



FILIPE SILVEIRA TRINDADE

**MONITORAMENTO DA CULTURA DA SOJA
EM AGROSSISTEMA COM
ESPECTRORRADIÔMETRO ORBITAL DE
RESOLUÇÃO MODERADA**

**LAVRAS - MG
2018**

FILIFE SILVEIRA TRINDADE

**MONITORAMENTO DA CULTURA DA SOJA EM AGROSSISTEMA
COM ESPECTRORRADIÔMETRO ORBITAL DE RESOLUÇÃO
MODERADA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Marcelo de Carvalho Alves
Orientador

**LAVRAS - MG
2018**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Trindade, Filipe Silveira.

Monitoramento da cultura da soja em agrossistema com
espectrorradiômetro orbital de resolução moderada / Filipe Silveira

Trindade. – 2018.

86 p. : il.

Orientador: Marcelo de Carvalho Alves.

Dissertação (Mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. *Glycine max* L. 2. Merr. ciclo fenológico. 3. Índice de vegetação.
4. Produtividade. I. Alves, Marcelo de Carvalho. II. Título.

FILIPE SILVEIRA TRINDADE

**MONITORAMENTO DA CULTURA DA SOJA EM AGROSSISTEMA
COM ESPECTRORRADIÔMETRO ORBITAL DE RESOLUÇÃO
MODERADA**

**SOYBEAN CROP MONITORING IN AGRISYSTEM WITH
MODERATE RESOLUTION ORBITAL SPECTRORADIOMETER**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 05 de junho de 2018.

Prof. Dr. Sérgio Henrique Godinho Silva	UFLA
Dra. Margarete Marin Lordelo Volpato	EPAMIG

Prof. Dr. Marcelo de Carvalho Alves
Orientador

**LAVRAS - MG
2018**

AGRADECIMENTOS

A Deus, o criador de todas as coisas. Pelo dom da vida e pelas realizações durante minha trajetória neste plano.

Aos meus familiares que, mesmo distantes, incentivaram-me e apoiaram-me em todos os momentos, principalmente, aos meus pais Cássia Maria Silveira Trindade e Túlio José Trindade pelo constante amor e carinho.

À minha tia Clesne Maria da Silveira e à minha maravilhosa avó, Maria Luciana Dias Silveira, também minhas mães, sempre presentes em minha vida.

Aos amigos, que contribuíram de alguma forma para que eu pudesse chegar até aqui. Aos amigos do mestrado pela amizade, descontração e auxílio durante a pesquisa.

À Universidade Federal de Lavras, especialmente, ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de mestrado.

Ao meu orientador e à banca examinadora de qualificação e defesa, pela disponibilidade, conselhos e contribuições ao trabalho.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

As técnicas de sensoriamento remoto que utilizam os índices de vegetação (IV's) podem auxiliar no estudo de padrões espectrais e temporais da soja (*Glycine max* L. Merr.) e, associadas aos atributos edafoclimáticos, viabilizar o uso de insumos de forma econômica, a fim de proporcionar maior produtividade de grãos e menor impacto aos agrossistemas. Objetivou-se avaliar as relações espectrais e temporais dos índices *normalized difference vegetation index* (NDVI) e *enhanced vegetation index* (EVI) do sensor MODIS com a produtividade de grãos, relevo, textura e matéria orgânica do solo (MOS), durante o ciclo fenológico da soja em Campo Verde (MT), na safra 2012/2013, identificando os melhores estádios fenológicos para se gerar modelos preditivos sobre a variabilidade dos atributos do solo e a previsão da produtividade. Utilizaram-se o EVI / NDVI dos produtos do sensor orbital MODIS (MOD13Q1 e MYD13Q1) e a filtragem Savitzky-Golay (SG), para a correção dos ruídos (valores anômalos), presentes em séries temporais desses IV's. Foi feita a correlação de *Pearson* (r), considerando $P \leq 0,05$ entre as variáveis sob dois métodos de uso da filtragem SG na série temporal do ciclo. A filtragem SG corrigiu o ruído presente no perfil espectro temporal, além de melhorar a correlação do EVI com os atributos do solo. Os coeficientes de determinação (R^2) do EVI, no estágio R1 (56 dias após a germinação) com MOS, argila, silte e areia, foram, $R^2 = 0,77; 0,75; 0,74; 0,75$, respectivamente. Com NDVI no estágio fenológico R2 (64 dias após a germinação), obteve-se $R^2 = 0,44$ com a produtividade. A filtragem SG foi ferramenta necessária ao estudo diante dos ruídos presentes nas séries temporais dos IV's. A partir da imagem MODIS e informação do estágio fenológico com maior correlação espectral com os atributos do solo, pode-se realizar modelagem preditiva.

Palavras-chave: *Glycine max* L.. Merr. ciclo fenológico. Índice de vegetação. Produtividade.

ABSTRACT

The techniques of remote sensing that use vegetation indices (VI's) can help in the study of spatial and temporal patterns of soybean (*Glycine max* L. Merr.), and associated to the edaphoclimatic attributes, can also enable the economical use of inputs in order to provide higher grain yield and less impact on agrosystems. This study aimed to evaluate the spectral and temporal relationships of the MODIS sensor with normalized difference vegetation index (NDVI) and enhanced vegetation index (EVI) with grain yield, relief, texture and soil organic matter (MOS), during the phenological cycle of soybean in Campo Verde (MT) in the 2012/2013 harvest, identifying the best phenological stages to generate predictive models on soil attributes variability and productivity prediction. The EVI / NDVI of the MODIS orbital sensor products (MOD13Q1 and MYD13Q1) and the Savitzky-Golay (SG) filtering for noise correction (anomalous values) present in time series of these VI's were used. Pearson (r) correlation was made considering $P \leq 0.05$ between the variables using two methods of SG filtering in the time series of the phenological cycle. The SG filtering corrected the interference present in the series, and improved the correlation of the EVI with the physical attributes of the soil. The coefficients of determination (R^2) of EVI in the R1 stage (56 days after germination) with SOM, clay, silt and sand were, $R^2 = 0.77; 0.75; 0.74; 0.75$, respectively. With NDVI in the phenological stage R2 (64 days after germination) it was obtained $R^2 = 0.44$ with the productivity. The SG filtering was a necessary tool to study the noises present in the time series of the VI's. From the MODIS image and the information of the phenological stage with greater spectral correlation with the soil attributes, it is possible to perform predictive modeling.

