

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

EDSON CRISTIANO GROFF

**COMPORTAMENTO DO NDVI DA CULTURA DA SOJA E SUA RELAÇÃO
COM AS VARIÁVEIS AGRONÔMICAS**

**MARINGÁ
PARANÁ – BRASIL
MARÇO – 2010**

EDSON CRISTIANO GROFF

**COMPORTAMENTO DO NDVI DA CULTURA DA SOJA E SUA RELAÇÃO
COM AS VARIÁVEIS AGRONÔMICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia, área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof^o Dr. Marcos Rafael Nanni

**MARINGÁ
PARANÁ – BRASIL
MARÇO – 2010**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)

G874c Groff, Edson Cristiano
Comportamento do NDVI da cultura da soja e sua
relação com as variáveis agronômicas. / Edson
Cristiano Groff. -- Maringá, 2010.
viii, 50 f. : il. color., figs., tabs., quadros.

Orientador : Prof. Dr. Marcos Rafael Nanni.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Maringá, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2010.

1. Soja (*Glycine max* (L.) Merrill) - Índice de
vegetação - NDVI. 2. Soja (*Glycine max* (L.) Merrill) -
Produtividade de grãos. 3. Soja (*Glycine max* (L.)
Merrill) - Produtividade de massa seca. 4. Soja
(*Glycine max* (L.) Merrill) - Densidade de plantas. 5.
Soja (*Glycine max* (L.) Merrill) - Altura de plantas.
6. Soja (*Glycine max* (L.) Merrill) - Análise foliar -
Cobre. 7. Sensoriamento remoto - Comportamento
espectral - Sensor ativo. 8. Soja (*Glycine max* (L.)
Merrill) - Zonas de amostragem (Manejo). I. Nanni,
Marcos Rafael, orient. II. Universidade Estadual de
Maringá. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III.
Título.

CDD 21.ed. 633.34

A Deus, à família e aos amigos

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pela concessão de bolsa de estudo.

À Coordenação do Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Maringá, pela oportunidade concedida.

Ao Professor-orientador Dr. Marcos Rafael Nanni, pela parceria, paciência, incentivo e amizade durante a realização deste trabalho.

Aos Professores das disciplinas que cursei e aos demais que auxiliaram no andamento do trabalho.

Ao proprietário que cedeu a área para condução da pesquisa e ao agricultor arrendatário que disponibilizou sua infraestrutura/maquinários para perfeita condução do trabalho de campo.

À Esalq e à Fundação ABC, por terem disponibilizado o equipamento utilizado para execução de parte do trabalho.

Ao Dr. Fabrício P. Povh e ao Dr. Leandro M. Gimenez, pelo suporte técnico, apoio logístico e companheirismo.

Aos colegas de pós-graduação.

Aos Servidores Érika C.T. Sato e Reinaldo Bernardo, pela atenção, disponibilidade e amizade prestadas durante a realização deste trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Análise de Solos e Plantas, da Universidade Estadual de Maringá.

BIOGRAFIA

EDSON CRISTIANO GROFF, filho de Jacob Luiz Groff (*in memoriam*) e Alzira Oliari Groff, nasceu em Pitanga, Estado do Paraná, no dia 14 de junho de 1974.

Em janeiro de 1993, concluiu o curso de Técnico Agrícola, no Colégio Agrícola Augusto Ribas em Ponta Grossa, Paraná.

Em fevereiro de 2000, concluiu o Curso de Graduação em Agronomia, na Universidade Federal do Paraná.

Em junho de 2006, concluiu o Curso de Especialização em Agronomia, na Universidade Estadual de Maringá, área de concentração: Solos, Nutrição de Plantas e Produção Vegetal.

Em março de 2008, ingressou no Programa de Pós-graduação em Agronomia, da Universidade Estadual de Maringá, em nível de Mestrado, na área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 A cultura da soja	3
2.2 Sensoriamento remoto (SR).....	4
2.3 Comportamento espectral	5
2.4 Índice de vegetação (IV)	9
2.4.1 <i>Relação do NDVI com variáveis agronômicas</i>	11
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	13
3.1 Área de estudo.....	13
3.2 Estabelecimento e manejo da cultura da soja.....	14
3.3 Precipitação	15
3.4 Índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI)	15
3.5 Determinação das variáveis agronômicas.....	18
3.5.1 <i>Altura de plantas</i>	18
3.5.2 <i>Densidade de plantas</i>	19
3.5.3 <i>Produtividade de massa seca (MS)</i>	19
3.5.4 <i>Produtividade de grãos</i>	19
3.5.5 <i>Análise química do solo</i>	20
3.5.6 <i>Análise foliar</i>	21
3.6 Análise estatística	22
3.7 Elaboração dos mapas	23
3.7.1 <i>Krigagem</i>	23
3.7.2 <i>Faixas de distribuição das classes das variáveis</i>	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1 Precipitação	24
4.2 Dinâmica do NDVI nos estádios fenológicos da cultura da soja	25
4.3 Relações entre NDVI e variáveis agronômicas	27
4.3.1 <i>NDVI versus produtividade de grãos</i>	27
4.3.2 <i>NDVI versus produtividade de massa seca</i>	31

4.3.3 NDVI versus densidade de plantas	33
4.3.4 NDVI versus altura das plantas	34
4.3.5 NDVI versus teores de nutrientes nas folhas	35
5 CONCLUSÕES	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
APÊNDICE	48

RESUMO

GROFF, Edson Cristiano, M.Sc. Universidade Estadual de Maringá, março de 2010. **Comportamento do NDVI da cultura da soja e sua relação com as variáveis agronômicas.** Professor Orientador: Dr. Marcos Rafael Nanni.

A cultura da soja (*Glycine max* L. Merrill) destaca-se pela grande importância econômica e crescimento nos últimos anos. Com a expansão do uso da agricultura de precisão (AP), a compreensão da variabilidade das variáveis agronômicas, se torna fundamental. Utilizando-se sensores terrestres é possível estabelecer relações entre as respostas espectrais da cultura e os parâmetros de crescimento. Isto é possível por meio da leitura de índices de vegetação, como o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI). O presente trabalho foi realizado, no período de outubro de 2008 a abril de 2009, em Ponta Grossa – PR, com o objetivo de avaliar o comportamento espectral da cultura da soja, por meio do NDVI, e sua correlação com variáveis agronômicas como altura de plantas, densidade de plantas, produtividade de massa seca (MS), produtividade de grãos e teores foliares de nutrientes. Foram realizadas seis leituras de NDVI utilizando-se um espectrorradiômetro. A fim de verificar quais variáveis agronômicas estabeleciam algum grau de relação com o NDVI, foi realizada a análise de regressão. O comportamento do NDVI foi característico para o dossel de plantas. Para o estágio fenológico (EF) V9, as variáveis produtividade de grãos e de MS apresentaram r^2 de 0,59 e 0,28, respectivamente. Para a variável cobre foliar, o NDVI foi capaz de perceber a variação entre este e o EF R3, (r^2 de 0,60). A separação dos níveis de NDVI e algumas variáveis agronômicas em classes (baixa, média e alta) permitiu compreender a distribuição espacial das mesmas e estabelecer zonas de amostragem e/ou manejo.

Palavras-chave: amostragem, densidade de plantas, índice de vegetação, produtividade.

ABSTRACT

GROFF, Edson Cristiano, M.Sc. Universidade Estadual de Maringá, March, 2010. **NDVI Behavior of soybean and its relationship to agronomic variables.** Advisor: Dr. Marcos Rafael Nanni.

The soybean (*Glycine max* L. Merrill) is distinguished by the great economic importance and growth in recent years. With the increasing use of precision agriculture (PA) it is crucial to understand the variability of the agronomic traits. Using ground sensors it's possible to establish relationships between spectral responses and growth parameters of the culture. This is possible through the reading of vegetation indexes, such as The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). This study was conducted from October 2008 to April 2009, in Ponta Grossa - PR, with the aim of evaluating the spectral response of soybean by means of NDVI and its correlation with agronomic variables such as height of plants, plant density, and dry weight yield, grain yield and leaves nutrient content. Six NDVI readings were performed using a spectroradiometer. Regression analysis were performed in order to determine which agronomic variables established some relationship degree with the NDVI. The NDVI behavior was characteristic for the canopy of plants. For EF V9, the variables grain and dry weight yield had r^2 of 0.59 and 0.28, respectively. For the variable leaf copper, the NDVI was able to see the variation between the EF and R3, where it obtained r^2 of 0.60. The NDVI levels and some agronomic variables separation in classes (low, medium and high), allowed the understanding of their spatial distribution and establish sampling and / or management areas.

Keywords: sampling, plant density, vegetation index, productivity.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de técnicas de sensoriamento remoto na agricultura tem sido relatada, desde a década de 60, para o mapeamento de solos e a previsão de safras, com o uso de fotografias aéreas. Posteriormente, começaram a ser utilizadas imagens de satélite no monitoramento das áreas (Fontana et al., 2002; Berka e Rudorff, 2003; Rizzi e Rudorff, 2005; Weber et al. 2005; Rizzi et al., 2006), na previsão de safras e na avaliação do desenvolvimento das plantas (Motta et al., 2001; Almeida, 2008).

Atualmente, também são utilizados sensores terrestres que permitem estabelecer relações entre as respostas espectrais da cultura e os parâmetros de crescimento das plantas. Isto é possível por meio da leitura de índices de vegetação, como o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI). Estes índices possibilitam analisar a distribuição espacial das áreas plantadas, mapear as diferenças de vigor das plantas, melhorar o direcionamento das amostragens e observações de campo, promovendo assim, melhor avaliação do potencial de produção (Machado, 2003).

A cultura da soja (*Glycine max* L. Merrill) destaca-se pela grande importância econômica e pelo crescimento nos últimos anos. Na safra 2008/2009, a área cultivada foi de 21,65 milhões de hectares, 1,6% superior à cultivada na safra anterior. Esse incremento ocorreu nos principais Estados produtores, como Mato Grosso, Goiás e Paraná e, este último, classificou-se como o segundo maior do país em área cultivada e em produção (9,57 milhões de toneladas) (Conab, 2009).

Com o crescente uso da agricultura de precisão (AP), a compreensão da variabilidade das variáveis agrônômicas que compõem o sistema de produção, se torna fundamental. Além disso, as restrições ambientais e a capacidade de uso do solo geram a necessidade de adoção de tecnologias que possibilitem maximizar a produtividade.

Para esse trabalho, foi formulada a hipótese de que, com a utilização do NDVI, é possível estabelecer o desenvolvimento da cultura da soja e prever sua produtividade por meio de sensor terrestre.

Com base nesta hipótese, o trabalho foi conduzido com os objetivos de: avaliar o comportamento espectral da cultura da soja, por meio do NDVI e sua correlação com variáveis agronômicas como: a altura de plantas, a densidade de plantas, a produtividade de MS, a produtividade de grãos e os teores foliares de nutrientes.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura da soja

A soja é originária da China e há relatos sobre o seu uso há, aproximadamente, 5.000 anos. Porém, somente em 1920 passou a ter destaque internacional, quando os Estados Unidos iniciaram sua exploração (Embrapa, 2004a).

No Brasil, as primeiras cultivares foram avaliadas em 1882 na Bahia e, em 1901, no Instituto Agrônomo de Campinas-SP, que iniciou a distribuição de sementes aos produtores paulistas. Nesta época também teve início o cultivo no Estado do Rio Grande do Sul. Em 1940, a soja começou a destacar-se no país pela importância econômica. No entanto, a expansão aconteceu, somente, a partir da década de 60 e, na década de 70, passou a ser considerada a principal cultura do agronegócio brasileiro (Embrapa, 2004a).

Pertence à família *Leguminosae* (*Fabaceae*), a soja é uma planta herbácea, anual, que apresenta grande diversificação genética e morfológica pelo elevado número de cultivares. O desenvolvimento da soja é dividido em vários estádios fenológicos (EF), vegetativos (V) e reprodutivos (R), conforme apresentado na Tabela 1 (Fehr e Caviness, 1977).

Quanto ao ciclo, a soja pode ser classificada de acordo com os grupos de maturação que, no Estado do Paraná, são: precoce (115 dias), semiprecoce (116 a 125 dias), médio (126 a 135 dias) e semitardio (136 a 145 dias) (Embrapa 2004b).

Adapta-se melhor em temperaturas entre 20 e 30°C, sendo considerada uma planta de dias curtos, e sua adaptação está diretamente ligada ao fotoperíodo. A exigência hídrica aumenta com o desenvolvimento da cultura, atingindo o máximo durante a floração e o enchimento dos grãos (7 a 8 mm dia⁻¹) e decrescendo após esses períodos. O máximo rendimento é obtido com precipitações entre 450 e 800 mm bem distribuídos durante o desenvolvimento da cultura (Farias et al., 2007).

Tabela 1 – Descrição sumária dos estádios fenológicos da cultura da soja

Estádios vegetativos		
Estádio	Denominação	Descrição
VE	Emergência	Cotilédones estão acima da superfície do solo
VC	Cotilédone	Cotilédones completamente abertos
V1	Primeiro nó	Folhas unifoliadas completamente desenvolvidas
V2	Segundo nó	Primeira folha trifoliada completamente desenvolvida ¹
V3	Terceiro nó	Segunda folha trifoliada completamente desenvolvida
V...
V(n)	Enésimo nó	Ante-enésima folha trifoliada completamente desenvolvida
Estádios Reprodutivos		
R1	Início do florescimento	Uma flor aberta em qualquer nó do caule ² principal
R2	Florescimento pleno	Uma flor aberta em um dos dois últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida
R3	Início da formação de vagens	Vagem com 5 mm de comprimento num dos quatro últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida
R4	Plena formação de vagens	Vagem com 2 cm de comprimento num dos quatro últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida
R5	Início do enchimento de grãos	Grão com 3 mm de comprimento com vagem num dos quatro últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida
R6	Pleno enchimento de grãos	Vagem contendo grãos verdes preenchendo as cavidades da vagem de um dos quatro últimos nós do caule, com a folha completamente desenvolvida
R7	Maturação fisiológica	Uma vagem normal no caule com coloração madura
R8	Maturação de colheita	95% das vagens com coloração madura

¹ A folha é considerada completamente desenvolvida quando os bordos dos trifólios da folha seguinte (acima) não mais se tocam;

² Caule significa a haste principal da planta.

2.2 Sensoriamento remoto (SR)

De acordo com Fitz (2008), o SR é uma técnica que, por meio do uso de sensores, possibilita a captação e o registro, a distância, sem o contato direto, da energia refletida ou absorvida pela superfície terrestre.

O uso do SR teve início em 1858 realizando-se fotografias aéreas com câmeras colocadas em balões e, em 1862, começou a ser utilizado para fins militares. Em 1903, as câmeras fotográficas foram colocadas em pombos e,

somente em 1909 foi feita a primeira fotografia aérea utilizando-se um planador. Em 1972, foi lançado o primeiro satélite não-militar (LANDSAT 1), possibilitando a obtenção de imagens multiespectrais em nível orbital (Figueiredo, 2005).

Nos últimos anos, os dados multiespectrais, provenientes do SR (fotografias aéreas, imagens de satélites e radiometria de campo), foram relatados como valiosa fonte de informações e por meio deles possibilitado estimar a produtividade e monitorar o desenvolvimento das culturas, estimar safras agrícolas (Imai et al., 2003; Sun et al., 2008) e identificar as condições do solo e sua variabilidade espacial (Dainese et al., 2004).

