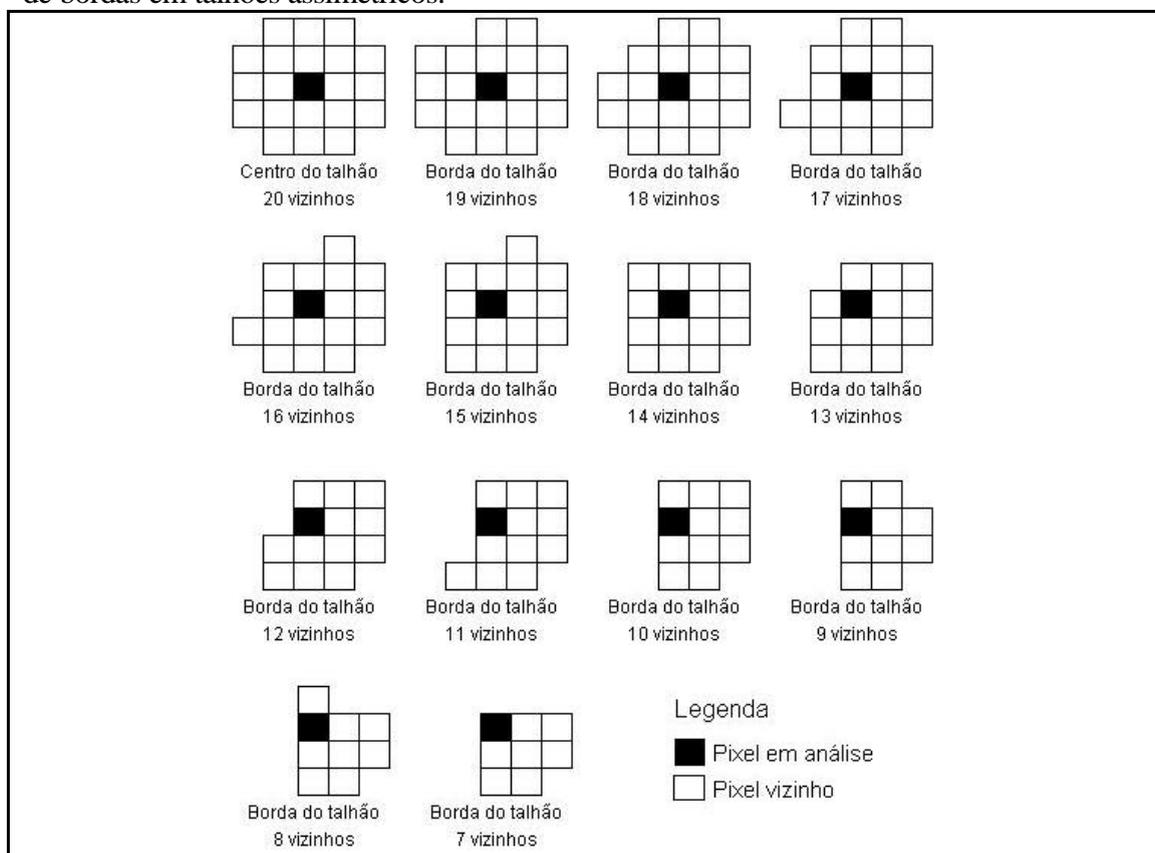


Figura 1 – Esquema de vizinhança apresentando os 20 pixels vizinhos do pixel em análise, encontrados geralmente no centro do talhão, e a redução do número de vizinhança nas bordas de talhões assimétricos.

No final dos processamentos e da série de cálculos, são gerados mapas de zonas homogêneas de produtividade e de resposta espectral, de acordo com a correlação espacial dos dados, os Mapas de Variações.

No resultado final é gerada uma matriz de valores 1, -1 e 0, como pode ser visto na Figura 2. Foram atribuídos tons de cinza para as células.