Keywords: *Glycine max* L. Merr. phenological cycle. VI. Productivity.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Esquema representativo dos estádios fenológicos da soja durante uma série temporal de IV's. 19
- Figura 2 - Localização geográfica da área e malha utilizada na amostragem de solo. 33
- Figura 3 - Representação da forma de extração dos valores de EVI e NDVI pelos métodos propostos com o intuito de adquirir um valor único para o IV considerando todo ciclo fenológico. 42
- Figura 4 - Diagrama de fluxo da metodologia utilizada na construção da base de dados para geração de modelos e análises espaciais das séries temporais de índices de vegetação EVI/ NDVI com atributos do solo, relevo e produtividade da soja. 44
- Figura 5 - Precipitação total mensal, temperatura diurna e noturna, durante o ciclo fenológico da soja, na safra 2012/2013, em Campo Verde - MT. 45
- Figura 6 - Mapas de análise de terreno da área de estudo. 47
- Figura 7 - Mapas de distribuição espacial da MOS (g/dm^3), argila (%) e produtividade de grãos (sacas/ha) da área. 49
- Figura 8 - Perfis temporais de EVI extraídos em pontos amostrais com valores altos, médios e baixos da variável, usando os valores dos índices originais do sensor (SF), corrigindo os valores sem confiabilidade (FP) e corrigindo todos os valores da série temporal (FC). 51
- Figura 9 - Perfis temporais de NDVI extraídos em pontos amostrais com valores altos, médios e baixos da variável, usando os valores originais do sensor (SF), corrigindo os valores sem

	confiabilidade (FP) e corrigindo todos os valores da série temporal (FC).	52
Figura 10 -	Perfis de correlação de <i>Pearson</i> (r) dos valores de EVI e NDVI (SF) com a produtividade (sacas/ha), MOS (dag/kg), textura (%) e altitude (m) durante o ciclo fenológico.....	61
Figura 11 -	Perfis de correlação de <i>Pearson</i> (r) dos valores de EVI e NDVI (FP) com a produtividade (sacas/ha), MOS (dag/kg), textura (%) e altitude (m) durante o ciclo fenológico.....	62
Figura 12 -	Perfis de correlação de <i>Pearson</i> (r) dos valores de EVI e NDVI (FC) da série com a produtividade (sacas/ha), MOS (dag/kg), textura (%) e altitude (m) durante o ciclo fenológico.....	63
Figura 13 -	Relação linear e modelos de regressão das variáveis de campo com os valores de EVI e NDVI em estádios específicos do ciclo fenológico sob diferentes usos da filtragem SG. Valores de EVI e NDVI sem a filtragem (SF); valores de EVI e NDVI com pixels não confiáveis filtrados (FP); valores de EVI e NDVI completamente filtrados (FC).....	67
Figura 14 -	Correspondência espacial do EVI (estádio V5 e R1, 16/11/2012 e 02/12/2012, respectivamente) e NDVI (estádio R2, 10/12/2012) do sensor MODIS, em estágio do ciclo fenológico, que apresentaram as maiores correlações com argila (%), MOS (dag/kg) e produtividade (sacas/ha).....	69
Figura 15 -	Relação linear das variáveis de campo com os valores dos IV's obtidos pelos métodos área abaixo da curva (AAC) e valor máximo (VM), utilizando valores sem a filtragem (SF), parcialmente filtrados (FP) e totalmente filtrados (FC) considerando a malha amostral.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações básicas dos produtos de índice de vegetação (IV) do sensor MODIS.....	22
Tabela 2 - Descrição dos estádios de desenvolvimento do cultivar M 7639 RR.....	38
Tabela 3 - Descrição da Imagem <i>pixel reliability</i> do produto MOD13Q1 e MYD13Q1.....	39
Tabela 4 - Análise descritiva da produtividade de soja (sacas/ha), textura (%), MOS (g/dm ³), declividade (%) e altitude (m), a partir dos pontos amostrais, durante a safra 2012/2013.	48
Tabela 5 - Correlações de <i>Pearson</i> ($P \leq 0,05$) do EVI e NDVI com a produtividade (sacas/ha), MOS (dag/kg), textura (%) e altitude (m) nos estádios fenológicos da soja, utilizando valores físicos de EVI/NDVI originais do sensor MODIS (SF), com a correção dos pixels ruidosos (FP) e com a correção de todo o perfil espectro temporal (FC).....	56
Tabela 6 - Correlações do EVI com a produtividade (sacas/ha), MOS (g/dm ³), textura (%) e altitude (m) em cada tratamento de filtragem do IV e em cada método de extração de valor único para o ciclo fenológico.	71
Tabela 7 - Correlações do NDVI com a produtividade (sacas/ha), MOS (g/dm ³), textura (%) e altitude (m) em cada tratamento de filtragem do IV e em cada método de extração de valor único para o ciclo fenológico.	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Importância da soja, fenologia e interação dos atributos do solo com a planta	15
2.2	Sensoriamento Remoto (SR) aplicado à cultura de soja	18
2.3	Sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)	20
2.4	Índices de Vegetação (IV's)	23
2.5	Pré-filtragens e Filtragem Savitzky-Golay (SG)	26
2.6	Sensoriamento Remoto na Agricultura de Precisão (AP)	29
3	MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1	Área de Estudo	33
3.2	Coleta dos dados <i>in situ</i>	34
3.3	Coleta dos dados orbitais	36
3.4	Métodos adotados para uso da filtragem Savitzky-Golay (SG) na série temporal	40
3.5	Métodos para aquisição do valor único de EVI e NDVI que representa todo o ciclo fenológico	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	Caracterização do clima e do relevo da área de estudo na safra 2012/2013	45
4.2	Distribuição espacial dos atributos do solo e análise descritiva das variáveis	48
4.3	Análise da filtragem Savitzky-Golay (SG) com os diferentes métodos de tratamento dos valores de EVI e NDVI	50
4.4	Variação temporal do EVI e NDVI e a relação desses índices com as outras variáveis de campo em estádios fenológicos da soja	56
4.5	Relação das variáveis de campo com os IV's adquiridos pelos métodos de extração de valor único para o ciclo fenológico	71
5	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