O gerenciamento da variabilidade espacial no campo é importante, pois, permite organizá-lo em áreas específicas de manejo o que possibilita a otimização da produção e do uso de produtos químicos, gerando assim, menores impactos ao meio ambiente (Chancellor e Goronea, 1994 citados por Dainese, 2002).

2.3 Comportamento espectral

A radiação solar incidente pode ser refletida, absorvida ou transmitida pelo alvo (Ex. vegetação, solo e água). A radiação solar incidente no alvo e por ele refletida (Figura 1) tem sido mais utilizada no SR, pois pode ser captada por sensores acoplados em satélites ou radiômetros de campo (Moreira, 2007a; Fitz, 2008).

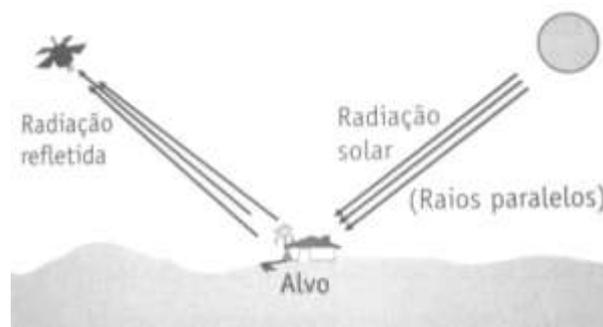


Figura 1 – Reflexão da energia solar pelo alvo (Fonte: Fitz, 2008).

A radiação eletromagnética refletida (reflectância) (Figura 2) corresponde à faixa de comprimento de onda de 400 a 3.000 nm e é dividida em duas regiões: a do visível, que compreende a faixa espectral de 400 a 700 nm, e a do infravermelho que é dividida: em infravermelho próximo (700 a 1.300 nm), infravermelho médio (1.300 a 2.500 nm) e infravermelho distante ou termal (acima de 2.500 nm) (Moreira, 2007a).

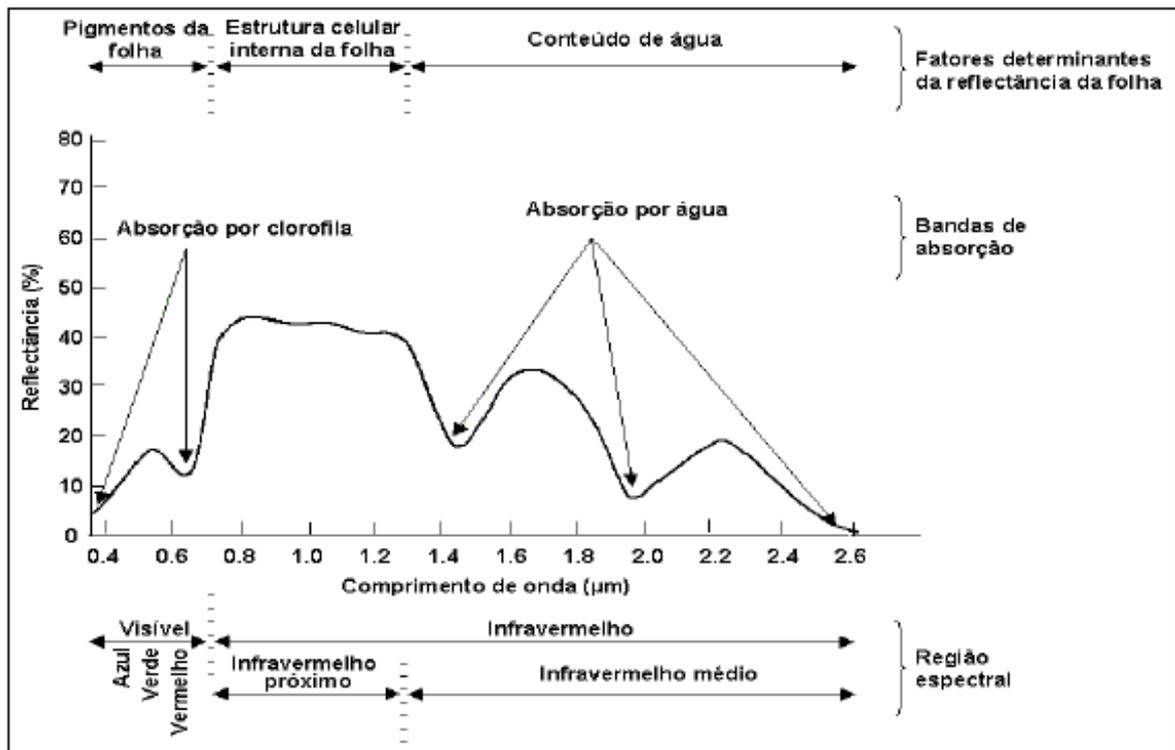


Figura 2 – Curva espectral da reflectância de uma folha verde e sadia (Fonte: Hoffer, 1978 citado por Moreira, 2007a).

Cada alvo terrestre tem um comportamento (ou assinatura) espectral específico, pois absorve ou reflete, de forma diferenciada, cada faixa do espectro da radiação solar incidente (Figueiredo, 2005). Assim, cada planta ou grupo de plantas reflete a faixa do espectro de forma diferenciada (Martini et al., 2009). Porém, a radiação refletida pelo dossel pode ser influenciada pelas características das plantas e condições em que elas se encontram, de modo que o comportamento espectral do dossel não corresponde à uma assinatura espectral imutável (Formaggio e Epiphanyo, 1990).

Durante os EF da cultura, a capacidade fotossintética das folhas é modificada, aumentando a partir da emergência até a sua maturação fisiológica, o que resulta em maior reflectância na região do visível pelas folhas senescentes, quando comparadas às sadias, em decorrência da degradação da clorofila (Moreira, 2007a).

Grande parte da energia radiante, na região do espectro visível, é absorvida pela folha, e deve-se, principalmente, à presença dos pigmentos fotossintéticos foliares, tais como clorofilas (a e b), carotenoides e xantofilas. Um pico na reflectância do visível é, geralmente, observado na faixa espectral do verde (500 a 600 nm) enquanto que valores mais baixos ocorrem nas faixas do azul (400 a 500 nm) e do vermelho (600 a 700 nm) pela alta absorção da radiação eletromagnética pelas clorofilas, para a realização das atividades fotossintéticas (Thomas e Gausman, 1977 citados por De Alencastro Graça, 2004). Por meio da quantificação dos pigmentos fotossintéticos, contidos na vegetação, é possível a detecção de condições de estresse, a discriminação de espécies e a estimativa da produtividade (Blackburn, 2004).

Para a cultura da soja, a maior absorbância na faixa do visível ocorre entre 100 e 110 dias após a emergência, como consequência do aumento da absorção da energia incidente nas folhas, já que as clorofilas *a* e *b* têm seus picos de absorção nos comprimentos de 649 e 665 nm, durante o EF R4. Nesta faixa ocorreram os maiores valores de reflectância, atingindo 61,2% aos 110 dias após a emergência (Almeida e Fontana, 2006). Almeida (2008), ao avaliar as respostas espectrais da cultura da soja, ao longo do ciclo, observou diferenças de reflectância entre as datas de avaliação, comprovando que a reflectância é um bom indicador das condições de desenvolvimento da cultura.

Além disso, fatores ligados à nutrição e às condições fisiológicas, tais como, conteúdo de água e estrutura celular também podem modificar o comportamento espectral do dossel (Moreira, 2007a). A alta reflectância no infravermelho próximo é deve-se à estrutura celular e, a partir deste comprimento de onda, é o conteúdo de água na vegetação que modula as bandas de absorção (Figura 2) (Moraes, 2002). Almeida e Fontana (2006) concluíram que há influência do conteúdo de água no comportamento espectral da cultura da soja. Quando irrigada, apresentou menores valores de reflectância na faixa visível do espectro.

Fatores morfológicos como a arquitetura da planta, distribuições horizontal e vertical das folhas e cobertura vegetal também podem modificar o comportamento espectral. A distribuição horizontal das folhas refere-se ao quanto de solo elas cobrem. A distribuição da folhas (arranjo) depende da densidade de plantas e da disposição destas na área. O ângulo de inserção foliar também influencia na radiação que incide nas plantas. Na soja, que é uma planta planófila, o ângulo é em torno de 90° (Moreira, 2007a) e, portanto reflete mais a radiação incidente na direção vertical do que plantas erectófilas (folhas dispostas verticalmente) como o milho (Rizzi, 2005).

Além dos fatores anteriormente descritos, a presença de plantas invasoras e o ataque de pragas e doenças podem modificar o comportamento espectral do dossel (Formaggio e Epiphanyo, 1990). As plantas invasoras por apresentarem características diferenciadas em relação à cultura, já os tecidos atacados por pragas e doenças apresentam menor reflectância na região do infravermelho. Plantas saudáveis, normalmente, refletem grande parte da radiação na região do infravermelho (Freire e Bastos, 1998).

O conteúdo de nutrientes nas folhas também pode modificar o comportamento espectral das plantas. Nutrientes como o N e o Mg participam diretamente na formação da molécula de clorofila, o que pode gerar modificações na taxa fotossintética e, conseqüentemente, na absorção da radiação solar (Moreira, 2007a). Em folhas com deficiência de P e Ca, a absorção da energia, na faixa do infravermelho próximo é menor, já para o S, Mg, K e N, a absorção é maior do que em folhas normais (Bauer, 1975 citado por Moreira, 2007a).

Outro fator que pode modificar o comportamento espectral do dossel é o comportamento espectral do solo, principalmente em culturas anuais como a soja, pois, durante o seu desenvolvimento, há variação na quantidade de material vegetal contido no dossel e na cobertura do solo (Almeida, 2008). No início do desenvolvimento, em função da menor cobertura vegetal, ocorre o domínio do solo nas interações com a radiação eletromagnética. Posteriormente, quando é formado o dossel, ocorre o domínio da cultura e, na fase de maturação, em função da senescência e da queda acentuada das folhas, há o predomínio da vegetação seca e do solo exposto (Formaggio, 1989 citado por Ferri, 2002).

Entre os fatores que influenciam a reflectância espectral do solo estão os teores de matéria orgânica e de ferro, a granulometria, o material de origem e a estrutura do solo (Ferri, 2002). Também existem diferenças na reflectância do solo seco, coberto com palha e descoberto úmido (reflectância menor) o que evidencia a necessidade de utilizar índices de vegetação que consideram a reflectância do solo (Almeida, 2008).

Sanches et al. (2005), ao correlacionar imagens *Thematic Mapper* (TM) e *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), do satélite LANDSAT 5 com verificações de campo, a fim de identificar as culturas de cana-de-açúcar, soja e milho, observaram variações no comportamento espectral das imagens em vários estádios de desenvolvimento, porém, no início do desenvolvimento a identificação das culturas foi difícil pela grande influência do solo na resposta espectral.

Além dos fatores anteriormente descritos, os componentes atmosféricos como a presença de nuvens podem modificar o comportamento espectral do dossel (Figueiredo, 2005), porém, a radiometria de campo permite a eliminação da interferência da atmosfera, pois a distância entre o sensor e o alvo é mínima (Batista, 2005).

2.4 Índice de vegetação (IV)

Os IV podem ser obtidos por transformações lineares da reflectância em duas ou mais bandas do espectro eletromagnético, por meio da soma, razão entre bandas, diferença ou outra combinação a partir de medidas radiométricas de campo ou de dados orbitais (Wiegand et al., 1991 citados por Moreira, 2007b).

Existem vários IV que foram desenvolvidos com o objetivo de expressar as características espectrais da vegetação (Moreira, 2007b; Jesus e Miura, 2009). Os IV apresentam melhor correlação com vários parâmetros da vegetação, que o uso de bandas espectrais individuais além de minimizarem os efeitos de declividade da superfície e geometria de aquisição dos dados, que influenciam a reflectância do dossel (Moreira, 2007b; Jesus e Miura, 2009). Os IV, que melhor se correlacionam com a vegetação são formados por combinações de dados espectrais obtidos no vermelho e infravermelho

próximo, pois estes têm significativa correlação com o verde ou porções fotossinteticamente ativas das plantas (Moreira, 2007b; Jesus e Miura, 2009).

Entre as principais características da vegetação avaliadas pelo IV estão o índice de área foliar, a percentagem de cobertura vegetal, a produtividade e a sanidade (Zullo Jr., 1994; Moreira, 2007b). Também é relatado o uso dos IV no estudo da evolução de safras de soja e milho, no mapeamento da vegetação, para o monitoramento e gerenciamento ambiental (Lourenço e Landim, 2004), e no monitoramento da dinâmica de uso e ocupação das terras (De Alencastro Graça, 2004; Jesus e Miura, 2009).

O índice de vegetação da diferença normalizada é um dos índices mais utilizados nos estudos de caracterização da vegetação (NDVI) (Moreira, 2007b). Sua simplicidade e sua relativa alta sensibilidade à densidade da cobertura vegetal tornaram possíveis comparações espaciais e temporais da atividade fotossintética, bem como o monitoramento sazonal, interanual e variações de longo prazo dos parâmetros estruturais e fenológicos da vegetação (Wang et al., 2003).

O NDVI varia de -1 (menos um) a +1 (mais um), e -1 indica que não há reflectância do infravermelho (Ex. corpos d'água), zero indica a ausência de verde e +1 indica que há maior densidade de folhas verdes (Gopalapillai et al., 1999, citados por Polsapalli, 2005).

O NDVI é representado pela equação:

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (1)$$

Em que:

IVP = reflectância na faixa do infravermelho próximo;

V = reflectância na faixa do vermelho.

Além do NDVI, existem outros IV, como o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI), aplicado ao estudo da área foliar. Razão simples (R) aplicado ao estudo da biomassa e área foliar, e para cada finalidade há um índice que melhor se ajusta.

2.4.1 Relação do NDVI com variáveis agronômicas

O NDVI é um índice útil para a parametrização global, processo relacionado à vegetação que está ligado aos parâmetros do dossel das culturas. Ele pode fornecer informações sobre o solo e as propriedades da planta, e pode ser medido por instrumentos, com elevado grau de resolução espacial, o que torna possível o uso na agricultura de precisão (Koller e Upadhyaya, 2005).

A utilidade do NDVI foi demonstrada em diversas áreas, tais como, agricultura de precisão, estudo da fenologia da vegetação, classificações espectrais e avaliações primárias de produtividade (Sugawara, 2001). Lourenço e Landim (2004), avaliando o uso de NDVI no mapeamento de vegetação para monitoramento e gerenciamento ambiental, concluíram que esta técnica possibilita a identificação das áreas com maiores mudanças, evidenciadas pela associação das cores às faixas dos valores de NDVI.

Almeida e Fontana (2009), avaliando o comportamento do NDVI na cultura da soja, concluíram que este índice pode ser utilizado como estimador remoto da cultura da soja, podendo ser extremamente útil nos programas de monitoramento e previsão de safras.

Imai et al. (2003) afirmam que dados multiespectrais, provenientes do SR, podem fornecer informações úteis na estimativa da produtividade das culturas, e mesmo auxiliar no monitoramento de seu desenvolvimento, pois o volume de massa acumulado nas plantas é um bom indicador das condições de desenvolvimento da cultura. Na cultura de soja, a taxa de acúmulo de MS pode ser avaliada nas partes vegetativas (folhas, pecíolos e ramos) e, com o avanço dos EF, há gradativa transferência da MS das partes vegetativas para as vagens e grãos em formação. Esse acúmulo de MS nos grãos determina o rendimento da cultura (Imai et al., 2003).