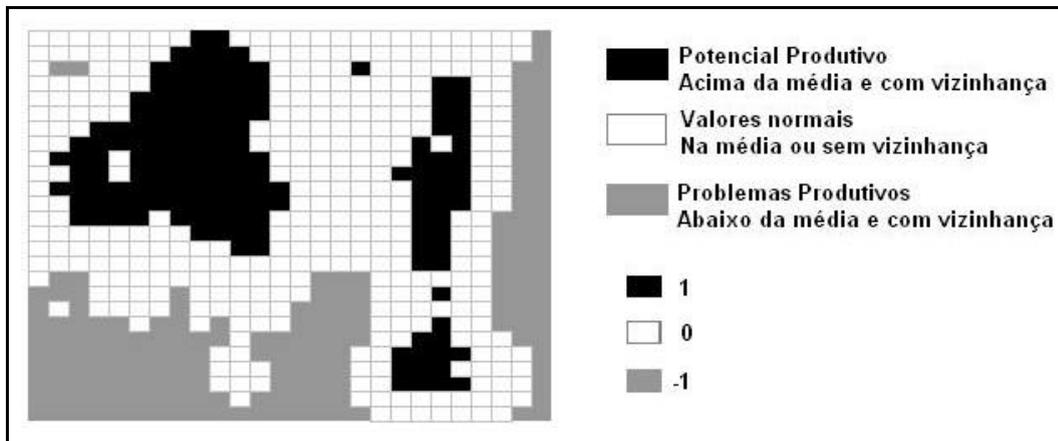


Figura 2 – Mapa de Variações de Produtividade resultante da planilha de cálculos da metodologia estabelecida para geração de zonas homogêneas.

Pode-se observar que 1 é o pixel de alta produtividade (ou alto valor de reflectância), ou seja, pixel com valor acima da média do talhão, com 20 vizinhos de valores similares; -1 é o pixel de baixa produtividade, ou seja, pixel com valor abaixo da média do talhão e com 20 vizinhos de valores similares. Zero (0) são os pixels que estão na média ou que estão acima ou abaixo da média, mas não possuem 20 vizinhos com valores similares (levando em consideração que nas bordas o número de vizinhos aceitável é menor).

Para efeito de comparação dos Mapas de Variações de Produtividade com os Mapas de Variações Espectrais, foi utilizado um procedimento de comparação de semelhanças.

Resultados e Discussão

Correlação da produtividade com a resposta espectral das imagens

A análise de regressão múltipla foi gerada para 25% dos pixels da imagem reflectância e dos pixels de produtividade contidos nos talhões analisados, conforme sugerido por Gopala Pillai e Tian (1999), a fim de ser retirada a correlação espacial existente entre pixels vizinhos. Os autores observaram que as correlações apresentam uma melhor significância estatística quando os valores analisados dentro dos talhões são considerados nesta porcentagem.

A Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados da análise de regressão gerada a partir das informações de produtividade de cada talhão com os dados de resposta espectral das imagens orbitais, para todas as datas de aquisição das cenas.

Tabela 2 – Equações de regressão e coeficientes de determinação (r^2) e de correlação (r) resultantes da Análise de Regressão Múltipla gerados entre os valores de produtividade e de reflectância, para cada talhão e em cada data analisada.

Talhão	Cultura	Safra	Data	Equação de regressão	r^2	r
A	Soja	00/01	01/01/01	Sem significância estatística	-	-
			17/01/01	Sem significância estatística	-	-
B	Milho	01/02	09/11/01	$y = -8,06B5 + 0,104B4^2 - 32,7B4 + 8721,1$	0,3	0,5
			27/12/01	$y = 10647,1GNDVI - 21614B4 + 6830,6$	5	9
		00/01	17/01/01	$y = 91,7GNDVI^2 - 11447,2B2^2 + 1207,2B2 - 12,6B5 - 23,9B4 - 79,8$	0,2	0,5
			26/02/01	$y = -116,3B5^2 - 10768,4B2^2 + 51,1B5 + 1763,4B2 - 74$	8	3
C	Soja	00/01	06/03/01	$y = -2197,2B3^2 + 159,0GNDVI - 97,0NDVI - 37,8B4 + 431,7B2 - 42,7$	0,2	0,4
			19/12/01	$y = 119,27B7^2 + 2,87$	0	4
		01/02	05/02/02	$y = -590,1GNDVI^2 - 42414,1B1^2 + 933,2GNDVI - 34,5NDVI + 6850,7B1 - 612,6$	0,2	0,4
			09/03/02	Sem significância estatística	2	7
		17/03/02	$y = 13,30GNDVI^2 + 527,7B2^2 - 5,57$	0,3	0,5	
		00/01	26/02/01	$y = 416,2GNDVI^2 - 561,7GNDVI + 193,3$	2	6
			06/03/01	$y = -15157,1B1^2 + 3838,9B1 - 239$	0,1	0,3
			19/12/01	$y = -456,8B4^2 + 7,46B5 + 247,47B4 - 31,64$	0,1	0,4
09/03/02	$y = 4,23B4 - 0,31$		5	8		
D	Soja	01/02	17/03/02	$y = 23,39NDVI + 89,35B3 - 19,7$	0,1	0,4
			17/01/01	$y = -64059B4^2 + 557533GNDVI + 1536261B2 - 523763$	6	0
		00/01	26/02/01	Sem significância estatística	0,1	0,3
			06/03/01	Sem significância estatística	8	3
E	Milho	01/02	09/11/01	$y = -97738B3 - 1692327B2 + 15741$	-	-
			19/12/01	$y = -108020B7 + 10627$	0,3	0,6
		00/01	26/02/01	$y = -2135654B5^2 + 1056197B5 - 3508B3 - 125033$	9	2
			06/03/01	$y = 330952NDVI^2 - 165423B4 + 12032748B3 - 162327$	0,2	0,5
F	Milho	01/02	09/11/01	$y = 105184,1B7 - 55778,8B5 + 14823,6$	9	4
			19/12/01	Sem significância estatística	0,2	0,4
		00/01	06/03/01	Sem significância estatística	3	8
			05/02/02	Sem significância estatística	-	-