A coleta de solo, em malhas amostrais na lavoura, aliada às técnicas de sensoriamento remoto (SR), principalmente, utilizando os índices de vegetação (IV's) pode auxiliar no estudo de padrões espectrais e temporais da soja (*Glycine max L. Merr*), durante seu ciclo fenológico e sua relação com os fatores que condicionam o seu desenvolvimento e produção, como os atributos do solo, clima e relevo. Isso viabiliza o uso de insumos de forma econômica, a fim de proporcionar maior produtividade de grãos e menor impacto aos agrossistemas.

Os sistemas específicos de gerenciamento agrícola no campo, também conhecidos como agricultura de precisão (AP), fornecem métodos que reduzem custos, otimizam os rendimentos da cultura e protegem o meio ambiente. Esse tipo de gestão agrícola requer o conhecimento da distribuição espacial das deficiências no campo e o uso das tecnologias agrícolas (LÓPEZ-GRANADOS et al., 2005).

O conhecimento da variabilidade dos atributos do solo, assim como as características da planta, também é importante, para o planejamento experimental agrícola, pois propiciam o manejo adequado. Esse manejo pode conduzir, gradualmente, à melhoria da qualidade do solo agrícola, elevando o potencial produtivo (QUEIROZ, 2009).

Com relação aos atributos físicos, a argila e o estado de agregação merecem destaque por estarem diretamente relacionadas com a susceptibilidade do solo à erosão e à retenção de água e nutrientes. Outro importante atributo indicador de qualidade do solo é o conteúdo de matéria orgânica, pelo fato de ser o principal agente de cimentação das partículas do solo, além de contribuir para capacidade de troca de cátions (CTC), aeração do solo e retenção de água, que, conseqüentemente, gera maior produtividade para a lavoura (SANTOS et al., 2012).

IV's representam a escala de resposta espectral da vegetação. A resposta espectral é a medida do vigor vegetativo da cultura, que pode ser afetada por fatores ambientais, de manejo e da própria planta. Com o uso dos IV's na agricultura, podem-se estimar a produção, deficiência de nutrientes, presença de patógenos e estresse hídrico (NEIVERTH et al., 2013; RISSO et al., 2009), indicar o crescimento e vigor da vegetação, diagnosticar vários parâmetros biofísicos, incluindo o índice de área foliar (IAF), biomassa, porcentagem de cobertura do solo, atividade fotossintética e produtividade, os quais têm apresentado elevados graus de correlação (PONZONI, 2001). Alguns estudos já utilizam esses índices, para prever atributos no solo, como argila e matéria orgânica (LÓPEZ-GRANADOS et al., 2005; ZANZARINI et al., 2013).

O sensor orbital *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), em alguns de seus produtos, disponibiliza dois tipos de índices de vegetação já calculados, denominados *normalized difference vegetation index* (NDVI) e *enhanced vegetation index* (EVI). Segundo Zanzarini et al. (2013), esses índices podem ser analisados, por meio de valores obtidos em diferentes datas, o que permite avaliar a variação da área verde, em certo período de tempo, que seriam as séries temporais de IV's.

Porém séries temporais de imagens de satélite podem estar sujeitas a interferências por diversos ruídos. Os ruídos são valores anômalos ocasionados por falhas de processamento, presença de nuvens, falhas do detector, geometria de visada, dentre outros (KOBAYASHI; DYE, 2005). Esses problemas tendem a criar dados anômalos em séries temporais de índices de vegetação (BRADLEY et al., 2007).

Para corrigir esses dados sem confiabilidade, a técnica de filtragem, desenvolvida por Savitzky e Golay (1964), chamada de filtragem Savitzky-Golay (SG), suaviza séries de dados e elimina os ruídos (SCHAFER, 2011). Johann et al. (2016) demonstraram que o filtro SG teve bom desempenho para

eliminar ou minimizar dados discrepantes (ruídos). Segundo Zhang et al. (2015), o filtro SG, para detectar a salinidade do solo usando séries temporais de IV's MODIS, foi método simples, embora robusto, pois suavizou o ruído presente na série temporal, reconstruindo-a com alta qualidade.

A aplicação do MODIS tem sido pouco explorada, para estudar a variabilidade do agrossistema, em nível de propriedade rural, utilizando os IV's, como o EVI e NDVI, para fazer a predição dos atributos no solo e previsão da produtividade, a partir da resposta espectral da cultura. Como hipótese deste trabalho, os atributos do solo e a produtividade de grãos podem ser estimados, com base na resposta espectral da cultura da soja, utilizando IV's em escala de propriedade rural.

Para sua comprovação, objetivou-se avaliar as relações espectrais e temporais dos índices NDVI e EVI do sensor MODIS com a produtividade de grãos, relevo, textura e matéria orgânica do solo (MOS), durante o ciclo fenológico da cultivar de soja M-7639 RR, identificando os melhores estádios fenológicos, para se gerar modelos preditivos sobre a variabilidade dos atributos do solo e a previsão da produtividade.