De acordo com Ma et al. (2001); Antuniassi et al. (2007), existe correlação positiva entre a refletância do dossel das plantas, expressas em valores de NDVI, e a produtividade das culturas. Santos Júnior et al. (2001) avaliaram a cultura da soja e os NDVIs obtidos foram relacionados com as variáveis agronômicas, peso da massa fresca e número de vagens por planta. Vellidis et al. (2004) observaram, para a cultura do algodão, que existe

correlação positiva entre o NDVI e a produtividade. No entanto, um NDVI específico pode resultar em valores diferentes de produtividade em função das condições de campo. Estes autores concluíram que a combinação do NDVI com os mapas de produtividade permite tomar decisões mais rápidas sobre as aplicações, a taxas variáveis de insumos, ao invés de usar os dados isoladamente.

Os sintomas de deficiências de nutrientes também são detectáveis nos espectros de reflectância dos vegetais e, por consequência, no NDVI (Ponzoni, 2001; Silva Júnior, 2007). Tais deficiências têm grande influência no comportamento fisiológico das plantas, pois pode alterar sua coloração, teor de umidade e estrutura interna das folhas, resultando em alteração na reflectância. A detecção destas deficiências, nos espectros de reflectância, apresentou alto potencial para o manejo da adubação nitrogenada das culturas de trigo, triticales e cevada e baixo potencial para a cultura do milho, conforme verificado por Povh et al. (2008).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O trabalho foi realizado, no período de outubro de 2008 a abril de 2009, em uma propriedade rural no município de Ponta Grossa – PR, localizada na área de trabalho apresentada na Figura 3. A área está inserida no meridiano - 51 W.G.

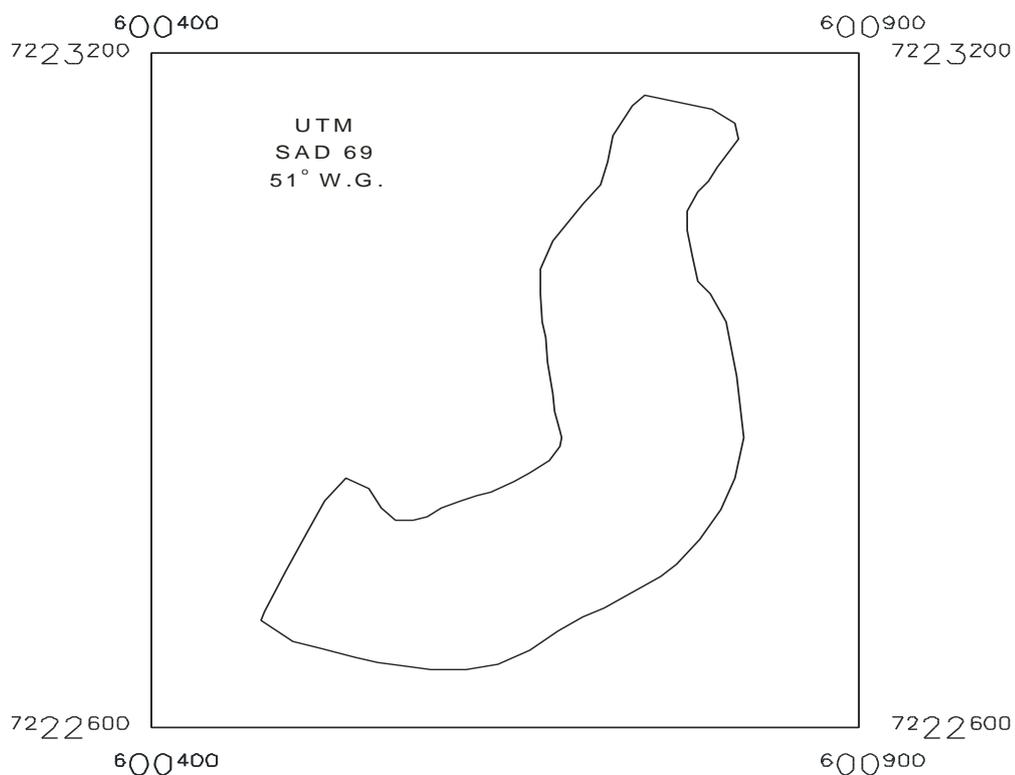


Figura 3 – Localização da área de trabalho com as referidas coordenadas planas em metros.

O clima, segundo o sistema de Köppen, classifica-se como *Cfb*, temperado, com temperatura média no mês mais frio abaixo de 18°C (mesotérmico), verões frescos, temperatura média no mês mais quente abaixo de 22°C e sem estação seca definida (Caviglione et al., 2000). O solo classifica-se como CAMBISSOLO Húmico alumínico (Embrapa, 2009).

3.2 Estabelecimento e manejo da cultura da soja

A cultura da soja foi estabelecida, em uma área de 7,50 ha, utilizando-se a cultivar BRS 133. A semeadura foi realizada no dia 18 de outubro de 2008, em sistema de semeadura direta, sobre a resteva de aveia preta, previamente dessecada, utilizando-se o espaçamento entre linhas de 0,42 m e população inicial de 306.000 plantas ha⁻¹.

Antes do estabelecimento da cultura, foram retiradas amostras de solo para a realização da análise química, coletando-se as amostras, com um amostrador tipo calador, a uma profundidade de 0,20 m. As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Solos da Fundação ABC, em Castro - PR. Com base no resultado da análise química foi realizada, na semeadura, a adubação com 300 kg ha⁻¹ do adubo formulado NPK 00-20-20. Quarenta dias após a semeadura efetuou-se a adubação de cobertura com 100 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio.

O controle das plantas invasoras foi realizado para a implantação da cultura, usando, para o manejo da área, glifosato (Tropp) na dose de 960 g i.a ha⁻¹, o controle de folha estreita foi efetuado com cletodim (Select 240 EC) na dose de 96 g i.a ha⁻¹ + óleo mineral emulsionável, adicionado à calda de pulverização na concentração de 0,80% (v/v). Para o controle de plantas invasoras de folha larga foi utilizado clorimuron etílico (Classic) na dose de 20 g i.a. ha⁻¹.

Para o controle da lagarta-da-soja (*Anticarsia gemmatilis*), foi utilizada, na primeira aplicação, bifentrina (Talstar 100 EC) na dose de 3 g i.a. ha⁻¹, e na segunda infestação triflumurom (Certeiro 175) na dose de 15 g i.a. ha⁻¹, seguidas de uma aplicação de 175 g i.a. ha⁻¹ de endosulfan (Thiodan EC).

No controle de doenças fúngicas, foram feitas duas aplicações, uma no pleno florescimento utilizando-se o fungicida Opera SE, entre os EF R1 e R2, na dose de 66,5 g i.a. ha⁻¹ de piraclostrobina + 25 g i.a. ha⁻¹ de epoxiconazol e uma segunda aplicação, entre os EF R3 e R4, usando-se o fungicida Sphere CE na dose 32,0 g i.a. ha⁻¹ de ciproconazol + 75,0 g i.a. ha⁻¹ de trifloxistrobina.

3.3 Precipitação

Os dados de precipitação foram coletados usando pluviômetros com abertura retangular instalados em uma haste de madeira a 1,80 m do nível do solo, em seis pontos georreferenciados, conforme Figura 4. As coletas foram realizadas nos seguintes intervalos: de 18/10/2008 a 27/10/2008, de 28/10/2008 a 09/11/2008, de 10/11/2008 a 02/12/2008, de 03/12/2008 a 31/12/2008, de 01/01/2009 a 04/01/2009, de 05/01/2009 a 12/01/2009, de 13/01/2009 a 21/01/2009, de 22/01/2009 a 29/01/2009, de 30/01/2009 a 9/02/2009, de 10/02/2009 a 24/02/2009 e de 25/02/2009 a 20/03/2009, de acordo com a ocorrência de chuva.

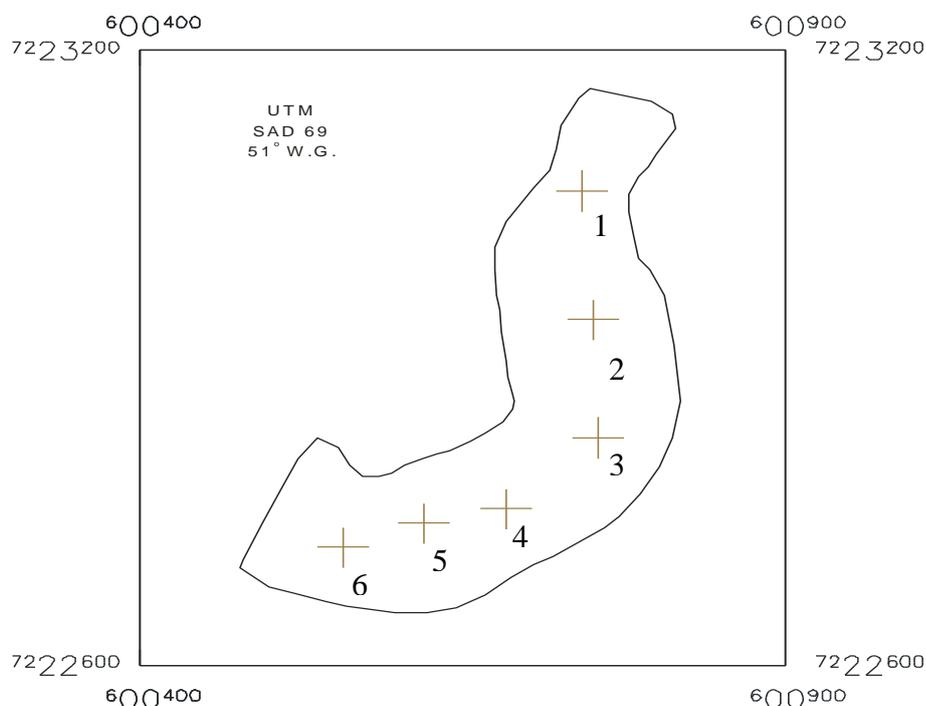


Figura 4 – Pontos de coleta da precipitação na área de trabalho.

3.4 Índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI)

Foram realizadas seis leituras de NDVI (12/12/08 EF V5, 24/12/08 EF V9, 06/01/09 EF R1, 15/01/09 EF R3, 29/01/09 EF R6 e 26/03/09 EF R8), utilizando-se um espectrorradiômetro, marca Crop Circle, modelo GLS 420 e ACS-210 (*Holland Scientific*), com sensor ativo instalado na barra de um

pulverizador hidráulico e, acoplados no trator, o *datalogger* (com cartão de memória para armazenamento de dados), o GPS modelo SR20, da marca Leica, de precisão métrica (Figura 5) e a antena externa. O espectrorradiômetro fornece os valores de NDVI, por meio da medição da reflectância do dossel, captando os comprimentos de onda de 590 e 880 nm.

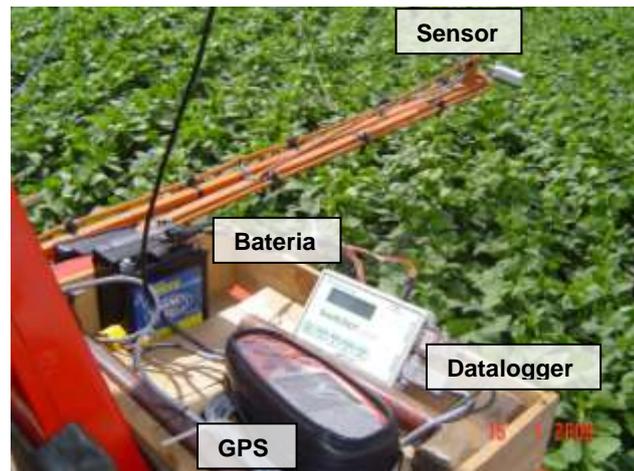


Figura 5 – Espectrorradiômetro ativo acoplado à barra de pulverização, *datalogger* e GPS.

As leituras foram realizadas a uma equidistância de 9 m, respeitando-se as linhas de pulverização conforme indicado na Figura 6. A velocidade de deslocamento do trator foi ajustada a fim de gerar um ponto a cada 1 m totalizando, aproximadamente, 4.000 pontos na área total. Estes pontos foram interpolados pelo método da média simples, com resolução espacial de 5 x 5 m, utilizando-se o programa *Spring 4.3.3*. Com base na grade regular de pontos, gerados pela interpolação (Figura 6), amostrou-se, em torno de cada ponto georreferenciado, nove pontos para a leitura do NDVI. Conforme especificação do fabricante, as leituras foram realizadas entre 0,80 e 1,20 m de altura do dossel (ápice da cultura), pois, neste intervalo, o sensor garante a qualidade da leitura.

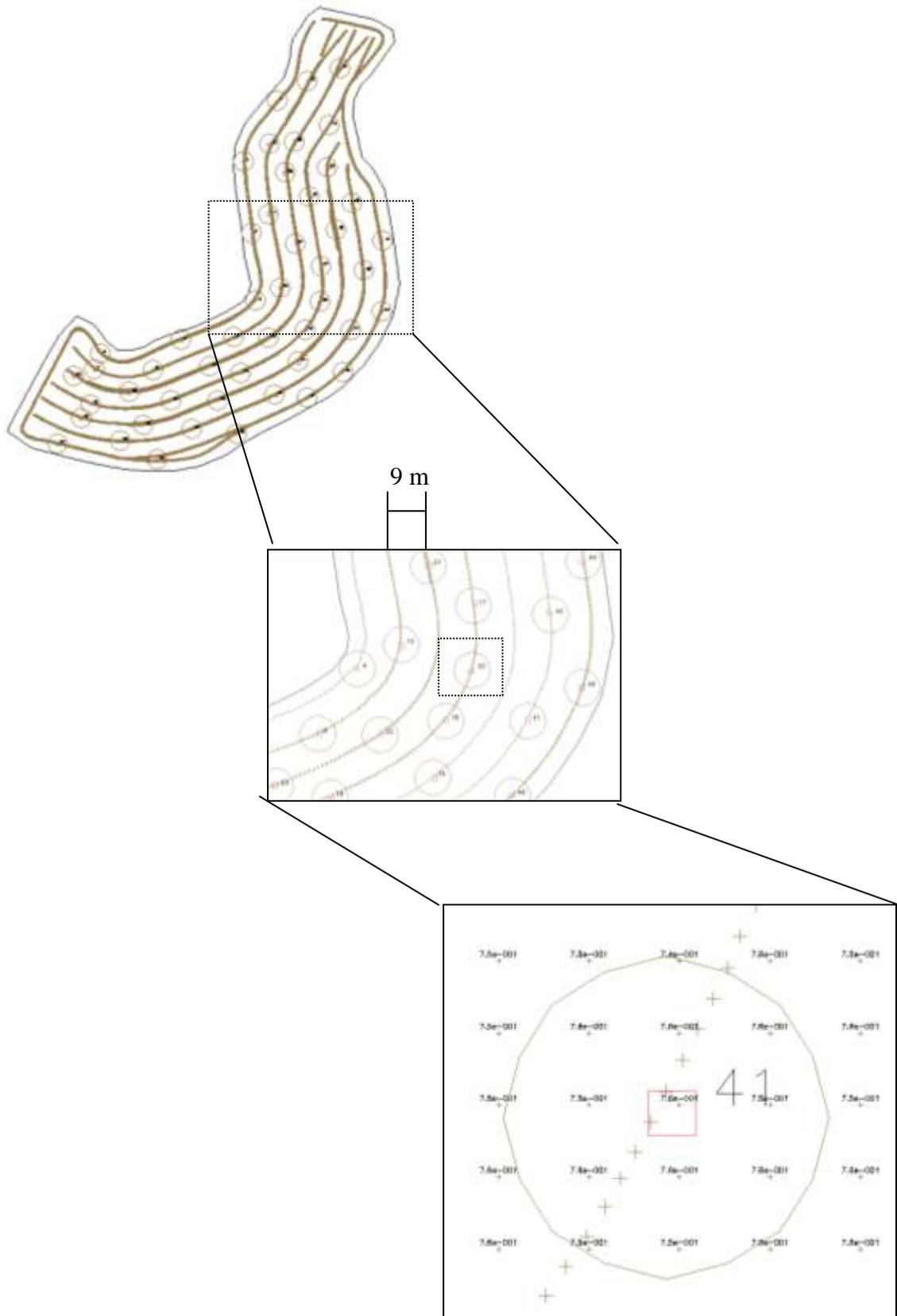


Figura 6 – Grade regular de pontos gerados pela interpolação, utilizando-se o método da média simples.