* B corresponde à banda do sensor

As equações de regressão foram diferentes para cada data e para cada banda dos sensores, assumindo sempre o melhor ajuste da linha de tendência e o conjunto de dados que formaram o melhor modelo, com o maior valor de coeficiente de determinação (r^2) e significância em todos os dados.

Pode ser observado que os valores de r e r^2 foram baixos em todas as datas analisadas, sendo mais baixos que os resultados relatados por alguns autores como Yang et al. (2004a) que, comparando bandas de uma câmera hiperespectral com mapa de produtividade de grãos de sorgo, encontraram $r^2=0,68$ a $0,82$ para cinco significantes bandas; Yang et al. (2004b), que observaram que os modelos de regressão a partir dos canais de uma câmera hiperespectral explicaram 61% e 69% da variabilidade de produtividade de algodão em dois campos analisados; Araújo et al. (2004), que encontraram coeficiente de correlação de até $0,82$ entre o NDVI, obtido por videografia, e a cultura do trigo; Leon et al. (2003), que encontraram 68% a 87% de correlação entre o mapa de produtividade de algodão e alguns índices de vegetação obtidos pela razão de canais de uma câmera digital aerotransportada; Yang et al. (2001), que encontraram 87% de correlação entre o NDVI e a produtividade de grãos de milho; Shanahan et al. (2001), que encontraram altas correlações entre o GNDVI e a produtividade de milho nas safras de 98 ($r^2=0,70$) e 99 ($r^2=0,92$). Porém estes trabalhos, em sua maioria, analisavam imagens de altas resoluções espaciais e/ou espectrais, e na maioria dos casos a produtividade era obtida por parcelas, não espacializada como no trabalho aqui realizado.

Os resultados obtidos nesse trabalho se assemelham aos resultados obtidos por Dobermann e Ping (2004), que compararam mapas de produtividade de milho e soja com índices de vegetação obtidos a partir de imagens IKONOS; Rudorff et al. (2003), que analisaram a correlação de NDVI com produtividade por meio de espectralradiometria, Araújo et al. (2001) e Staggengborg e Taylor (2000), utilizando fotografias aéreas e Thenkabail et al. (1994), que analisaram imagens Landsat TM.

Segundo Macedo e Rudorff (2003), o NDVI pode ter boa relação com baixos níveis de produtividade de milho mas em níveis mais altos ($>5 \text{ ton.ha}^{-1}$) esta relação pode não existir, pelo menos em condições de clima tropical, onde a radiação não é fator limitante para atingir alta produtividade. Esta afirmação tem por base a alta relação existente entre o NDVI e a fração da radiação incidente absorvida pela cultura (Asrar et al., 1984 e Daughtry et al., 1992).

Pode-se observar na Tabela 3, que apresenta os valores de produtividade (Máximo, Mínimo e Médio) encontradas em cada um dos talhões analisados, que para quase todos os talhões, com exceção do talhão A, encontram-se valores médios de produtividade muito altos, quando comparados aos valores de produtividade média nacional.

Essa observação vem a concordar com Rudorff et al. (2003), que identificando que o NDVI não se correlacionou com a produtividade de grãos concluíram que em parte pode ser atribuído ao alto nível de produtividade obtida, entre 5 e 10 ton.ha^{-1} . Isto pode ser observado principalmente no Talhão F, para a safra de milho 01/02. Como pode ser visto na Tabela 3, o Talhão F possui em média uma produtividade (10 ton. ha^{-1}), bastante elevada para os padrões nacionais.