Outros objetivos foram: (i) avaliar qual índice relaciona-se, significativamente, com as variáveis estudadas; (ii) identificar se essas relações foram mais evidentes em estádios fenológicos específicas ou considerando um valor único para todo o ciclo fenológico; (iii) avaliar a aplicabilidade da filtragem Savitzky-Golay (SG) para eliminação dos ruídos na série temporal dos IV's e (iv) verificar as correlações proporcionadas pelos métodos de extração de um valor único para o ciclo fenológico propostas neste estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Importância da soja, fenologia e interação dos atributos do solo com a planta

A soja foi introduzida no Brasil, em 1908, por imigrantes japoneses, nos estados da região sul (Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul), entretanto, apenas a partir da década de 1970, observou-se o crescimento da sua produção no país (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2003). A partir da década de 1980, a soja se expandiu para os estados de Goiás, oeste de Minas Gerais, Bahia, sul do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, dentro do movimento agropecuário em direção ao Oeste brasileiro (IGREJA; PACKER; ROCHA, 1988). Fatores edafoclimáticos favoráveis à sojicultura e o apoio governamental brasileiro a essa cultura foram fundamentais para sua rápida expansão no país (MUELLER, 1992). A revolução verde proporcionou o avanço do setor agroindustrial, para essa região, principalmente, pela expansão da malha rodoviária.

A soja é uma das culturas que vem garantindo a sustentabilidade econômica da atividade agrícola no Brasil. A sua área de cultivo aumenta ano após ano, além de apresentar grande importância social e econômica, provendo mais de 64% do suprimento global de farelo de oleaginosas (SILVA et al., 2009).

Uma das principais causas do sucesso da expansão da soja, no Centro-Oeste brasileiro, principalmente, no estado de Mato Grosso (MT), foi a pesquisa e desenvolvimento de cultivares adaptados ao clima da região, permitindo seu florescimento somente após o bom desenvolvimento vegetativo (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005). Kolchinski, Schuch e Peske (2005) observaram que o uso de sementes de alto vigor proporcionou acréscimos de 20

a 35% no rendimento de grãos em relação ao uso de sementes de baixo vigor. Além disso, sementes de alto vigor asseguram o estabelecimento de lavouras com plantas de alto vigor.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2017), em 2016, no município de Campo Verde, MT, constatou-se área plantada de 216,5 mil hectares de soja, área colhida de 216 mil hectares e 671,6 mil toneladas de grãos produzidos. O valor da produção atingiu R\$805.920,00.

Descrevendo os estádios de desenvolvimento da soja, podem-se localizar os problemas, no decorrer do ciclo da cultura, para solucioná-los a tempo de não causar perdas de produção. A utilização da classificação dos estádios fenológicos da soja permite caracterizar o crescimento e desenvolvimento da cultura ao longo do espaço e do tempo (NEUMAIER; NEPOMUCENO; FARIAS, 2000).

O ciclo fenológico da soja pode variar da germinação até a maturação completa de 90 a 200 dias. De acordo com o tempo de duração do ciclo, as cultivares podem ser agrupadas em: precoce (até 115 dias), semiprecoce (116 a 125 dias), médio (126 a 137 dias), semitardio (138 a 150 dias) e tardio (mais de 150 dias) (FARIAS et al., 2000).

A planta da soja é uma dicotiledônia, e seu desenvolvimento pode ser dividido em dois períodos: o vegetativo, da semeadura até o florescimento e o reprodutivo, do florescimento até a colheita (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005). A sensibilidade da planta de soja à deficiência hídrica, quando dimensionada em termos de redução do rendimento de grãos, tende a aumentar com o avanço do ciclo da cultura, com sensibilidade mínima durante o estágio vegetativo e máxima durante a formação e enchimento dos grãos (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005).

A identificação exata dos estádios fenológicos da soja não é só útil, mas absolutamente necessária, para pesquisadores em seus estudos e, para

produtores, uma vez que a aplicação de insumos, na lavoura em estágio de desenvolvimento, não apropriados pode ter consequências econômicas, ecológicas e sanitárias graves (NEUMAIER; NEPOMUCENO; FARIAS, 2000).

O teor da matéria orgânica do solo (MOS) deve ser considerado, em práticas de manejo, pois, com o seu aumento, ocorre maior reciclagem e disponibilidade de nutrientes. A MOS pode ser considerada como sinônimo de fertilidade do solo. Sua presença no solo afeta sobremaneira seus atributos químicos, físicos e biológicos, aumentando a disponibilidade de macronutrientes para as plantas (FURTINI NETO et al., 2001), além de contribuir para a infiltração de água, agregação e aeração do solo, aumento da capacidade de troca de cátions (CTC), entre outros.

O teor de argila, além de suas relações com aspectos físico-hídricos no solo, tem relação direta com a CTC dos solos, favorecendo a retenção de nutrientes, assim como a manutenção da fertilidade (RONQUIM, 2010). A argila presente no solo funciona como uma proteção para a MOS, em razão da capacidade que ela tem em formar diferentes tipos de ligações com partículas com elevada superfície específica, dando proteção coloidal à MOS (SILVA; MENDONÇA, 2007).

O manejo, para obtenção de altas produtividades, na cultura da soja, é traduzido na interação clima, planta e solo, propondo o uso eficiente e racional dos fertilizantes (VITTI; TREVISAN, 2000). A absorção de nutrientes pela soja é influenciada por diversos fatores, entre eles, as condições climáticas, como precipitação e temperatura, as diferenças genéticas entre as variedades, o teor de nutrientes no solo e os diversos tratos culturais (BORKERT et al., 1994).

Apesar de o MT estar localizado em um bioma, naturalmente, pouco propício à produção agrícola pela baixa fertilidade do solo, o cerrado, seu relevo suavizado e condições climáticas são favoráveis para o cultivo da soja. Para suprir essa baixa fertilidade dos solos desse bioma, a utilização de técnicas de

manejo do solo e uso de tecnologias foram essenciais para tornar essa região a maior produtora de soja do Brasil, tais como a aplicação de corretivos e fertilizantes (LOPES; GUILHERME, 2000).