3.5 Determinação das variáveis agronômicas

3.5.1 Altura de plantas

Em todas as datas de leitura do NDVI, foi medida a altura das plantas. A amostragem foi realizada em 48 pontos georreferenciados (Figura 7). Foram efetuadas dez medidas de altura, em torno de cada ponto georreferenciado, distribuídas em um raio de 15 m. A medição foi realizada, com o auxílio de uma trena, considerando-se a altura da planta do solo até seu ápice.

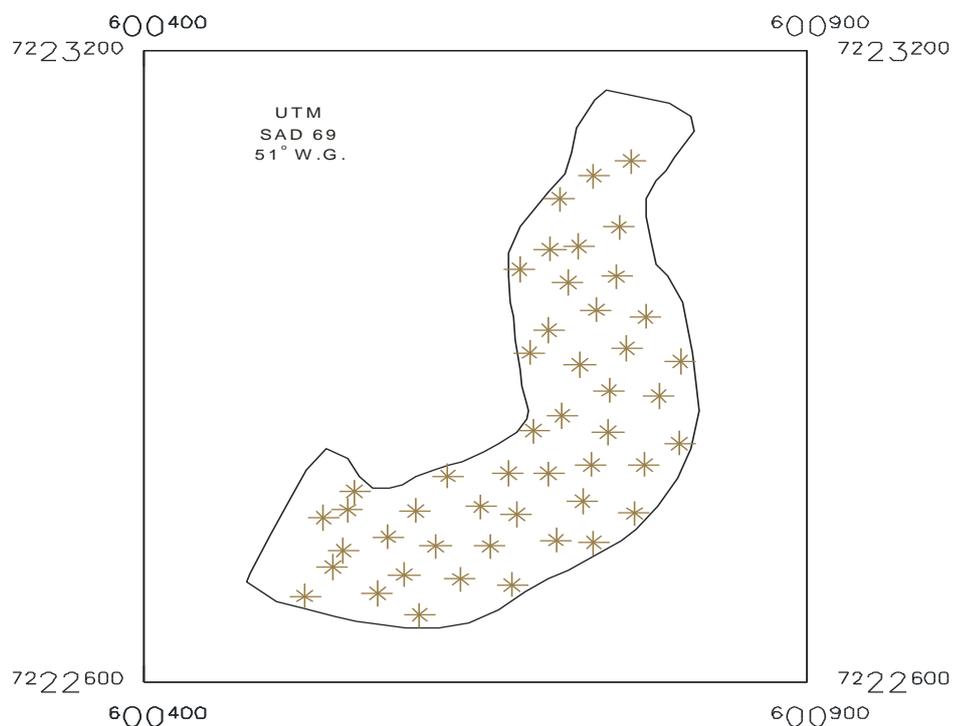


Figura 7 – Pontos georreferenciados utilizados na coleta de amostras para as variáveis agronômicas: altura de plantas, densidade de plantas, produtividade de MS, produtividade de grãos e análise química do solo.

3.5.2 Densidade de plantas

A determinação da densidade de plantas (plantas metro linear⁻¹) foi realizada em três datas de leitura do NDVI (12/12/08, 24/12/08 e 26/03/09).

A coleta das amostras para a determinação da densidade de plantas foi efetuada em 48 pontos georreferenciados. Mediu-se 1 m linear em cinco pontos distribuídos, aleatoriamente, em um raio de 15 m, em torno de cada ponto georreferenciado.

3.5.3 Produtividade de massa seca (MS)

A avaliação da produtividade de MS foi realizada nos 48 pontos georreferenciados, seguindo-se os mesmos critérios descritos na coleta de amostras para a densidade de plantas. As amostragens para esta variável foram realizadas após cada leitura do NDVI.

As amostras foram pesadas (em dinamômetro) e, em seguida, retirada uma subamostra para secagem em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 60°C por, aproximadamente, 72h. Após a secagem, o material foi novamente pesado e a produtividade de MS (t ha⁻¹) calculada.

3.5.4 Produtividade de grãos

Na data de colheita de grãos (07/04/09), efetuou-se a amostragem para a determinação da produtividade. Foram colhidas plantas inteiras, seguindo-se os mesmos critérios de amostragem descritos para a densidade de plantas e para a produtividade de massa seca.

Depois de colhidas, as amostras foram acondicionadas em sacos de náilon, para posterior debulha. Em função da grande quantidade de material, a debulha foi realizada com o auxílio de uma debulhadora de cereais da marca NUX, modelo BC 80 II. Posteriormente, os grãos foram pesados em balança semianalítica.

A umidade dos grãos foi determinada utilizando-se um medidor eletrônico, portátil, modelo GEOLE-400. Este aparelho possui um recipiente onde é feita a pesagem da amostra a ser analisada. Esta amostra é depositada no interior do medidor. A partir do valor da leitura no aparelho é consultada

uma tabela que apresenta uma escala denominada “B” - Baixa Umidade em que se identifica a umidade dos grãos. O princípio da determinação é por capacitância elétrica, com base nas propriedades dielétricas que os grãos apresentam em diferentes teores de umidade (Sousa, 2001). Posteriormente, ajustou-se a umidade para o padrão de 13,5% e, em seguida, calculou-se a produtividade de grãos ($t\ ha^{-1}$).

3.5.5 Análise química do solo

Na data de colheita dos grãos (07/04/09) também foram coletadas amostras de solo, nos 48 pontos georreferenciados, à profundidade de 0,20 m utilizando-se amostrador tipo calador. Para cada ponto, foram retiradas, aleatoriamente, dez subamostras, em raio de 15 m, em torno de cada ponto georreferenciado. Posteriormente, as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Solos da Universidade Estadual de Maringá para a realização da análise química de macronutrientes (Ca, Mg, K, e P) e de micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn), conforme metodologia estabelecida por Silva et al. (1999).

Calculou-se a porcentagem das amostras em cada nível de classificação dos nutrientes, a fim de identificar se os teores de nutrientes no solo, para a cultura da soja, estavam em níveis deficiente, baixo, médio ou alto, para os 48 pontos amostrados. Os nutrientes (Ca, Mg e K) foram classificados de acordo com os níveis propostos pela Embrapa (2008a) e os demais nutrientes (P, Cu, Fe, Mn e Zn) e o pH em H_2O , de acordo com os níveis apresentados por Pauletti (2004), conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Níveis de classificação (deficiente, baixo, médio e alto) dos nutrientes e do pH no solo para a cultura da soja

Parâmetros	Níveis de classificação			
	Deficiente	Baixo	Médio	Alto
K (cmol _c dm ⁻³)	-	≤0,25	0,25 a 0,50	>0,50
Ca (cmol _c dm ⁻³)	-	<2,0	2,0 a 4,0	>4,0
Mg (cmol _c dm ⁻³)	-	<4,1	4,1 a 8,0	>8,0
P (mg dm ⁻³)	≤5,0	5,1 a 10,0	10,1 a 14,0	>14,0
pH H ₂ O	<5,0	5,0 a 5,6	5,7 a 6,1	6,2 a 6,6
Cu (mg dm ⁻³)	-	<0,4	0,4 a 1,5	>1,5
Fe (mg dm ⁻³)	-	<15,0	15 a 40	>40
Mn (mg dm ⁻³)	-	<4	4 a 8	>9
Zn (mg dm ⁻³)	-	<0,8	0,9 a 1,5	>1,5

3.5.6 Análise foliar

Para a realização da análise foliar, foram coletadas amostras em 26 pontos georreferenciados determinados, visualmente, pela variação no desenvolvimento da cultura (Figura 8).

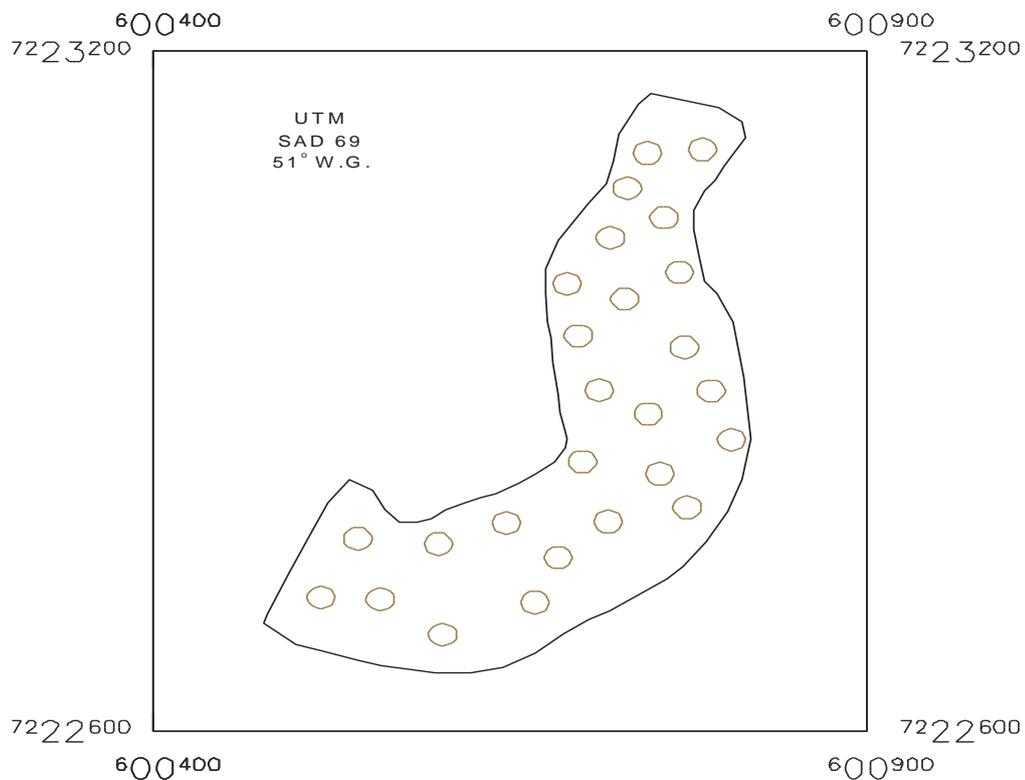


Figura 8 – Pontos de amostragem, georreferenciados, utilizados para a coleta de plantas para a análise foliar.

Em um raio de 25 m, ao redor de cada ponto georreferenciado, conforme recomendações de Miyazawa et al. (1999), foram colhidas 30 folhas recém-maduras, o que corresponde à terceira ou quarta folha a partir do ápice da haste principal, na fase de pleno florescimento.

As amostras foram acondicionadas, em sacos de papel, e encaminhadas para o Laboratório de Solos da Universidade Estadual de Maringá para a análise foliar de macronutrientes (Ca, Mg, K, P e S) e de micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn), conforme metodologia descrita por Miyazawa et al. (1999).

Para cada nutriente, calculou-se a porcentagem de amostras (26 pontos) em cada nível de classificação, para identificar se os teores foliares dos nutrientes estavam em níveis deficiente, baixo, suficiente, alto ou excessivo, de acordo com os níveis propostos pela Embrapa (2008a) (Tabela 3).

Tabela 3 – Níveis de classificação dos nutrientes (deficiente, baixo, suficiente, alto e excessivo) de acordo com os teores nas folhas de soja

Nutrientes	Níveis de classificação				
	Deficiente	Baixo	Suficiente	Alto	Excessivo
	----- g kg ⁻¹ -----				
P	<1,6	1,6 a 2,5	2,5 a 5,0	5,0 a 8,0	>8,0
K	<12,5	12,5 a 17,0	17,0 a 25,0	25,0 a 27,5	>27,5
Ca	<2,0	2,0 a 3,5	3,5 a 20,0	20,0 a 30,0	>30,0
Mg	<1,0	1,0 a 2,5	2,5 a 10,0	10,0 a 15,0	>15,0
S	<1,5	1,5 a 2,0	2,0 a 4,0	>4,0	–
	----- mg kg ⁻¹ -----				
Cu		<6	6 a 14	>14	
Fe	<30	30 a 50	50 a 350	350 a 500	>500
Mn	<15	15 a 20	20 a 100	100 a 250	>250
Zn	<11	11 a 20	20 a 50	5,0 a 75	>75

3.6 Análise estatística

Realizou-se a análise de regressão linear entre os pontos de amostragem, para cada variável agrônômica, e as leituras do NDVI em cada data de avaliação, utilizando o programa *Statistica* 8.0, a fim de verificar quais variáveis agrônômicas estabeleciam algum grau de relação com o NDVI, e em seguida, aplicou-se o teste F com níveis de significância de 1 e 5% para o

ângulo alfa, da equação de regressão, para verificar quais as variáveis agronômicas podem ser quantificadas por meio das leituras do NDVI.

3.7 Elaboração dos mapas

3.7.1 Krigagem

Para a elaboração dos mapas das variáveis agronômicas que apresentaram significância a 1%, utilizou-se a análise geoestatística dos dados. A etapa geoestatística aplicada foi exclusiva para a confecção dos mapas pelo método da krigagem e para o conjunto de dados que apresentaram estrutura de semivariograma, podendo os mesmos ser modelados.

3.7.2 Faixas de distribuição das classes das variáveis

Para a elaboração dos mapas de distribuição do NDVI, os valores de NDVI e das variáveis agronômicas foram divididos em faixas, utilizando-se o programa *Statistica* 8.0. As faixas de NDVI e das variáveis agronômicas (altura de plantas, densidade de plantas, produtividade de MS, produtividade de grãos e teores de nutrientes foliares) foram estabelecidas com base no intervalo interquartil gerando três níveis (alto, médio e baixo) distribuídos da seguinte forma: alto (25% dos valores), médio (50% dos valores) e baixo (25% dos valores). Os níveis foram divididos a fim de evidenciar a classe intermediária, ou seja, onde se concentra a maioria dos dados (50%) que é representada pela distribuição normal avaliada, através da curva de distribuição normal ou de Gauss, tal curva é fundamental para inferências estatísticas (Pasquali, 2010).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Precipitação

A precipitação total, registrada na área durante o ciclo, foi de 570 mm (Quadro 1A em Apêndice), sendo ideal para o bom desenvolvimento da cultura, que conforme recomendação da Embrapa (2004b) é de 450 a 800 mm. Quanto à distribuição, o ideal é que aumente com o avanço do desenvolvimento da soja, atingindo o máximo durante a floração/enchimento de grãos (7 a 8 mm dia⁻¹) e decrescendo após esse período.