Tabela 3 – Valores de produtividade máximo, mínimo e médio para cada talhão em cada safra analisada.

Talhão	Safra	Cultura	Produtividade (ton/ha)			Média Nacional*
			Máximo	Mínimo	Média	
A	00/01	soja	3,16	1,40	2,21	2,6
B	01/02	milho	7,15	3,66	5,59	3,36
C	00/01	soja	5,12	1,72	3,65	2,6
	01/02	soja	6,02	1,70	3,61	2,6
D	00/01	soja	6,42	1,40	4,07	2,6
	01/02	soja	6,62	1,49	3,94	2,6
E	00/01	soja	4,22	1,79	3,49	2,6
	01/02	milho	14,87	5,19	9,76	3,36
F	00/01	soja	4,07	2,38	3,45	2,6
	01/02	milho	12,40	6,89	10,41	3,36

* Fonte: BDT (2005).

Além disso, observando a Tabela 2, nota-se que não houve significância estatística da correlação entre os dados de produtividade e reflectância nas fases mais tardias, para o Talhão F. Nesta situação é provável que ocorreu uma saturação do NDVI em função do elevado IAF, o que vem a concordar com Myers (1970), que analisou uma tendência de saturação do IAF do milho com o acréscimo de folhas. O constante incremento do IAF provoca um aumento da reflectância na porção do infravermelho próximo por causa do efeito aditivo da energia refletida pelas várias camadas de folhas. No entanto, no milho a partir do IAF 3, observa-se uma tendência de saturação a novos incrementos de IAF e a reflectância na porção do infravermelho próximo deixa de ser proporcional ao IAF, praticamente saturando quando o mesmo se aproxima do valor 8.

Por outro lado, deve ser considerado que a cultura do milho, devido à sua arquitetura, apresenta, na reflectância do dossel, uma maior contribuição da reflectância do solo.

Levando em consideração as melhores correlações, pode-se observar na Tabela 2 que as maiores correlações foram encontradas para a cultura do milho, ou seja, um maior coeficiente de correlação para a safra 00/01 dos talhões B (09/11/01 – $r=0,59$) e E (09/11/01 e 19/12/01, ambos com $r=0,62$). Todas as datas analisadas para estes talhões, corresponderam à época de desenvolvimento vegetativo da cultura do milho. Porém, observa-se que não foram constantes as bandas, inseridas nos respectivos modelos, de maior coeficiente de correlação para estes talhões nas datas analisadas.

Observou-se que o GNDVI foi o índice de vegetação com melhor correlação com a produtividade, o que vem a concordar com alguns autores, como Gitelson et al. (1996), Shanahan et al. (2001) e Staggenborg e Taylor (2000). Principalmente com este último trabalho que, apesar de os autores terem encontrado baixas correlações dos valores de produtividade com a reflectância analisada nos dados obtidos por uma câmera de 35 mm, com filme infravermelho e filtros apropriados, encontraram o valor mais alto sendo o de 40% de correlação entre o GNDVI e a produtividade do milho.

As baixas correlações encontradas para a cultura da soja podem ser explicadas pelo fato de que a quantidade de biomassa ou o maior desenvolvimento vegetativo nesta

cultura não é sinônimo de produção de grãos, como visto em campo, principalmente se houver falta de chuva no período de enchimento de grãos, diferentemente do que acontece com a cana-de-açúcar, onde a produtividade é a própria biomassa. A análise deste trabalho foi realizada exclusivamente comparando-se quantidade de grãos (Mapa de Produtividade) com a reflectância da biomassa.

A baixa resolução espacial das imagens utilizadas foi um ponto de merecida atenção no tocante às baixas correlações encontradas. A resolução da imagem não permitiu a visualização de manchas de alto contraste de reflectância dentro dos talhões. A necessidade da interpolação dos valores de produtividade para a mesma resolução da imagem (30m) aparentemente gerou a perda de informação destes contrastes também nos valores de produtividade.

Análise da semelhança da produtividade com a resposta espectral observada nas imagens orbitais por meio dos Mapas de Variações

A Tabela 4 apresenta os Mapas de Variações adquiridos para os valores de produtividade e de reflectância espectral das culturas de milho e soja, para as bandas do sensor ou índice de vegetação, que apresentaram a maior porcentagem de semelhança na comparação temática desses mapas, bem como o mapa resultante dessa semelhança, para cada talhão em cada data de aquisição das cenas.