2.2 Sensoriamento Remoto (SR) aplicado à cultura de soja

Sensoriamento remoto é a tecnologia que permite obter imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre, por meio da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície. O termo sensoriamento refere-se à obtenção de dados, por meio de sensores instalados em plataformas terrestres, aéreas (balões, drones, aeronaves) e orbitais (satélites artificiais). O termo remoto remete ao fato de que a obtenção do dado é feita a distância (FLORENZANO, 2007).

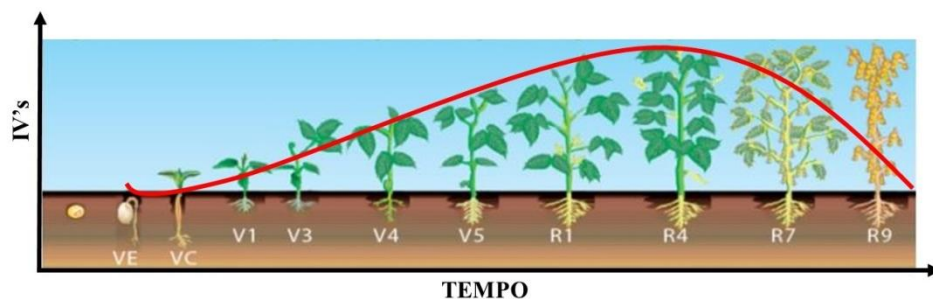
A utilização do sensoriamento remoto (SR) pode auxiliar na tomada de decisão, entendimento do ciclo da cultura da soja e sua relação com as variáveis do solo e da planta. Além disso, pode auxiliar no manejo da cultura, pois captura a variação temporal e espectral da soja, conforme a alteração das variáveis químicas e físicas do solo.

Dentre as várias tecnologias disponíveis, destacam-se as técnicas de SR, que permitem a obtenção de informações sobre um determinado objeto, área ou fenômeno, sem que haja contato direto, portanto não interferem no ciclo de desenvolvimento da soja (NEIVERTH et al., 2013). As técnicas de SR têm seu uso relatado na agricultura, desde a década de 60, para o mapeamento do solo e a previsão de safras, com o uso de fotografias aéreas (GROFF et al., 2013).

No monitoramento de culturas agrícolas, dada a sua dinâmica temporal, faz-se necessário o acompanhamento periódico. Assim é imprescindível a análise multitemporal (HOLBEN, 1986), ou seja, análise em múltiplas datas, para ter informações do padrão espectro- temporal, ao longo de todos os estádios

fenológicos da cultura (JENSEN et al., 2002), principalmente, utilizando os índices de vegetação (IV's), como demonstra a Figura 1.

Figura 1 - Esquema representativo dos estádios fenológicos da soja durante uma série temporal de IV's.



Legenda: (V) estágio vegetativo; (R) estágio reprodutivo.
Fonte: Adaptado de Adami (2010).

Com os avanços tecnológicos, o SR tem se mostrado ferramenta muito útil na agricultura, permitindo que os dados obtidos por sensores orbitais sejam utilizados. Com esses sensores, pode ser feito o monitoramento agrícola, controle de crescimento da vegetação, detectar presença de pragas na cultura, estimar a produtividade de grãos, determinar o índice de área foliar (IAF), a densidade de plantas, verificar o vigor vegetativo, dentre outros usos (GENÚ; DEMATTÊ; FIORIO, 2010).

A grande contribuição do SR está na obtenção de informações espaciais em locais específicos ou para uma grande área. Os avanços recentes no SR ofereceram a oportunidade de melhorar o conhecimento sobre as relações entre produtividade de soja e índices de vegetação (GALVÃO; FORMAGGIO; BREUNIG, 2009). A potencialidade das ferramentas de SR, no auxílio da detecção da variabilidade da produtividade da soja e o diagnóstico das possíveis causas dessa variabilidade, foram avaliadas por Wendling (2014) o qual utilizou

o espectrorradiômetro terrestre, um sensor ativo e imagem de satélite para diagnosticar as manchas de índices de massa da vegetação.

Moreno et al. (2014), com o objetivo de elaborar mapas temáticos precisos das culturas da soja no estado do Mato Grosso (MT), utilizaram imagens hiperespectrais de sensoriamento remoto.

Várias aplicações do SR, como o estudo de ambientes naturais e transformados e o monitoramento de fenômenos ambientais até a previsão de safras agrícolas, foram apresentadas por Jensen (2010) e Liu (2007). Os autores destacaram, inclusive, o SR como ferramenta com potencial de uso no manejo com precisão. Chaves et al. (2018) discutiram a necessidade de melhorar a detecção de culturas de soja e predição da produtividade, utilizando dados censitários de SR e de geoestatística. Eles verificaram que o emprego dessas técnicas propicia um monitoramento mais adequado da cultura da soja.

Utilizaram-se imagens do satélite LANDSAT e NOAA-14, para elaborar metodologias de auxílio no monitoramento e na previsão de safras de soja no Brasil (FONTANA et al., 2003). Foram utilizadas imagens NDVI, a cada 10 dias, para monitorar a evolução da biomassa. O monitoramento foi dificultado, na estação chuvosa, que coincidiu com a data de plantio da soja. Foi constatado que, para o avanço em previsão de safras, seriam necessários mais dados agrometeorológicos e estações modernas e automatizadas.

2.3 Sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

No ano de 1999, ocorreu o lançamento do primeiro sensor MODIS. Por ocasião do surgimento do MODIS, Huete et al. (1997) propuseram novo índice de vegetação, o EVI, que passou a ser disponibilizado pelo *Earth Observing System* (EOS), juntamente com o NDVI, desenvolvido por Rouse et al. (1973).