A média diária, considerando-se todo o ciclo da cultura, foi de 3,9 mm dia⁻¹ com um déficit em relação à média, no mês de dezembro (Figura 9). O déficit hídrico pode atrasar o desenvolvimento da cultura, protelando o seu florescimento (Embrapa, 2008b), que no presente estudo aconteceu em meados de janeiro, quando a precipitação voltou ao normal.

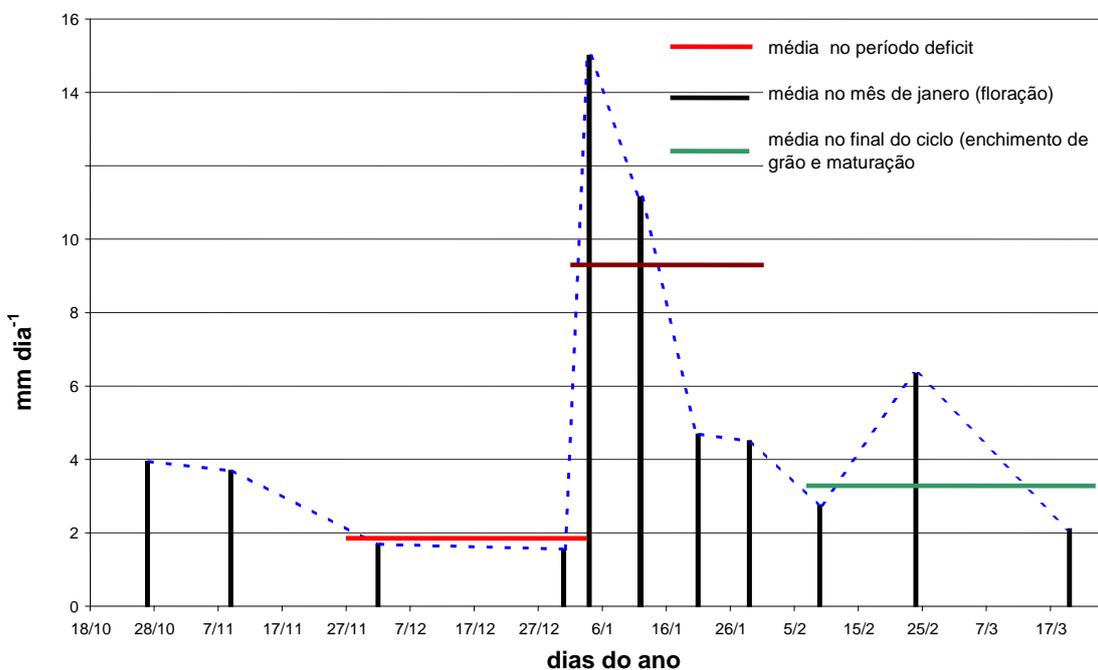


Figura 9 – Precipitação (mm) ocorrida durante o período de avaliação da cultura.

Déficits hídricos expressivos, durante a floração e o enchimento de grãos, provocam alterações fisiológicas na planta, como o fechamento estomático e o enrolamento de folhas e, como consequência, causam a queda prematura de folhas e de flores e o abortamento de vagens, resultando em redução no rendimento de grãos (Embrapa, 2008b), porém no presente estudo isso não ocorreu.

O CV entre as medições realizadas nos seis pluviômetros instalados na área variou de 2,69 a 8,56%. Estas informações podem ser visualizadas no Quadro 1A (em Apêndice). Com base nessas informações, pode-se afirmar que a distribuição da precipitação, na área de estudo, não influenciou o desenvolvimento da cultura, visto que os índices pluviométricos variaram pouco.

4.2 Dinâmica do NDVI nos estádios fenológicos da cultura da soja

Os valores de NDVI, medidos nos estádios fenológicos V5, V9, R1, R3, R6 e R8 (Figura 10), foram de 0,56, 0,65, 0,73, 0,76, 0,76 e 0,47, respectivamente. Observa-se que entre os EF V5 e V9, houve incremento de 16% no NDVI, entre V9 e R1 12%, reduzindo para 4% entre R1 e R3. Já entre os EF R3 e R6 os valores estabilizaram, decaindo, acentuadamente, no EF R8.

O incremento no NDVI até o estágio R3 (Figura 10) está associado ao aumento da reflectância do infravermelho próximo, resultante da sobreposição das folhas no dossel e, simultaneamente, do decréscimo de reflectância, na região do visível, em função do aumento de clorofila, decorrente do maior número de folhas verdes (Motta et al., 2003).

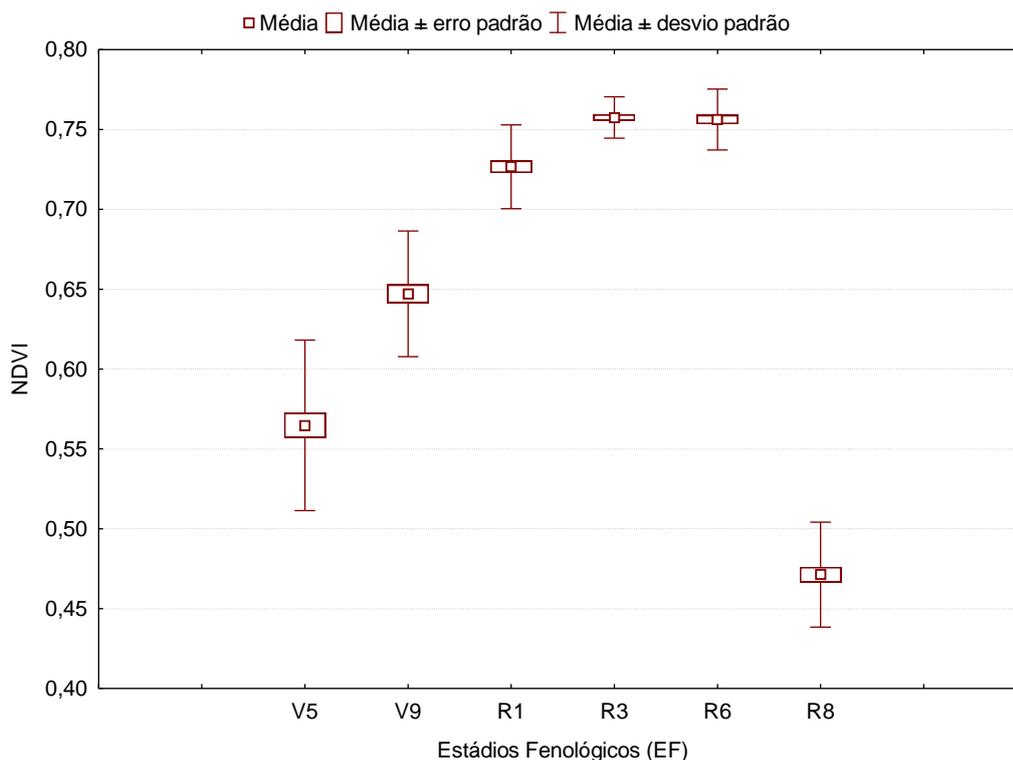


Figura 10 – Valores de NDVI de acordo com os estádios fenológicos da cultura da soja.

Por outro lado, a partir do momento em que a estrutura do dossel inicia os processos de maturação e senescência (R6 em diante), as folhas absorvem mais no infravermelho próximo refletindo menor quantidade de energia nesta região do espectro, e maior quantidade na região do visível (Assunção e Formaggio, 1989 citados por Silva, 2006).

Ferri et al. (2004) avaliaram, em condições de casa-de-vegetação, o NDVI da soja, e observaram que a estabilidade dos valores ocorreu entre os EF R2 e R5, muito próximo ao que foi obtido neste trabalho, com índices de 0,83 e 0,72 para as respectivas fases. De acordo com estes pesquisadores, a análise do NDVI, na cultura da soja, tem pouca ou nenhuma variação para EF posteriores ao R6, quando se inicia o processo de maturação.

Antunes et al. (1993), avaliando a variação das medidas espectrais, ao longo do ciclo da cultura da soja, observaram que o NDVI iniciou sua saturação (estabilização) em torno de 60 dias após a semeadura (EF R1), anteriormente ao observado neste trabalho. Desta maneira, pode-se concluir que a dinâmica do NDVI no desenvolvimento da cultura da soja, não segue um padrão, uma

vez que varia de safra para safra e é fortemente caracterizada pelas condições edafoclimáticas ocorridas durante o desenvolvimento da cultura.

Com relação ao desvio-padrão (Figura 10), os valores foram mais altos nos primeiros EF reduzindo até o EF R3, voltando a subir a partir do EF R6. Os maiores valores observados resultam dos maiores CV e podem estar relacionados à influência da cobertura do solo na leitura do NDVI. De acordo com Formaggio (1989) citado por Ferri (2002), no início do desenvolvimento predomina-se o solo exposto, em função da menor cobertura vegetal o que pode alterar o comportamento espectral do dossel.

Bauer et al. (1981) citados por Araújo (2004) avaliaram a resposta espectral do dossel das culturas de milho, soja e trigo, por meio de medições radiométricas na faixa do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio. Esses autores concluíram que, para os estádios iniciais de desenvolvimento da cultura (V1 a V5), boa parte da reflectância medida é proveniente da reflectância do solo. Sanches et al. (2005), ao correlacionar imagens TM e ETM+, do satélite LANDSAT com verificações de campo, tiveram dificuldades para identificar as culturas de cana-de-açúcar, soja e milho pela grande influência do solo na resposta espectral.

Os valores do NDVI, no final do ciclo da cultura (EF R8), foram inferiores aos obtidos no EF V5 estando de acordo com os resultados obtidos por Almeida e Fontana (2009) que relataram quedas acentuadas nos valores dos IV em função da senescência das plantas.

4.3 Relações entre NDVI e variáveis agronômicas

4.3.1 NDVI versus produtividade de grãos

De acordo com Ma et al. (2001); Antuniassi et al. (2007), existe correlação positiva entre a refletância do dossel das plantas, expressas em valores de NDVI, e a produtividade das culturas. No entanto, no presente estudo, com base nos coeficientes de determinação (r^2), observou-se correlação entre a produtividade de grãos e o NDVI somente para o EF V9. Para os demais EF, a correlação foi pouco expressiva, como pode ser verificado na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultado da regressão entre o NDVI e a produtividade de grãos

Dependente	Variáveis		Equações	r ²	p
	Independente				
Produtividade		NDVI V5	$y = 2,8929x + 1,418^{**}$	0,16	0,00
		NDVI V9	$y = 7,5610x - 1,840^{**}$	0,59	0,00
		NDVI R1	$y = 4,5236x - 0,234^*$	0,09	0,03
		NDVI R3	$y = 5,8861x - 1,406$	0,04	<i>ns</i>
		NDVI R6	$y = 6,4586x - 1,8316^*$	0,10	0,02
		NDVI R8	$y = 1,2237x + 2,476$	0,01	<i>ns</i>

*Significativo ($p < 0,05$); **Significativo ($p < 0,01$); *ns*: não-significativo.

No EF V5, o baixo coeficiente de determinação pode ter resultado da grande interferência do solo nesta fase. Conforme Dalmolin et al. (2005), vários elementos que compõem a superfície do solo (matéria orgânica, textura, composição mineralógica, rugosidade e umidade) podem afetar a reflectância do dossel e, por consequência, o NDVI. Esse conjunto de elementos é denominado de “superfície de fundo”, segundo Huete (1985) citado por Grohs (2008). Esta superfície de fundo, presente na entre linha da cultura, quando a mesma ainda não fechou completamente, interfere na resposta espectral do dossel que, por sua vez, afeta a determinação do NDVI.

A partir do EF R1, os baixos valores encontrados nos coeficientes de determinação podem resultar do pleno desenvolvimento da cultura, que faz com que a reflectância torne-se homogênea saturando o NDVI. Esta observação está de acordo com Myneni et al. (2002) que analisaram o NDVI, para diferentes dosséis, e verificaram que a saturação não permite a diferenciação de zonas que caracterizem a variação do dossel e que possam ser correlacionadas com a produtividade.

No EF V9, o coeficiente de determinação observado foi de 0,59. Assim, para se estabelecer a correlação das medidas de NDVI com a produtividade de grãos, recomenda-se que as leituras sejam realizadas neste EF. Esse é um fator que limita o uso deste índice para a estimativa da produtividade, pois eventos que ocorram posteriormente a este EF não serão quantificados. Dentre estes, tem-se como exemplo, o ataque de pragas, as doenças e outros danos ocasionados por fenômenos climáticos.

Batista et al. (1988) avaliaram duas cultivares de soja e encontraram coeficiente de determinação superior (0,76), porém essa avaliação foi feita em

parcelas, em que as medidas espectrais são mais precisas. Ma et al. (2001) também observaram coeficiente de determinação superior, de 0,80 no EF R5. Porém Holzapfel (2007), avaliando a correlação entre o NDVI e a produtividade de grãos de canola, obtiveram coeficientes de determinação, em diferentes EF, variando entre 0,00 e 0,63, para o ano de 2005 e de 0,25 a 0,53 para o ano de 2006, mostrando que as relações variam de um ano para o outro no mesmo EF.

Rudorff et al. (2003) avaliaram o NDVI na estimativa da produtividade de milho e observaram que não houve relação direta entre o NDVI e a produtividade de grãos para produtividades acima de 5 t ha^{-1} . Estes autores atribuem a limitação do uso do NDVI, na estimativa de produtividades superiores a 5 t ha^{-1} , ao elevado IAF. Entretanto, isto deve ser visto com cuidado uma vez que os valores de IAF variaram de 2,0 a 4,5, ou seja, aquém da saturação do NDVI para milho. Macedo e Rudorff (2003) observaram que o NDVI explicou 54% da variação na produtividade de grãos do milho safrinha, e os valores de NDVI variaram de 0,60 a 0,90 e a produtividade de 0,5 a $5,0 \text{ t ha}^{-1}$.

A Figura 11 apresenta a dispersão dos valores de NDVI e a produtividade de grãos no EF V9. Observa-se que com o aumento da produtividade os valores de NDVI aumentaram.

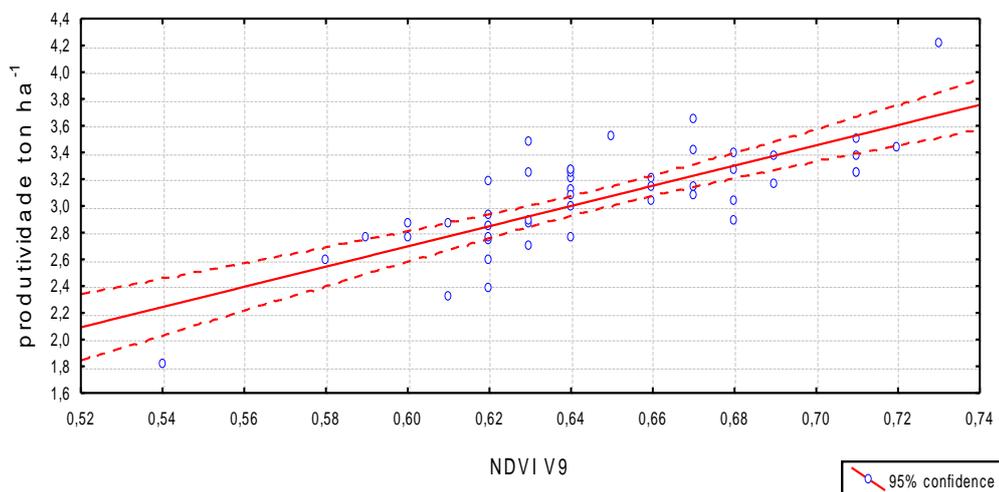


Figura 11 – Dispersão entre os valores de NDVI medidos no EF V9 e produtividade de grãos.