Os Mapas de Variações de Reflectância e de Produtividade são separados em três classes distintas, Alta, Média e Baixa, segundo a proposta sugerida neste trabalho. As zonas de Alta Produtividade ou Alta Reflectância (cor preta na legenda) referem-se ao pixel, ou conjunto de pixels, com valor acima da média de produtividade ou reflectância do talhão e com 20 vizinhos de valores também acima da média. As zonas de Baixa Produtividade ou Baixa Reflectância (cor cinza na legenda) são representativas de pixel, ou conjunto de pixels, que apresentou baixa produtividade ou baixa reflectância, ou seja, com valor abaixo da média do talhão e com 20 vizinhos de valores similares. Produtividade Média ou Reflectância Média (todos os outros pixels em branco) são as zonas onde os pixels têm valores iguais ao valor médio de produtividade ou reflectância do talhão, ou o pixel possui valor acima ou abaixo da média, mas não possuem 20 vizinhos com valores similares (levando em consideração que nas bordas o número de vizinhos aceitável é menor, conforme pode ser visto na Figura 1).

Para a legenda do mapa resultante da Análise Comparativa, foi atribuída a cor cinza para as áreas que possuem Semelhança Positiva entre os dois Mapas de Variações e cor cinza com tracejado em preto para as áreas com Semelhança Negativa. Os valores de semelhança positiva são indicativos, por exemplo, de que uma porcentagem de pixels de alta produtividade coincide com pixels de alta reflectância, ou que uma porcentagem de pixels de baixa produtividade coincide com pixels de baixa reflectância. Os valores de semelhança negativa indicam o inverso, ou seja, que uma porcentagem de pixels de alta produtividade coincide com pixels de baixa reflectância ou que uma porcentagem de pixels de baixa produtividade coincide com pixels de alta reflectância.

Tabela 4– Mapas de Variações obtidos a partir dos valores de produtividade e das bandas ou índices de vegetação e a análise comparativa e porcentagem de semelhança entre estes mapas.

Safras	Talhão Cultura Data Banda	Mapa de Variações de Produtividade	Mapa de Variações da Banda	Análise Comparativa	Seme- lhança (%)
00/01	Talhão A Soja 01/01/01 GNDVI				25,31
	Talhão A Soja 17/01/01 B5				34,62
01/02	Talhão B Milho 09/11/01 B5				-18,82%
01/02	Talhão B Milho 27/12/01 GNDVI				15,17%
00/01	Talhão C Soja 17/01/01 NDVI				6,67
	Talhão C Soja 26/02/01 B2				7,35
	Talhão C Soja 06/03/01 B2				8,05

01/02	Talhão C Soja 19/12/01 B2				-18,70
	Talhão C Soja 05/02/02 B5				-30,77
01/02	Talhão C Soja 09/03/02 B5				-15,65
	Talhão C Soja 17/03/02 NDVI				14,50
00/01	Talhão D Soja 26/02/01 GNDVI				17,99
	Talhão D Soja 06/03/01 B5				14,02
01/02	Talhão D Soja 19/12/01 B4				25
	Talhão D Soja 09/03/02 NDVI				23,88

	Talhão D Soja 17/03/02 GNDVI				32,41
0/01	Talhão F Soja 06/03/01 B4				5,14
01/02	Talhão F Milho 09/11/01 B4				2,35
	Talhão F Milho 19/12/01 B4				2,99
	Talhão F Milho 05/02/02 B1				3,57

A Tabela 5 apresenta uma comparação dos valores de r^2 , obtidos a partir da análise de regressão múltipla, com os valores de porcentagem de semelhança entre os Mapas de Variações.

Apesar dos baixos valores de semelhança entre o Mapa de Variações obtido a partir dos valores de produtividade das culturas de milho e soja e o Mapa de Variações

obtido a partir das imagens, é possível observar a tendência dos Mapas de Variações de reflectância identificarem as regiões de alta ou baixa produtividade.

A partir das Tabelas 4 e 5 é possível observar que há uma tendência dos valores de semelhança acompanharem os valores de correlação obtidos e apresentados no tópico anterior.

Para a safra 01/02 (soja) no talhão C, por exemplo, é possível observar a tendência de aumento da porcentagem de semelhança acompanhando o aumento de r^2 até a data de 05/02/02 (pleno desenvolvimento vegetativo da cultura). Já para o período de senescência é possível observar o decréscimo dessa semelhança, bem como de r^2 . Nos Mapas de Variações, os maiores valores de semelhança foram obtidos para o talhão E, para as datas de 09/11/2001 (50,3%, com o GNDVI) e 19/12/2001 (-43,5%, com a B5), e também os maiores valores de r^2 encontrados. Porém não mantiveram as mesmas bandas do modelo de regressão (B2 e B3 para 09/11/2001; B7 para 19/12/2001).