Com o advento do sensor MODIS, a bordo dos satélites Terra e Aqua, observou-se uma grande melhoria, na qualidade dos dados das imagens de SR com a correção geométrica e atmosférica, além do significativo aumento da resolução espacial, em comparação às imagens do sensor *Advanced High Resolution Radiometer* (AVHRR). O MODIS possui 36 bandas espectrais; as bandas 1 (620 – 670 nm) e 2 (841 – 876 nm) têm 250 metros de resolução espacial. As bandas de 3 a 7 (459 – 2155 nm) têm 500 metros de resolução. As demais bandas possuem 1 km de resolução espacial. O AVHRR apresenta resolução espacial de 1 km.

Produtos MODIS fornecem comparações temporais e espaciais consistentes com as condições de vegetação global, podem ser utilizados para monitoramento fotossintético das culturas agrícolas, apoiando na análise da atividade vegetal, como a fenologia, detecção de mudanças e interpretações biofísicas (SOLANO et al., 2010).

Os produtos MOD13Q1 e MYD13Q1 são alguns dos produtos gratuitos disponíveis pelo sensor MODIS, nos satélites Terra e Aqua, respectivamente (TABELA 1). Tais produtos possuem 12 tipos de subprodutos (*raster*), dentre elas, o NDVI, o EVI, o *pixel reliability*, *VI Quality*, reflectância na banda do vermelho, reflectância na banda do infravermelho e reflectância na banda do azul. Segundo Esquerdo, Coutinho e Antunes (2013), o uso combinado dos produtos MOD13Q1 e MYD13Q1 se mostrou útil em aplicações envolvendo o monitoramento multitemporal agrícola.

Tabela 1 - Informações básicas dos produtos de índice de vegetação (IV) do sensor MODIS.

Plataforma (Satélite)	Cod. Produto	Produto	Resolução Espacial	Frequência Temporal	Tipo de <i>raster</i>
Terra	MOD13Q1	IV	250m	16 dias	Tile
Terra	MOD13A1	IV	500m	16 dias	Tile
Terra	MOD13A2	IV	1000m	16 dias	Tile
Terra	MOD13A3	IV	1000m	1 Mês	Tile
Terra	MOD13C1	IV	5600m	16 dias	CMG*
Terra	MOD13C2	IV	5600m	1 Mês	CMG*
Aqua	MYD13Q1	IV	250m	16 dias	Tile
Aqua	MYD13A1	IV	500m	16 dias	Tile
Aqua	MYD13A2	IV	1000m	16 dias	Tile
Aqua	MYD13A3	IV	1000m	1 Mês	Tile
Aqua	MYD13C1	IV	5600m	16 dias	CMG*
Aqua	MYD13C2	IV	5600m	1 Mês	CMG*

Fonte: Do autor (2016).

Legenda: * Grade de modelagem climática.

As imagens *pixel reliability* presentes no produto MOD13 podem indicar os *pixels* confiáveis, dando qualidade para a informação do dado (MORAES; ROCHA, 2011). Os usuários podem consultar a informação do *pixel reliability* em vez do produto de *VI Quality* (DIDAN; HUETE, 2006).

O MODIS, apesar de apresentar resolução espacial moderada (250 x 250 m), é uma alternativa interessante, em razão das características: cobertura global diária, elevada acuidade radiométrica, facilidade de aquisição de dados, larga faixa de imageamento (imagens disponibilizadas, gratuitamente, em cenas de 1.200 x 1.200 km) e disponibilidade de bandas espectrais próprias para o monitoramento da vegetação (JOHANN et al., 2016).

A disponibilização rápida e ininterrupta das imagens do sensor orbital MODIS permite análises regulares da vegetação, em nível global, incluindo a avaliação de aspectos fenológicos da vegetação e a detecção de mudanças de uso e cobertura do solo (HUETE et al., 2002). A alta resolução temporal do MODIS se impõe à sua moderada resolução espacial, mostrando-se um produto confiável no monitoramento da fenologia de culturas agrícolas.

A cultura da soja, além de ser plantada em larga escala e em relevo plano a suavemente ondulado, possui características espectrais favoráveis, para sua identificação e mapeamento, por meio de imagens de satélites, até mesmo pelo sensor MODIS, com uma resolução espacial moderada, equivalente à área de 6,25 ha (SILVA JUNIOR et al., 2014).

Utilizar a resolução espacial moderada de 250 m e temporal, quase semanal, para estudos na cultura de soja no Mato Grosso, pode ser considerada adequada, principalmente, pelo fato de as grandes extensões das fazendas de produção de soja nesse estado, com talhões de produção comercial, muitas vezes, maiores que 100 hectares (ARVOR et al., 2008).

2.4 Índices de Vegetação (IV's)

IV's buscam combinar sob a forma de razões informações contidas na radiância refletida pelos dosséis da vegetação. Os parâmetros biofísicos da vegetação, como os estádios fenológicos de cultivos, mostram-se relacionados com suas variações espectrais e podem ser obtidos por IV's de sensores orbitais. Dentre os principais índices, destacam-se o NDVI e o EVI (HUETE et al., 2002). Trabalhos realizados com a cultura da soja, no Rio Grande do Sul, mostraram a utilidade do índice de vegetação, na caracterização das respostas das plantas aos fatores do ambiente, assim como para mapear a área ocupada pela cultura e estimar o rendimento de grãos (FONTANA et al., 2003; JACÓBSEN; FONTANA; SHIMABUKURO, 2003).

O EVI é um IV que tem melhorado a sensibilidade para regiões de alta biomassa. O algoritmo permite melhor desempenho do monitoramento da vegetação pela diminuição da influência do sinal proveniente do substrato abaixo do dossel e pela redução da influência atmosférica (HUETE et al., 1997, 2002).