Para demonstrar a distribuição espacial do NDVI e a sua relação com a produtividade de grãos (Figura 12), os valores de NDVI foram divididos em três

classes: baixa (0,54 a 0,64), média (0,64 a 0,66) e alta (0,66 a 0,73); o mesmo foi realizado para a produtividade, com as seguintes classes: baixa (1,80 a 3,05 t ha⁻¹), média (3,06 a 3,12 t ha⁻¹) e alta (3,13 a 4,20 t ha⁻¹). As Figuras 12a, 12b e 12c mostram, respectivamente, a distribuição espacial do NDVI, da produtividade e a fusão entre NDVI e produtividade, para o EF V9. Na Figura 12c, as regiões indicadas pelas setas 1, 2 e 3, representam, respectivamente, as áreas em que as classes de NDVI e produtividade baixa, média e alta tiveram a mesma classificação. A área indicada pelas setas 1, 2 e 3 representa, respectivamente 26,9, 8,4 e 9,4% da área total avaliada, obtendo um percentagem total de acerto de 44,7% da área, ou seja, praticamente a metade da área avaliada (Quadro 2A em Apêndice).

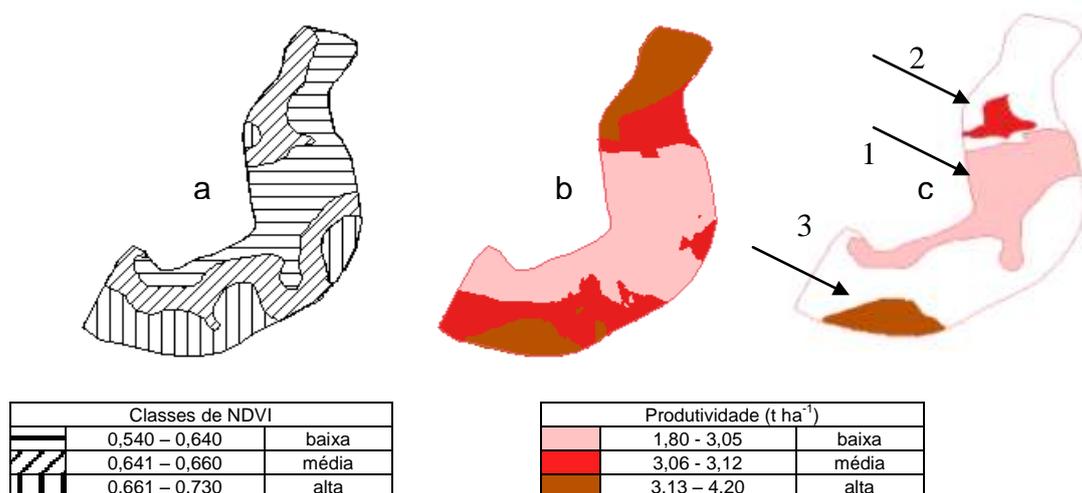


Figura 12 – Distribuição espacial do NDVI (a), da produtividade de grãos (b) e fusão entre a e b (c), para o EF V9.

No EF V9, observa-se o predomínio dos valores de NDVI nas classes baixa e média (Figura 12a). O mesmo comportamento foi verificado para a produtividade de grãos (Figura 12b) em que predominaram as faixas de produtividade baixa (1,80 a 3,05 t ha⁻¹) e média (3,06 a 3,12 t ha⁻¹).

4.3.2 NDVI versus produtividade de massa seca

De acordo com os coeficientes de determinação (r^2), observou-se melhor correlação entre a produtividade de MS e o NDVI somente para o EF V9 (Tabela 5), assim como observado para a produtividade de grãos (Tabela 4), no entanto, os valores de correlação foram menores. Como, de certa forma, a produtividade de grãos depende da produtividade de MS, era de se esperar que ocorresse o mesmo comportamento. Santos Júnior et al. (2001) observaram, para a cultura da soja, relação da produtividade de massa com o NDVI.

Tabela 5 - Resultado da regressão entre o NDVI e a produtividade de massa seca (MS)

Variáveis		Equações	r^2	p
Dependente	Independente			
MS	NDVI V5	$y = 2,8638x + 3,6094$ (*)	0,04	0,04
	NDVI V9	$y = 12,485x - 1,0747$ (**)	0,28	0,00
	NDVI R1	$y = 7,8714x + 3,2841$	0,04	<i>ns</i>
	NDVI R3	$y = 14,197x - 0,8292$	0,02	<i>ns</i>
	NDVI R6	$y = 20,688x - 5,3701$	0,10	<i>ns</i>
	NDVI R8	$y = 6,3323x + 7,0779$	0,03	<i>ns</i>

*Significativo ($p < 0,05$); **Significativo ($p < 0,01$); *ns*: não-significativo.

Os menores coeficientes de determinação, principalmente nos estádios mais avançados de desenvolvimento da cultura (R1 em diante), devem-se ao fato que a soja, nessas fases, apresenta saturação do NDVI e a reflectância é proveniente apenas das folhas superiores. De acordo com Moreira (2007a), a inserção foliar regula o grau de penetração da radiação no interior do dossel e a soja, por ser uma planta de inserção foliar planófila e/ou intermediária, após determinado estágio fenológico, a reflectância resulta apenas da parte superior do dossel, o que gera limitações para a utilização do NDVI. No entanto, Epstein et al. (2005), usando imagens de satélite para medição do NDVI e sua relação com a produtividade de massa de gramíneas, obtiveram coeficiente de determinação mais elevado (0,60).

Brandão et al. (2007) utilizaram imagens de satélite, provenientes do LANDSAT, para avaliarem a relação entre o NDVI e a massa total, de quatro tipos de vegetação no Estado do Ceará: vegetação semidensa, densa, nativa e

rala, e encontraram elevados coeficientes de determinação, respectivamente, 0,90, 0,99, 0,80 e 0,74. Lamb et al. (2009) avaliaram a massa de sorgo (*Sorghum bicolor*), usando sensor ativo CropCircle, e obtiveram coeficiente de determinação de 0,90. Hancock e Dougherty (2007), avaliando o NDVI, em alfafa, e sua relação com a MS produzida encontraram r^2 de 0,58.

Em todos os trabalhos anteriormente citados, para diversas culturas, encontrou-se r^2 elevado, assim, pode-se afirmar que existe potencial para o uso do NDVI na estimativa da produtividade de MS, porém, no presente trabalho, para a cultura da soja, isso não foi possível.

A Figura 13 apresenta a dispersão dos valores de NDVI e a produtividade de MS no EF V9. Observa-se que há um leve incremento da MS com o aumento do NDVI.

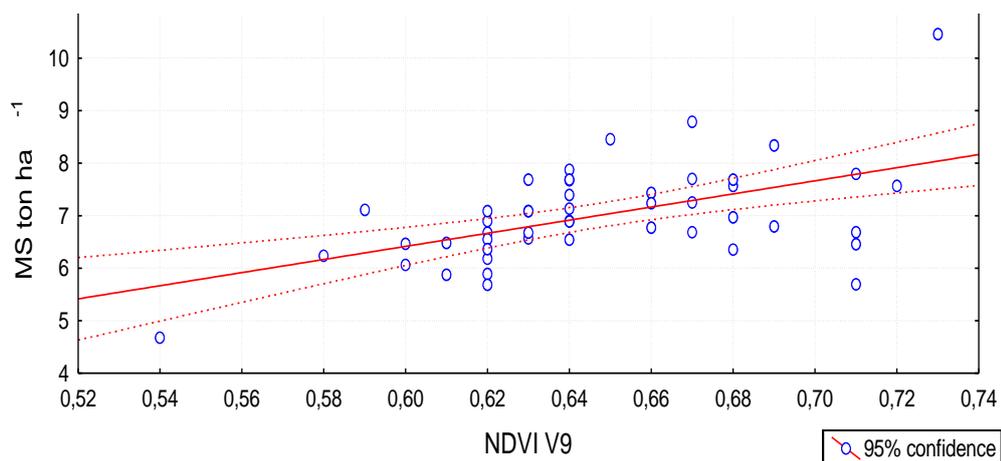


Figura 13 – Dispersão entre os valores de NDVI medidos no EF V9 e produtividade de massa seca (MS).

A distribuição espacial das classes baixa, média e alta do NDVI, as classes de MS e a fusão entre as informações anteriores, no EF V9, estão apresentadas nas Figuras 14a, 14b e 14c, respectivamente.

Observa-se o maior predomínio dos valores de MS nas classes baixa (4,60 a 6,95 t ha⁻¹) e média (6,96 a 7,30 t ha⁻¹) (Figura 14b), assim como verificado para a produtividade de grãos (Figura 12b).

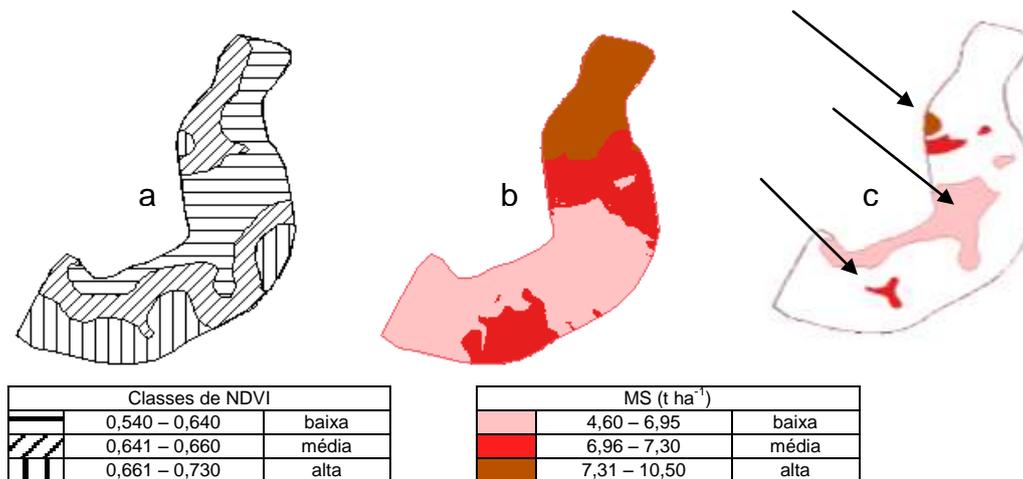


Figura 14 – Distribuição espacial do NDVI (a), da produtividade de MS (b) e fusão entre a e b (c), para o EF V9.

As áreas indicadas na Figura 14c representam as situações em que as classes de NDVI corresponderam às classes de MS, ou seja, classes alta, média e baixa de NDVI coincidiram, respectivamente, às produtividades de MS alta (0,9%) média (4,8%) e baixa (15,4%), obtendo percentagem total de acerto de 21,5% da área (Quadro 3A em Apêndice).

4.3.3 NDVI versus densidade de plantas

Para todos os EF avaliados, os coeficientes de determinação foram baixos (0,0036 a 0,0891) (Tabela 6) o que está de acordo com Araújo (2004), que obteve r^2 de 0,0838 avaliando a relação entre a densidade de plantas e o NDVI, obtidos por videografia aérea. De acordo com Mercante et al. (2009), baixos valores para a cultura da soja podem ocorrer em função do hábito de crescimento indeterminado e da alta capacidade de compensar falhas no estande, pela emissão de ramos laterais. Sendo assim, este fator pode limitar a percepção das mudanças do NDVI, quando existe variação na densidade de plantas.

Tabela 6 - Resultado da regressão entre o NDVI e a densidade de plantas (plantas m linear⁻¹)

Variáveis		Equações	r ²	p
Dependente	Independente			
Densidade	NDVI V5	y = 1,6935x + 8,1112	0,00	ns
	NDVI V9	y = 5,9345x + 5,2276	0,02	ns
	NDVI R1	y = 17,149x - 3,3937 (*)	0,08	0,03
	NDVI R3	y = 12,737x - 0,5808	0,01	ns
	NDVI R6	y = 13,412x - 1,0754	0,02	ns
	NDVI R8	y = 4,7499x + 6,8293	0,01	ns

*Significativo (p < 0,05); **Significativo (p < 0,01); ns: não-significativo.

Phillips et al. (2004) utilizaram os valores de NDVI, para estimar a densidade de plantas de trigo, e obtiveram r² de 0,74; essa correlação foi conseguida apenas até a população de 1.000 plantas m⁻², a partir dessa população, o NDVI não foi considerado um estimador da densidade. Ma et al. (2001), estudando três densidades de plantas de soja, em duas texturas de solo (arenosa e argilosa) e em dois anos consecutivos, concluíram que a densidade de plantas não apresenta relação com o NDVI. Já Ahmadi e Mollazade (2009), avaliando o NDVI, obtido por imagens de satélite, encontraram boa correlação para a densidade de plantas de soja (r² = 0,87).

4.3.4 NDVI versus altura das plantas

Para a altura das plantas (Tabela 7), os coeficientes de determinação foram baixos (0,00005 a 0,06600) assim como observado para a densidade de plantas (Tabela 6). Não houve relação entre o NDVI e a altura das plantas nos EF avaliados.

Tabela 7 - Resultado da regressão entre o NDVI e a altura de plantas

Variáveis		Equações	r ²	p
Dependente	Independente			
Altura	NDVI V5	y = -0,035x + 0,418	0,00300	ns
	NDVI V9	y = 0,0345x + 0,5137	0,00110	ns
	NDVI R1	y = 0,5444x + 0,2965	0,06600	ns
	NDVI R3	y = 0,8766x + 0,1135	0,03480	ns
	NDVI R6	y = 0,8584x + 0,1383	0,05810	ns
	NDVI R8	y = 0,0118x + 0,7819	0,00005	ns

ns: não-significativo

Araújo (2004), avaliando o NDVI, com videografia aérea na cultura da soja, obteve r^2 de 0,14 ($p < 0,01$) o que demonstra a limitação do uso do NDVI na estimativa da altura das plantas. Xavier et al. (2006), ao avaliar a altura de plantas de trigo, encontraram r^2 de 0,68, na fase de espigamento da cultura. Já Motomiya et al. (2009), avaliando a relação entre o NDVI e a altura de plantas de algodão, encontraram r^2 de 0,74.

Isso pode estar relacionado ao espaçamento da cultura, uma vez que na cultura do algodão o espaçamento entre linhas é maior e, assim, a cultura não fecha por completo, permitindo que a reflectância, maior ou menor, seja caracterizada pelo NDVI, sendo possível estabelecer relações entre este e a altura, o que não ocorreu para a cultura da soja.

4.3.5 NDVI versus teores de nutrientes nas folhas

A Tabela 8 demonstra que o cobre (Cu) foi o único nutriente que apresentou boa relação com o NDVI no EF R3 (quando foram coletadas as amostras para a análise foliar). O coeficiente de determinação (r^2) encontrado para este nutriente foi de 0,60 ($p < 0,01$).

Para esse nutriente, o elevado coeficiente de determinação pode ser explicado pelo fato que os sintomas de deficiência ocorrem nas regiões apicais (folhas jovens), facilitando a sua percepção de reflectância, representada pelo dossel superior da cultura.

Em estudo realizado por Adams et al. (2000), em laboratório, constatou-se que há possibilidade de se obter informações a respeito de deficiência de Cu usando dados de reflectância.