Tabela 5 – Comparação entre a análise de regressão e a metodologia de extração de semelhança entre Mapas de Variações, para todas as datas analisadas em cada talhão.

Talhão	Cultura	Safr	Data	Regressão		MV	
				Fatores do modelo	R ²	Variável	%Semelhança
A	Soja	00/01	01/01/2001	Sem significância estatística	-	GNDVI	25,3
			17/01/2001	Sem significância estatística	-	B5	34,6
B	Milho	01/02	9/11/2001	B4 e B5	0,35	B5	-18,8
			27/12/2001	GNDVI e B4	0,08	GNDVI	15,2
C	Soja	00/01	17/1/2001	B2, B4, B5 e GNDVI	0,28	NDVI	6,7
			26/2/2001	B2 e B5	0,2	B2	7,4
			6/3/2001	B2, B3, B4, NDVI e GNDVI	0,22	B2	8,1
		01/02	19/12/2001	B7	0,22	B2	-18,7
			5/2/2002	B1, NDVI e GNDVI	0,32	B5	-30,8
			9/3/2002	Sem significância estatística	-	B5	-15,7
D	Soja	00/01	17/3/2002	B2 e GNDVI	0,13	NDVI	14,5
			26/2/2001	GNDVI	0,15	GNDVI	18,0
		01/02	6/3/2001	B1	0,16	B5	14,0
			19/12/2001	B4 e B5	0,16	B4	25,0
			9/3/2002	B4	0,17	NDVI	23,9
			17/3/2002	B3 e NDVI	0,23	GNDVI	32,4
E	Soja	00/01	17/1/2001	B2, B4 e NDVI	0,28	GNDVI	-10,2
			26/2/2001	Sem significância estatística	-	B5	12,1
		01/02	6/3/2001	Sem significância estatística	-	NDVI	16,4
			9/11/2001	B2 e B3	0,39	GNDVI	50,3
F	Milho	00/01	19/12/2001	B7	0,38	B5	-43,5
			26/2/2001	B3 e B5	0,29	NDVI	13,2
		01/02	6/3/2001	B3, B4 e NDVI	0,24	B4	5,1
			9/11/2001	B5 e B7	0,23	B4	2,3
			19/12/2001	Sem significância estatística	-	B4	3,0
			5/2/2002	Sem significância estatística	-	B1	-3,6

Por outro lado, observou-se que a banda que apresentou semelhança no maior número dos casos analisados foi a Banda 5 (7 datas), assemelhando-se aos resultados obtidos da análise de regressão. Isso mostra o grande potencial da Banda 5, além dos índices de vegetação, principalmente o GNDVI, para a análise da variabilidade espectral

dentro da cultura, concordando com os resultados obtidos por Gitelson et al. (1996), Shanahan et al. (2001) e Staggenborg e Taylor (2000).

Dessa forma, apesar desse estudo demonstrar que as imagens sozinhas não são suficientes para o mapeamento da produtividade, é possível observar a grande utilidade dos Mapas de Variações em identificar zonas de variabilidade de produtividade dentro dos talhões agrícolas. De acordo com Yang et al. (2001) a demonstração da presença de correlação entre mapas de produtividade obtidos com o monitor e o mapa espectral, mesmo que pequena, mas significativa, indica que é possível utilizar as imagens orbitais no manejo da variabilidade de produtividade e para definir zonas de manejo para campos, onde dados de monitoramento de colheita não estão disponíveis. Mapas espectrais de variabilidade de produtividade, obtidos por meio de processamentos de imagens digitais e aplicação do Mapa de Variações, podem ser utilizados para identificar áreas de estresse que necessitem de tratamento em local específico ou para direcionar grades de amostragem de solo ou da própria produtividade.

Concordando com Machado (2002) e Rydberg e Soderstrom (2000), a utilização do SR permite, através de uma análise da distribuição espacial das áreas cultivadas e mapeamento das diferenças de vigor da cultura (variações de biomassa), um melhor direcionamento da amostragem e observações de campo, promovendo uma melhor avaliação do potencial de produção da área cultivada. Desta forma, a classificação dos dados de reflectância pelo Mapa de Variações podem ser um forte indicador de onde as altas variabilidades podem ser encontradas no campo.