No SR, há vários índices disponíveis para utilização, sendo o uso determinado de acordo com o objetivo da pesquisa (NEIVERTH et al., 2013). Glenn et al. (2008) observaram, em análises teóricas e estudos de campo, que os IV's estão entre as ferramentas mais antigas em estudos de SR e relacionados quase, linearmente, à radiação fotossinteticamente ativa absorvida por um dossel vegetal e, portanto aos processos fisiológicos dependentes da luz, como a fotossíntese. Inúmeros são os IV's e a maioria é obtida pelas medidas de reflectâncias nas faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximas ao espectro eletromagnético.

Galvão, Formaggio e Breunig (2009), utilizando dados do sensor hiperspectral Hyperion a bordo do satélite Earth Observing-1 (EO-1), calcularam e separaram os índices de vegetação da seguinte forma: *Atmospherically Resistant Vegetation Index* (ARVI), *Enhanced Vegetation Index* (EVI), *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Simple Ratio* (SR), *Carotenoid Reflectance Index* (CRI), *Visible Atmospherically Resistant Index* (VARI) e *Visible Green Index* (VIg). Estes são índices mais relacionados com pigmentos de folhas (clorofila e carotenoides). Já os índices *Moisture Stress Index* (MSI), *Normalized Difference Infrared Index* (NDII), *Normalized Difference Water Index* (NDWI) e *Water Band Index* (WBI) estão mais associados com o conteúdo de água das folhas. Os autores correlacionaram esses índices com a produtividade de grãos de soja em uma fazenda em Querência (MT). As melhores relações foram observadas com os índices associados ao conteúdo de água das folhas, NDWI (R=0,74) e WBI (R=0,47).

Diversos trabalhos utilizaram o índice de vegetação NDVI, proposto por Rouse et al. (1973), para mapear áreas vegetadas. O perfil temporal do NDVI foi utilizado, para detectar variações sazonais e interanuais, na fenologia de culturas, duração do período de crescimento, pico de verde, mudanças

fisiológicas das folhas e períodos de senescência dos grandes grupos vegetais do Rio Grande do Sul.

Com as séries temporais MODIS, o EVI foi correlacionado com o índice de área foliar e apresentou maior sensibilidade do que o NDVI em área de alta biomassa (HUETE et al., 2002). O EVI mostrou-se adequado, para o monitoramento agrícola, pois substituiu, com vantagens, o NDVI, por ser menos suscetível à saturação e mais sensível à variação da estrutura, arquitetura do dossel e fisionomia da planta (HUETE et al., 2002). Enquanto o NDVI atenua os efeitos do solo sobre a vegetação, o EVI foi desenvolvido para atenuar os efeitos do solo e da atmosfera no mapeamento de vegetação. Para a estimativa de áreas cultivadas, o EVI/MODIS apresentou melhores resultados (SILVA JUNIOR et al., 2014).

Em teoria, um IV ideal deve maximizar a resposta da vegetação verde, minimizando a influência de outros fatores indesejáveis na refletância da copa. Na prática, esse índice ideal não existe, o que explica o grande número de índices propostos após a primeira publicação do NDVI (BREUNIG et al., 2012).

As áreas de soja são melhor separadas, espectralmente, dos demais alvos, presentes na cena, utilizando o EVI em relação ao NDVI, o que pode auxiliar na identificação da cultura, especialmente, em regiões em que o tamanho dos talhões seja compatível com a resolução espacial do sensor MODIS, como o Centro-Oeste brasileiro (RIZZI; RUDORFF, 2007).

Para safra primavera - verão do Estado do Paraná (PR), as principais datas do ciclo da cultura de soja foram estimadas por Johann et al. (2016), usando séries temporais de imagens de EVI do sensor MODIS. O sensoriamento orbital apresenta uma potencialidade em estimar de forma objetiva períodos importantes do desenvolvimento fenológico da cultura da soja com o uso de IV's.

Perfis espectro temporais de NDVI, adquiridos por espectrorradiômetro terrestre, foram utilizados para comparar a resposta diferenciada da cultura da soja por diferentes cultivares, relacionando o perfil do NDVI com o ciclo fenológico (JUSTINA et al., 2013). As cultivares apresentaram comportamentos espectro- temporais de NDVI semelhantes ao ciclo fenológico, porém com diferenças significativas de NDVI, a 5% de significância, entre as cultivares.

A presença de nuvens e nebulosidade dificultou o monitoramento da cultura com índices de vegetação, pois o valor digital do índice foi alterado, como verificaram Fontana et al. (2003). Hird e Mcdermid (2009) e Ma e Veroustraete (2006) destacaram a necessidade de reduzir os ruídos, presentes no perfil temporal do NDVI e do EVI, antes de sua utilização em séries temporais. A redução desses ruídos foi feita utilizando as técnicas de filtragem dos valores digitais.

2.5 Pré-filtragens e Filtragem Savitzky-Golay (SG)

As séries temporais dos índices de vegetação podem apresentar oscilações inconsistentes em seus valores, em decorrência da presença de nuvens, outras influências atmosféricas e da geometria de aquisição da imagem, no momento da passagem dos satélites (ESQUERDO; COUTINHO; ANTUNES, 2013). Segundo Du et al. (2001), séries temporais de índices de vegetação, ainda, apresentam restrições ocasionadas por interferências atmosféricas, principalmente, cobertura de nuvens e de sombras.

A pré-filtragem consiste na aplicação de método simples, baseado em interpolação bilinear, para eliminar dados não válidos ou a ausência deles e de valores classificados com a presença de nuvem e de neve pelos dados de qualidade do *pixel*. Filtrar um sinal é deixar passar pelo sistema a informação de interesse e bloquear a informação indesejada. Oliveira (2014) apresentou uma

metodologia de filtragem que considerou a posição do *pixel* (localização no espaço) e o tempo (posição na série temporal) para definir um novo valor para o *pixel* ruim.