Tabela 8 - Resultado da regressão entre o NDVI e os teores de nutrientes nas folhas, no estágio fenológico R3

Variáveis		Equações	r ²	p
Independente	Dependente			
NDVI	Ca	y = -0,006x + 0,7923	0,07	ns
	Mg	y = -0,0106x + 0,7924	0,04	ns
	P	y = 0,0045x + 0,7252	0,01	ns
	K	y = 0,0034x + 0,6765	0,08	ns
	S	y = 0,0117x + 0,6777	0,17 (*)	0,03
	Fe	y = -0,0003x + 0,7789	0,13	ns
	Cu	y = 0,0079x + 0,6788	0,60 (**)	0,00
	Zn	y = 0,0008x + 0,7224	0,10	ns
	Mn	y = 0,0026x + 0,7016	0,17 (*)	0,03

*Significativo (p < 0,05); **Significativo (p < 0,01); ns: não-significativo.

A Figura 15 apresenta a dispersão dos valores de NDVI e teores de cobre nas folhas no EF R3. Apesar do número de amostras não ser elevado (26 pontos) foi possível estabelecer relações entre estas duas variáveis.

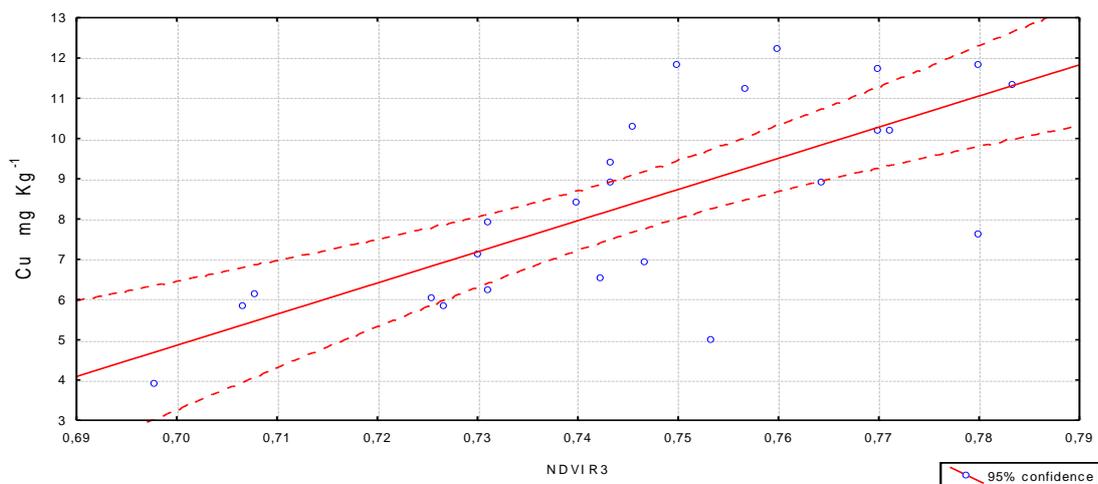


Figura 15 - Dispersão entre os valores de NDVI medidos no EF R3 e o teor de cobre nas folhas.

A Figura 16a representa a distribuição espacial das classes de NDVI, baixa (0,68 a 0,73), média (0,73 a 0,75) e alta (0,75 a 0,78), a Figura 16b a distribuição espacial para o Cu, nas classes baixa, média e alta e, a Figura 16c, a fusão entre o NDVI e os teores de Cu em que as áreas, indicadas por setas, apresentam relação entre o NDVI e os teores de Cu. Com base no Quadro 3A (em Apêndice) observa-se que houve percentagem de acerto total de 42,5%,

sendo distribuído da seguinte forma: 8,9%, 18,7% e 15,0%, respectivamente para as classes baixa, média e alta.

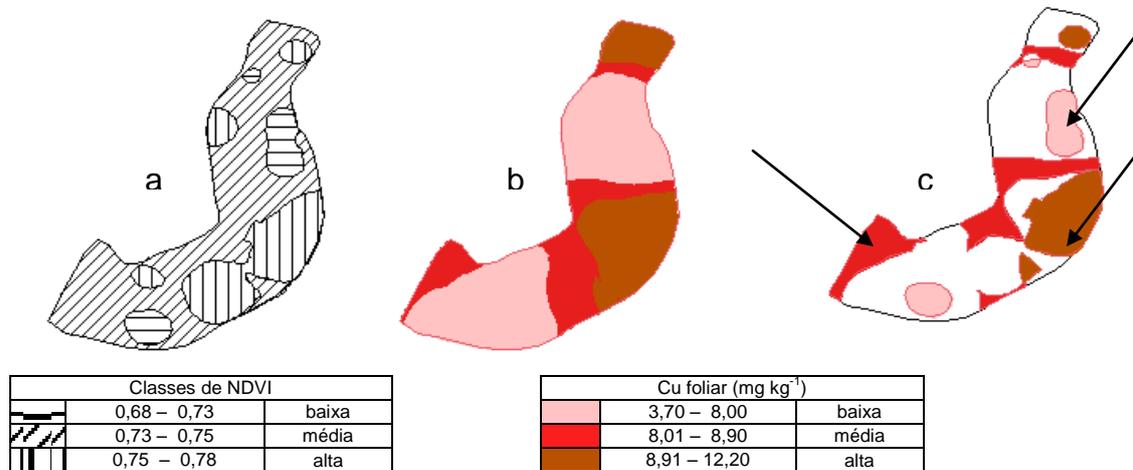


Figura 16 – Distribuição espacial do NDVI (a), dos teores foliares de Cu (b) e fusão entre a e b (c), para o EF R3.

De acordo com estudos laboratoriais de Adams et al. (2000), há possibilidade de se obter informações sobre a deficiência de nutrientes usando dados de reflectância. No entanto, a deficiência de mais de um nutriente ou excesso de nutrientes geram inúmeras combinações possíveis que podem anular ou alterar a composição da reflectância, gerando dificuldades na percepção da variação e na determinação de qual nutriente contribui, em maior ou menor grau, na reflectância que, por sua vez, irá gerar as faixas de NDVI.

Adams et al. (2000) também constataram que há possibilidade de obter informações sobre a deficiência de Mn usando dados de reflectância, porém, no presente estudo, o coeficiente de determinação para este nutriente foi baixo (0,17) (Tabela 8). Para o S, os resultados foram significativos, porém, o r^2 também foi baixo (0,17) e para os demais nutrientes os resultados não foram significativos.

Dos nutrientes avaliados grande parte apresenta teores nas folhas no nível suficiente (Quadro 5A em Apêndice), com exceção apenas do Cu, do Mn e do Zn. Para o Cu, 23% das amostras apresentam nível baixo. Para o Mn, a distribuição foi de 27, 58 e 15%, respectivamente para os níveis deficiente,

baixo e suficiente. O Zn por sua vez apresentou 12% das amostras no nível baixo, 85% suficiente e 3% alto.

O baixo r^2 demonstra que os níveis de variação foram estreitos ou nulos de tal forma que não geraram variações no dossel que fossem perceptíveis nas leituras do NDVI para a maioria dos nutrientes. No entanto, Osborne et al. (2002), avaliando a possibilidade de identificar a deficiência de P na cultura do milho, utilizando dados de reflectância multiespectrais e aplicando regressão multivariada, concluíram que nos EF V6 e V8, é possível identificar a deficiência de P.

Povh et al. (2008) verificaram que a detecção de deficiências, nos espectros de reflectância, apresentou alto potencial para o manejo da adubação nitrogenada nas culturas de trigo, triticales e cevada.

A variação dos NDVIs gera informações importantes do dossel, a variação, uma vez detectada, indica que há deficiência e essa deficiência gera zonas de manejos, que deverão ser verificadas *in loco* (Ponzoni, 2001; Silva Júnior, 2007). Portanto, a análise do NDVI serve como suporte para a coleta de amostras de folhas por faixas (zonas de manejo), para verificação e confirmação dos possíveis nutrientes que estão comprometendo o desenvolvimento da cultura.

5 CONCLUSÕES

O NDVI apresentou comportamento característico para o dossel de plantas, apresentando valores iniciais baixos e aumentando com o decorrer do desenvolvimento, reduzindo seu valor no final do ciclo.

As avaliações do NDVI na cultura da soja são apropriadas para estabelecer zonas de amostragem e/ou manejo, pois este índice de vegetação é sensível às variações do dossel para algumas das variáveis avaliadas, em determinados EF, como verificado para a produtividade de grãos no EF V9 e para os teores foliares de cobre, no EF R3.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, M.L.; NORVELL, W.A.; PHILPOT, W.D. et al. Micronutrient status spectral detection of micronutrient deficiency in 'bragg' soybean. *Agronomy Journal*, v.92, n.2, p.261–268, 2000.
- AHMADI, H.; MOLLAZADE, K. Determination of soya plant population using NDVI in the Dasht e Naz Agri-Industry. *Journal of Agricultural Science*, v.1, n.1 p.112-120, 2009. Disponível em: <<http://www.ccsenet.org/journal/index.php/jas/article/viewFile/1426/2197>> Acesso em: 12/08/2009.
- ALMEIDA, T.S. *Respostas espectrais da soja sob diferentes condições hídricas e de preparo de solo Porto Alegre*. 2008. 100f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- ALMEIDA, T.S.; FONTANA, D.C. Desempenho dos índices de vegetação NDVI e PVI para a cultura da soja em diferentes condições hídricas e de sistema de manejo do solo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal. *Anais...* Natal: INPE, 2009. p.17-22.
- ALMEIDA, T.S.; FONTANA, D.C. Influência da irrigação no comportamento espectral da soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14, 2006, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: CBMET, 2006.
- ANTUNES, M.A.H.; ASSAD, E.D.; BATISTA, G.T. Variação das medidas espectrais tomadas com espectraloradiômetro ao longo do ciclo de crescimento soja. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7, 1993, Curitiba. *Anais...* Curitiba: INPE, 1993. p.1-9.
- ANTUNIASSI, U.R.; BAIO, F.H.R.; SHARP, T.C. Agricultura de Precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 6, 2007, Uberlândia. *Anais...* Uberlândia: CNPA, 2007. Disponível em: <<http://www.cnpa.embrapa.br/produtos/algodao/publicacoes/cba6/palestras/1622.pdf>> Acesso em: 02/05/2009.
- ARAÚJO, J.C. *Determinação de zonas de manejo e estimativa da produtividade de culturas de grãos por meio de videografia aérea digital multiespectral*. 2004. 101f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004.
- BATISTA, G.T. Introdução ao sensoriamento remoto e processamento de imagens. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2005.
- BATISTA, G.T.; RUDORFF, B.F.T.; OVIEDO, A.F.P. Resposta espectral da soja e sua relação com parâmetros agronômicos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5, 1988, Natal. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 1988. p.406-413.

BERKA, L.M.S.; RUDORFF, B.F.T. Estimativa de área plantada com soja através de imagens Landsat em municípios do Norte do Paraná. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: INPE, 2003. p.27-31.

BLACKBURN, G.A. Wavelet decomposition of hyperspectral reflectance data For quantifying photosynthetic pigment concentrations in vegetation. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING HELD IN INSTABUL, 20, 2004, Turkey. *Proceedings...* Turkey: ISPRS, 2004. p.878-882. Disponível em: <<http://www.isprs.org/congresses/istanbul2004/comm7/papers/172.pdf> 12/08/09> Acesso em:12/08/2009.

BRANDÃO, Z.N.; BEZERRA, M.V.C; SILVA, B.B. Uso do NDVI para determinação da biomassa na chapada do Araripe. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: INPE, 2007. p.75-81.

CAVIGLIONE, J.H; KIIHL, L.R.B.; CARAMORI, P.H. et al. *Cartas climáticas do Paraná*. Londrina: IAPAR, 2000. (CD-ROM).

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. *Acompanhamento de safra brasileira: grãos, oitavo levantamento, maio/2009*. Brasília: Conab, 2009. 39p.

DAINESE, R.C. [2002]. *Análise e tratamento de informações espaciais de produtividade do milho e fertilidade do solo para uso em agricultura de precisão*. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/cursos/ser300/Trabalhos/renata.pdf>> Acesso em: 15/04/2009.

DAINESE, R.C.; MOREIRA, M.A.; MOLIN, J.P. et al. 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, 4, 2004, Piracicaba. *Anais...* Piracicaba: ESALQ/USP, 2004. p.1-13. Disponível em: <<http://br.monografias.com/trabalhos-pdf900/parametros-espectro-temporais/parametros-espectro-temporais.pdf>> Acesso em 15/04/2009.

DALMOLIN, R.S.D.; GONÇALVES, C.N.; KLAMT, E. et al. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.35, n.2, p.481-489, 2005.

DE ALENCASTRO GRAÇA, P.M.L. *Monitoramento e caracterização de áreas submetidas à exploração florestal na Amazônia por técnicas de detecção de mudanças*. 2004. 275f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

EMBRAPA. [2004a]. A soja no Brasil. In: ____ *Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil – 2004*. Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/SojanoBrasil.htm>> Acesso em 1/02/2010.

EMBRAPA. [2004b]. Cultivares de soja. In: ____ *Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil – 2004*. Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/cultivares.htm>> Acesso em 1/02/2010.

EMBRAPA. Correção e manutenção da fertilidade do solo. In: ____ *Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil – 2009 e 2010*. 1.ed. Londrina: Embrapa Soja: Embrapa Cerrados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2008a. p.65-77.

EMBRAPA. Exigências climáticas. In: ____ *Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil – 2009 e 2010*. 1.ed. Londrina: Embrapa Soja: Embrapa Cerrados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2008b. p.11-14.

EMBRAPA. Solos: Atualização do mapa de solos SiBCS. In: ____ *Carta de solos do estado do Paraná*. Curitiba: Embrapa Solos, 2009.

EPSTEIN, H.E.; WALKER, D.A.; JIA, G.J. et al. [2005]. *Climate, plant biomass, NDVI and LAI relationships along the full arctic bioclimate gradient*. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2005AGUFM.B33E1092E>> Acesso em 11/08/2009.

FARIAS, J.R.B.; NEPOMUCENO, A.L.; NEUMAIER, N. *Ecofisiologia da Soja*. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 10p (Embrapa Soja. Circular Técnica, 48).

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. [1977]. *Como a planta de soja se desenvolve* (Tradução de: Stages on soybean development). Disponível em: <[http://www.potafos.org/ppiweb/brazil.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/d5fbc829a2f54298832569f8004695c5/\\$FILE/Sojanovo3-5.pdf](http://www.potafos.org/ppiweb/brazil.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/d5fbc829a2f54298832569f8004695c5/$FILE/Sojanovo3-5.pdf)> Acesso em: 12/11/2009).

FERRI, C.P. *Utilização da reflectância espectral para a estimativa de pigmentos fotossintéticos em dosséis de soja [Glycine max (L.), Merrill]*. 2002. 152f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos, 2002. Disponível em:<http://www.obt.inpe.br/pgsere/2002-Ferri_C_P/> Acesso em: 11/08/2009.

FERRI, C.P.; FORMAGGIO, A.R.; SCHIAVINATO, M.A. Narrow band spectral indexes for chlorophyll determination in soybean canopies [*Glycine max* (L.) Merrill]. *Brazilian Journal Plant Physiology*, v.16, n.3, p.131-136, 2004.

FIGUEIREDO, D. [2005]. *Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto Setembro de 2005*. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf> Acesso em 15/08/2009.

FITZ, P.R. Sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas. In: ____ *Geoprocessamento sem complicação*. 1.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p.97-138.

FONTANA, D.C.; WEBER, E.; DUCATI, J.R. et al. Monitoramento da cultura da soja no centro –sul do Brasil durante *La Niña* de 1998/2000. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.10, n.2, p.343-351, 2002.

FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, J.C.N. *Características espectrais de culturas e rendimento agrícola*. São José dos Campos: INPE, 1990. 178p.

FREIRE, M.L.F.; BASTOS, E.J.B. Simulation of spectral planetary reflectance of targets. *Revista Brasileira Geofísica*, São Paulo, v.16, n.2-3, p.181-190, 1998. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0102-261X1998000200006escript=sci_abstract> Acesso em: 14/05/2009.

GROHS, D.S. *Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada pelo índice de vegetação por diferença normalizada*. 2008. 124f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/13769/000648773.pdf?sequence=1>> Acesso em: 11/08/2009.

GROHS, D.S.; BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M. et al. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.29, n.1, p.101-112, 2009.

HAMADA, E.; PINTO, H.S.; ZULLO JUNIOR., J.; ALMEIDA, C.A.S.; PELLEGRINO, G.Q. Relação entre a produção de biomassa de trigo e medidas multi-temporais de índice de vegetação (NDVI), a partir de dados AVHRR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, 1996, Salvador. *Anais...* Salvador: INPE, 1996.

HANCOCK, D.W.; DOUGHERTY, C.T. Relationships between blue- and red-based vegetation indices and leaf area and yield of alfalfa. *Crop Science*, v.47, n.6, p.2547-2556, 2007.

HOLZAPFEL, C.B. *Estimating nitrogen fertilizer requirements of canola (Brassica napus L.) using sensor-based estimates of yield potential and crop response to nitrogen*. 2007. 286p. Thesis (Master of Science – Soil Science) - Faculty of Graduate Studies of the University of Manitoba, 2007. Disponível em: <http://mspace.lib.umanitoba.ca/bitstream/1993/2996/1/Holzapel_Thesis_final_singlesided.pdf> Acesso em: 11/08/2009.

IMAI, N.N.; SARTORI, L.R.; SILVA, E.A. et al. Espectroradiometria de campo no visível e infravermelho próximo: um estudo da resposta espectral da soja. In: COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 3, 2003, Curitiba. *Anais...* Curitiba: CBCG, 2003. v.3 (CD-ROM).

JESUS, S.C.; MIURA, A.K. Análise de regressão linear múltipla para estimativa do índice de vegetação melhorado (EVI) a partir das bandas 3, 4 e 5 do sensor TM/Landsat 5. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal. *Anais...* Natal: INPE, 2009. p.1103-1110.

KOLLER, M.; UPADHYAYA, S.K. Relationship between modified normalized difference vegetation index and leaf area index for processing tomatoes. *Applied Engineering in Agriculture*, v.21, n.5, p.927-933, 2005.

LAMB, D.W.; TROTTER M.G.; SCHNEIDER D.A. Measuring and mapping crop vigour using an active optical sensor in an ultra low level aircraft. In: SYMPOSIUM ON PRECISION AGRICULTURE IN AUSTRALASIA, 13, 2009,

Armidale. *Proceedings...* Armidale: University of New England, 2009. p.31-40. Disponível em: <http://www.usyd.edu.au/agriculture/acpa/documents/Symposium_2009.pdf> Acesso em 15/05/2009.

LOURENÇO, R.W.; LANDIM, P.M.B. Estudo da variabilidade do índice de vegetação por diferença normalizada/NDVI utilizando krigagem indicativa. *Holos Environment*, Rio Claro, v.4, n.1., p.38-55, 2004.

MA, B.L.; DWYER, L.M; COSTA, C. et al. Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements. *Agronomy Journal*, v.93, n.6, p.1227–1234, 2001. Disponível em: <<http://agron.sci journals.org/cgi/reprint/93/6/1227>> Acesso em: 11/08/2009.

MACEDO, M.A.; RUDORFF, B.F.T. Geotecnologias no seguro agrícola do milho safrinha. *Agricultura em São Paulo*, v.50, n.1, p.43-52, 2003. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/publicacoes/pdf/asp-1-03-4.pdf>> Acesso em: 28/01/2010.

MACHADO, H.M. *Determinação da biomassa de cana-de-açúcar considerando a variação espacial de dados espectrais do satélite LANDSAT 7 - ETM+*. 2003. 61f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

MARTINI, P.R.; GODOI FILHO, J.; ARDUINO, R.G.C. et al. Sensoriamento remoto como suporte para estudos cartográficos sobre o território da América Portuguesa entre 1500 e 1822. *Anais do Museu Paulista*, v.17, n.1, p. 51-58, 2009.

MERCANTE, E.; LAMPARELLI, R.A.C.; OPAZO, M.A.U. et al. Características espectrais da soja ao longo do ciclo vegetativo com imagens landsat 5/TM em área agrícola no Oeste do Paraná. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.29, n.2, p.328-338, 2009.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; CARMO, C.A.F.S. et al. Análises químicas de tecido vegetal. In: EMBRAPA. *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. 1.ed. Brasília: Embrapa Solos, 1999. p.171-224

MORAES, E.C. [2002]. *Fundamentos de sensoriamento remoto instituto nacional de pesquisas espaciais*. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.18/doc/CAP1_ECMoraes.pdf> Acesso em: 04/11/2009.

MOREIRA, M.A. Noções básicas sobre vegetação e sua interação com a radiação solar. In: ____ *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. 3.ed. São José dos Campos: Editora Universidade Federal de Viçosa, 2007a. p.75-114.

MOREIRA, M.A. Metodologia de análise de dados coletados por sensores em nível do solo. In: ____ *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. 3.ed. São José dos Campos: Editora Universidade Federal de Viçosa, 2007b. p.203-212.

- MOTOMIYA, A.V.A.; MOLIN, J.P.; CHIAVEGATO, E.J. Utilização de sensor óptico ativo para detectar deficiência foliar de nitrogênio em algodoeiro. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental*, v.13, n.2, p.137–145, 2009.
- MOTTA, J.L.G.; FONTANA, D.C.; WEBER, E. Análise da evolução temporal o NDVI/NOAA em região de soja no Rio Grande do Sul: In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: INPE, 2003. p.197-204.
- MOTTA, J.L.G.; FONTANA, D.C.; WEBER, E. Verificação da acurácia da estimativa de área cultivada com soja através de classificação digital em imagens Landsat. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10, 2001, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu: INPE, 2001. P.123-129.
- MYNENI, R.B.; KNYAZIKHIN, Y.; PRIVETTE, J.L. et al. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, v.28, n.2, p.214-231, 2002.
- OSBORNE, S.L.; SCHEPERS J.S.; FRANCIS, D.D. et al. Detection of phosphorus and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements. *Agronomy Journal*, v. 94, n.6, p.1215-1221, 2002.
- PASQUALI, L. [2010]. *A curva normal*. Disponível em: <<http://www.psi-ambiental.net/pdf/PasqCap03.pdf>> Acesso em: 03/02/2010.
- PAULETTI, V. Coleta de amostras e interpretação de análises de tecido vegetal. In: ____ Nutrientes: Teores e Interpretações. 2ed. Castro: Fundação ABC, 2004. p. 21-24.
- PHILLIPS, S.B.; KEAHEY, D.A.; WARREN, J.G. et al. Estimating winter wheat tiller density using spectral reflectance sensors for early-spring, variable-rate nitrogen applications. *Agronomy Journal*, v.96, n.3, p.591–600, 2004.
- POLSAPALLI, S. *Development of software to process aerial images for agricultural purposes*. 2005. 151f. Thesis (Master of Science in Biological and Agricultural Engineering) - Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Louisiana, 2005.
- PONZONI, F.J. Comportamento Espectral da Vegetação. In: MENESES, P.R; MADEIRA NETTO, J.S. *Sensoriamento Remoto – Reflectância dos alvos naturais*. 1.ed. Brasília: UNB, Planaltina: Embrapa Cerrados 2001. p.157-199.
- POVH, F.P.; MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.M. et al. Comportamento do NDVI obtido por sensor óptico ativo em cereais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.43, n.8, p.1075-1083, 2008.
- RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T.; ADAMI, M. Estimativa da área de soja no estado do Rio Grande do Sul por um método de amostragem. *Revista Ciência Rural*, Santa Maria, v.36, n.1, p.30-35, 2006.
- RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T. Estimativa da produtividade de soja por meio de um modelo agrometeorológicoespectral: estudo de caso no Rio Grande do Sul.

In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. *Anais...* Goiânia: INPE, 2005. p.237-244.

RIZZI, R. *Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul*. 2005. 214f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

RUDORFF, B.F.T.; MOREIRA, M.A.; ADAMI, M. et al. Resposta espectral do milho e sua relação com altos níveis de produtividade de grãos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: INPE: 2003. p.2597–2603.

SANCHES, I.D.; EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. Culturas agrícolas em imagens multitemporais do satélite LANDSAT. *Agricultura em São Paulo*, São Paulo, v.52, n.1, p.83-96, 2005.

SANTOS JÚNIOR, R.F.; SANTOS, J.M.; RUDORFF, B.F.T. et al. Espectrorradiometria de campo no visível e infravermelho próximo para detecção de áreas infestadas com *Meloidogyne javanica* em soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE NEMATOLOGIA, 23, Marília. *Anais...* Marília: 2001. p.62-62.

SILVA, F.C.; EIRA, P.A.; VAN RAIJ, B. et al. Análises químicas para avaliação da fertilidade do solo. In: EMBRAPA. *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. 1. ed. Brasília: Embrapa Solos, 1999. p.75-170.

SILVA JÚNIOR, M.C.; PINTO, F.A.C.; QUEIROZ, D.M. et al. Utilização de imagens multiespectrais para detectar diferentes níveis nutricionais na forrageira *Brachiaria decumbens*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: INPE: 2007. P. 401-406.

SILVA, P.R. *Técnicas de sensoriamento remoto e radiometria aplicadas a vinhedos em duas regiões do Rio Grande do Sul, Brasil*. 2006. 87f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/8888/000590316.pdf?sequence=1>> Acesso em 04/09/2009.

SOUSA, L.V.S. *Propriedades físicas de grão de girassol relacionadas à armazenagem*. 2001. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2001.

SUGAWARA, L.M. *Avaliação de modelo agrometeorológico e imagens NOAA/AVHRR no acompanhamento e estimativa de produtividade da soja no estado Paraná*. 2001. 181f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/lise/2002/11.18.18.05/doc/homepage.pdf>> Acesso em: 04/11/2009.

SUN, P.; GRIGNETTI, A.; LIU, S. et al. Associated changes in physiological parameters and spectral reflectance indices in olive (*Olea europaea* L.) leaves

in response to different levels of water stress. *International Journal of Remote Sensing*, v.29, n.6, p.1725–1743, 2008.

VELLIDIS, G.; TUCKER, M.A.; PERRY, C.D. Predicting cotton lint yield maps from aerial photographs. *Precision Agriculture*, v.5, n. 6, p.547–564, 2004. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/q174nwl435w7t871/fulltext.pdf?page=1>> Acesso em: 11/11/2009.

WANG, Z. X.; LIU, C.; HUETE, A. From AVHRRNDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetationindex research. *Acta Ecologica Sinica*, v.23, n.5, p.979-988, 2003.

WEBER, E.; FONTANA, D.C.; DUCATI, J. et al. Comparação entre resultados de classificação de imagens LANDSAT e CBERS para estimativa de área cultivada com soja no planalto do Rio Grande do Sul In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. *Anais...* Goiânia: INPE, [2005]. (CD-ROM).

XAVIER, A.C.; RUDORFF, B.F.T.; MOREIRA, M.A. et al. Hyperspectral field reflectance measurements to estimate wheat grain yield and plant height. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.63, n.2, p.130-138, 2006.

ZULLO JÚNIOR, J. *Correções atmosféricas de imagens de satélite e aplicações*. 1994. 190f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

APÊNDICE

Quadro 1A – Precipitação pluviométrica medida nos seis pontos da área de estudo durante o período experimental

Pontos	Precipitação (mm)											
	27/10	09/11	02/12	31/12	04/01	12/01	21/01	29/01	9/02	24-02	20/03	Total
1	35	47	37	44	57	87	45	35	30	100	53	570
2	35	49	40	46	65	95	40	38	30	100	55	593
3	38	52	42	49	68	97	42	38	32	100	55	613
4	35	46	38	43	56	84	41	35	30	90	46	544
5	34	46	38	45	57	86	42	35	30	90	46	549
6	36	48	38	44	57	86	43	35	30	90	48	555
Média	35,50	48,00	38,83	45,17	60,00	89,17	42,17	36,00	30,33	95,00	50,50	570,67
CV	3,88	4,75	4,72	4,73	8,56	6,08	4,08	4,30	2,69	5,77	8,56	4,78
DP	1,38	2,28	1,83	2,14	5,14	5,42	1,72	1,55	0,82	5,48	4,32	27,27

Quadro 2A - Tabulação cruzada entre produtividade de grãos e o NDVI EF V9

Tabulação cruzada			Produtividade		
			baixa	média	alta
			-----%-----		
NDVI V9	baixo	%	26,9	5,4	6,0
	médio		19,6	9,4	6,9
	alto		3,1	14,3	8,4
Percentagem total de acerto					44,7

Quadro 3A Tabulação cruzada entre produtividade de MS e o NDVI EF V9

Tabulação cruzada			Massa seca		
			baixa	média	alta
			-----%-----		
NDVI V9	baixo	%	15,7	13,1	9,5
	médio		21,1	4,8	10,0
	alto		15,2	9,6	0,9
Percentagem total de acerto					21,5

Quadro 4A - Tabulação cruzada entre produtividade cobre (Cu) e e NDVI EF R3

Tabulação cruzada			Cu Foliar		
			baixo	médio	alto
			-----%-----		
NDVI R3	baixo	%	8,9	0,3	0,0
	médio		33,7	18,7	11,7
	alto		3,7	8,0	15,0
Percentagem total de acerto					42,6

Quadro 5A – Classificação das amostras coletadas (em porcentagem) de acordo com os níveis dos nutrientes (deficiente, baixo, suficiente, alto e excessivo) nas folhas de soja, conforme Embrapa (2008a)

Macronutrientes		Níveis de classificação				
		Deficiente	Baixo	Suficiente	Alto	Excessivo
		----- g kg ⁻¹ -----				
P	Faixa	<1,6	1,6 a 2,5	2,5 a 5,0	5,0 a 8,0	>8,0
	%	-	-	92%	8%	-
K	Faixa	<12,5	12,5 a 17,0	17,0 a 25,0	25,0 a 27,5	>27,5
	%	-	-	100%	-	-
Ca	Faixa	<2,0	2,0 a 3,5	3,5 a 20,0	20,0 a 30,0	>30,0
	%	-	-	100%	-	-
Mg	Faixa	<1,0	1,0 a 2,5	2,5 a 10,0	10,0 a 15,0	>15,0
	%	-	-	100%	-	-
S	Faixa	<1,5	1,5 a 2,0	2,0 a 4,0	>4,0	
	%	-	-	-	100%	
Micronutrientes		----- mg kg ⁻¹ -----				
Cu	Faixa		<6	6 a 14	>14	
	%		23%	77%	-	
Fe	Faixa	<30	30 a 50	50 a 350	350 a 500	>500
	%	-	-	100%	-	-
Mn	Faixa	<15	15 a 20	20 a 100	100 a 250	>250
	%	27%	58%	15%	-	-
Zn	Faixa	<11	11 a 20	20 a 50	5,0 a 75	>75
	%	-	12%	85%	3%	-