Conclusões

Por meio deste estudo pode-se observar que as imagens obtidas pelos sensores TM e ETM⁺, a bordo do Landsat 5 e 7 respectivamente, são úteis para identificar a variabilidade de produtividade em áreas com culturas de milho e soja, porém necessitam de uma metodologia bem definida para tal identificação; A metodologia de obtenção dos Mapas de Variações, a partir da reflectância de imagens digitais obtidas pelos sensores TM e ETM⁺, demonstrou ter potencial utilização para a identificação de zonas de variabilidade de produtividade de milho e soja;

O Mapa de Variações demonstrou ser um forte indicador de onde as altas variabilidades podem ser encontradas no campo e esta informação pode ser usada como suporte no direcionamento de amostragem de solo, na identificação e diagnóstico de zonas com algum tipo de estresse e na tomada de decisão no manejo da propriedade; Foi possível observar uma tendência de maior correlação do GNDVI com a produtividade, sendo possível a sua utilização na identificação da variabilidade produtiva dos talhões cultivados com milho e soja;

A resolução radiométrica e espacial das imagens utilizadas foi um ponto de merecida atenção no tocante às baixas correlações encontradas. Estas resoluções não permitiram a visualização de manchas de alto contraste de reflectância dentro dos talhões, gerando perdas de informações da variabilidade, e dificultaram o georreferenciamento das imagens com os respectivos mapas de produtividade;

O zoneamento da variabilidade de produtividade proposto, que faz uso de imagens Landsat, aliado à metodologia do Mapa de Variações, pode ser utilizado como suporte ao método tradicional de mapeamento por meio de colhedoras combinadas, principalmente onde dados de monitoramento de colheita não estão disponíveis. Por

outro lado, permite a identificação de áreas de estresse para um diagnóstico num aspecto mais rápido, com a possibilidade de intervenção na cultura durante a própria safra, em comparação ao sistema tradicional de mapeamento da produtividade.

Referências Bibliográficas

Aguiar, J.; Dainese, R. C.; Pugliese, P. B.; Jorge, L. A. C. Análise estatística de áreas com anormalidade de produtividade para a definição de zonas homogêneas de manejo. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão – ConBAP, 2004,

Anais...ESALQ/USP, Piracicaba – SP, 2004

Araújo, J.C.; Molin, J.P.; Vettorazzi, C.A. Correlação entre mapas de produtividade agrícola e fotografias aéreas coloridas 35 mm In.: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 10, CONBEA, **Anais...** Foz do Iguaçu – PR, 2001.

Araújo, J.C.; Vettorazzi, C.A.; Molin, J.P. Determinação de zonas de manejo e estimativa da produtividade de culturas de grãos por meio de videografia aérea digital multiespectral. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão – ConBAP, 2004, **Anais...ESALQ/USP**, Piracicaba – SP, 2004

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

Boatwright, G.O.; Badhwar, G.D.; Johnson, W.R. **An AVHRR spectral-based yield model for corn and soybeans**, Final Rpt. Project no. 8103, USDA-ARS, Beltsville, MD. 1988.

Câmara, G., R.C.M. Souza, U. M. Freitas e J. C. P. Garrido, "SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS with Object-Oriented Data Modelling." **Computers and Graphics**, v.15, n.6, p.13-22, 1996.

Dainese, R. C.; Moreira, M. A.; Molin, J. P.; Aguiar, J. Análise do potencial de parâmetros espectro-temporais de imagens orbitais para mapeamento de produtividade em cana-de-açúcar. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão – ConBAP, 2004, **Anais...ESALQ/USP**, Piracicaba – SP, 2004

Daughtry, C.S.T.; K.P. Gallo; S.N. Goward; S.D. Price; W.P. Kustas. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. **Remote Sensing of Environment**, v.39; p.141-152. 1992.

Dobermann, A.; Ping, J. L. Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps. **Agronomy Journal**, 96:285-297, 2004.

- Dusek, D.A.; Jackson, R.D.; Musick, J.T. Winter wheat vegetation indices calculated from combinations of seven spectral bands. **Remote Sensing of Environment**, v.18, p.255-267, 1985.
- Gardner, B.R., Blad, B.L.; Thompson, D.R.; Henderson, K.E. Evaluation and interpretation of Thematic Mapper ratios in equations for estimating corn growth parameters. **Remote Sensing of Environment**, v.18, p.225-234, 1985.
- Gitelson, A.A., Y.J. Kaufman, and M.N. Merzlyak. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment** v.58, p.289-298. 1996.
- Gopalapillai, S.; Tian, L. Digital aerial imaging for near-real-time crop sensing and yield prediction, **ASAE Paper no.** St Joseph, Mich.: ASAE, 1999.
- Jasinski, M.F. Sensitivity of the Normalized Difference Vegetation Index to subpixel canopy cover, soil albedo, and pixel scale. **Remote Sensing of Environment**, v.32, p.169-187, 1990.
- Leon, C. T.; Shaw, D. R.; Cox, M. S.; Abshire, M. J.; Ward, B.; Wardlaw, M. C.; Watson, C. Utility of remote sensing in predicting crop and soil characteristics. **Precision Agriculture**, V. 4 (4), 359-384, 2003.
- Luiz, A.J.B.; Gürtler, S.; Gleriani, J.M.; Epiphanyo, J.C.N.; Campos, R.C. Reflectância a partir do número digital de imagens ETM+. **Anais XI SBSR**, Belo Horizonte, Brasil, 05-10 abril 2003, INPE, p. 2071-2078.
- Macedo, M. A.; Rudorff, B.F.T. Geotecnologias espaciais no seguro agrícola. **Agricultura em São Paulo**. 50(1):43-52, 2003. .
- Machado, H. M.; Lamparelli, R. A. C.; Rocha, J. V.; Zullo Jr., J.; Pereira, V. H. Utilização de dados orbitais (Landsat 7) e Sistema de Informações Geográficas (Sig) na estimativa do potencial de produção da cana-de-açúcar. 2º Simpósio Internacional de Agricultura de Precisão, **Anais...**, Viçosa, Mg, 12 a 14 de Junho de 2002.
- Molin, J. P.; Menegatti, L. A. A. Remoção de erros em mapas de produtividade via filtragem de dados brutos. In.: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA, 31, **Anais...** Salvador, BA, 2002.
- Myers, V. I. Soil, water, plant relationships. In: Remote Sensing with Special Reference to Agriculture and Forestry, Washington, 1970. **Anais**. National Academy of Science, 1970, p. 253-279.
- Rudorff, B.F.T.; Moreira, M. A.; Adami, M.; Freitas, J.G. Resposta espectral do milho e sua relação com altos níveis de produtividade de grãos **Anais XI SBSR**, Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 abril 2003, INPE, p. 2597 - 2603.



2º Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão São Pedro, SP – ESALQ/USP

Rydberg, A.; Söderström, M. Potential crop growth assesment from remotely sensed images compared to ordinary yield maps. **Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture**. ASA-CSSA-SSSA, 677 South Segoe Road, Madison, WI 53711, USA. 2000.

Schung, E.; Murphy, D.; Evans, E.; Haneklaus, S.; Lamp, J. Yield mapping and application of yield maps to computer-aided local resource management. I **Proc. Soil Specific Crop Manage**. Madison, Wis.: Am. Society of Agronomy, 1993.

Senay, G.B.; Ward, A.D.; Lyon, J.G.; Fausey, N.R.; Nokes, S.E. Manipulation of high spatial resolution aircraft remote sensing data for use in site-specific farming. **Transactions of the ASAE**. V. 41(2):489-495, 1998.

Shanahan, J. F.; Schepers, J.S.; Francis, D.D.; Varvel, G.E.; Wilhelm, W.W.; Tringe, J.M.; Schlemmer, M.R.; Major, D.J. Use of Remote Sensing Imagery to Estimate Corn Grain Yield. **Agronomy Journal**, v.93, p.583-589, 2001.

Staggenborg, S.A.; Fjell, D.L.; Taylor, T. Using infrared images as a corn scouting tool. **Agronomic Abstract**. p. 90-116. 2000.

Thenkabail, P.S.; Ward, A.D.; Lyon, J.G. Landsat-5 Thematic Mapper Models of Soybean and Corn Crop Characteristics, **International Journal of Remote Sensing**, v.15, n.1, p.49-61, 1994.

Yang, C.; Bradford, J.M.; Wiegand, C.L. Airbone Multispectral imagery for mapping variable growing conditions and yields of cotton, grain sorghum, and corn. **Transactions of the ASAE** v. 44, n.6, p.1983-1994, 2001.

Yang, C.; Everitt, J.H.; Bradford, J.M. Airbone hyperspectral imagery and yield monitor data for estimating grain sorghum yield variability. **Transactions of the ASAE**, v. 47, n. 3, p. 915-924, 2004a.

Yang, C.; Everitt, J.H.; Bradford, J.M.; Murden, D. Airbone hyperspectral imagery and yield monitor data mapping cotton yield variability. **Precision Agriculture**, V. 5 (5), p. 445-461, 2004b.