A técnica de suavização dos dados pelo filtro Savitzky-Golay é uma janela temporal que percorre os valores dos índices de vegetação de safra. Ao identificar a variação significativa no valor corrente, levando em conta a tendência dos próximos valores, descarta-se o dado corrente, caso este apresente uma variação percentual superior a 20%, no valor do índice, no período de 8 dias, que foi o tempo de registro entre uma imagem e outra (RAMME; LAMPARELLI; ROCHA, 2010).

A filtragem Savitzky-Golay (SG) é do tipo digital e pode ser aplicada ao conjunto de pontos de dados com o objetivo de suavização de dados, ou seja, aumentar a relação sinal-ruído sem distorcer muito o sinal digital. A filtragem é baseada em janela móvel, utiliza ajuste linear de quadrados mínimos por meio de sucessivas equações polinomiais. Os filtros SG são utilizados, para melhorar a visualização dos dados ruidosos; eles aplicam uma janela em movimento a um conjunto de dados da série temporal. Dentro da janela móvel (por exemplo, $2n + 1$ pontos, n é a largura de janela definida pelo usuário), a função polinomial quadrática é usada para englobar todos os pontos e, então, o valor do ponto central é substituído pelo valor ajustado (OLIVEIRA, 2014).

A possibilidade de estimar a data de plantio da soja e mudança de estágio fenológico, a partir de séries temporais de EVI e NDVI/MODIS, foi estudada por Adami (2010). Ele testou alguns filtros e teve o melhor desempenho com o filtro Savitzky-Golay, para minimizar ou eliminar o ruído, sem interferir na qualidade do dado do índice, com melhores resultados na estimativa das datas de plantio e acompanhamento fenológico.

O sensor MODIS, também, foi utilizado, para calcular os IV's (NDVI e EVI) e caracterizar o ciclo fenológico do algodão no Cerrado por Couto Junior,

Carvalho Junior e Martins (2013). O pleno uso desses índices só foi possível, utilizando a filtragem do dado para a redução das interferências atmosféricas, presentes nessas séries temporais, como a presença de nuvens no momento da aquisição da informação. Além de facilitar a caracterização fenológica da cultura, esses procedimentos podem dar suporte à produção regional e ao monitoramento de biomassa.

Existem diversos filtros de suavização dos valores digitais, porém o melhor é aquele que minimiza os valores anômalos sem descaracterizar o perfil temporal do índice de vegetação (ADAMI, 2010).

O método, baseado em procedimentos matemáticos estabelecidos, foi popularizado por Abraham Savitzky e Marcel J. E. Golay, que publicaram tabelas de coeficientes de convolução para vários polinômios e tamanhos de subconjuntos (SAVITZY; GOLAY, 1964).

Para mapear e quantificar diferentes culturas agrícolas no MT, utilizando o produto MOD13Q1 do sensor MODIS, Arvor et al. (2008) compararam seis diferentes técnicas de filtragem (Savitzky-Golay; Wavelets; 4253H twice; função duplo-logística; gaussiano assimétrico e Hants) para trabalhar com suas séries temporais de índices de vegetação. Dentre eles, o filtro Savitzky-Golay foi o algoritmo mais eficiente.

Savitzky-Golay (SG) é um clássico filtro de suavização de sinais analíticos e, também, encontra-se incorporado, na maioria dos *softwares* comerciais, para tratamento de dados. A função do algoritmo da filtragem é definir a origem do sinal; definir a largura do intervalo; definir o ponto central do intervalo; remover o ponto central do conjunto de pontos do intervalo; ajustar polinômio de grau variável aos pontos restantes, por meio do método de quadrados mínimos; utilizar o polinômio para estimar o valor do ponto removido; deslocar o intervalo para o ponto seguinte do sinal original e repetir o processo anterior.

A equação do processo de filtragem de uma série temporal de NDVI/EVI pelo filtro SG foi descrito por Oliveira (2014):

$$Z_t = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} C_i Y_{i+t}}{N} \quad (1)$$

em que Z_t é o novo valor de EVI/NDVI para a data t ; C_i é o coeficiente para o ponto i -ésimo valor da janela de análise do filtro; Y_{i+t} é o valor original do NDVI/EVI; m é a metade do tamanho da janela do filtro; e N é o número de pontos analisados ao longo da série temporal.

2.6 Sensoriamento Remoto na Agricultura de Precisão (AP)

Em meados dos anos de 1970 até o início de 1980, o uso de melhores métodos de estudo do campo, como as fotografias aéreas e amostragem de solo, resultaram em melhor conhecimento das condições do solo e das variadas culturas. Com o uso desses métodos, foi possível otimizar a produção da cultura, a gestão e o seu manejo por setores/zonas e não de forma generalizada. Evidenciou-se que, dessa forma, seria possível aumentar a rentabilidade e a proteção ambiental (ROBERT, 2002).

As variações em razão do tipo de solo, teor de nutrientes, água e a topografia são comuns e, para uma eficiência de manejo, é necessário mapear essas variações, para as culturas agrícolas, em nível de propriedade rural (SEELAN et al., 2003). A AP depende do manejo da variabilidade dos fatores que influenciam a atividade agrícola, e seu principal produto de tomada de decisões são mapas que fornecem a variação de parâmetros do solo (ANCHIETA, 2012).

Agricultores, em todo o mundo, estão constantemente procurando maneiras de maximizar seus retornos. Sensoriamento Remoto (SR), Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Sistemas de Posicionamento Global (GNSS) podem fornecer as tecnologias necessárias para que os agricultores pratiquem os benefícios da agricultura de precisão. Tanto o sensor MODIS dos satélites Terra e Aqua quanto o sensor *Thematic Mapper* (TM) e *Enhanced Thematic Mapper* (ETM) dos satélites Landsat 5 e 7 têm sido usados, na aquisição dos IV's, para estudos envolvendo culturas agrícolas.

Informações espaciais sobre os atributos do solo são vitais para melhorar o manejo e a produtividade das culturas. A amostragem do solo é uma técnica útil, para se obter tal informação, porém de alto custo, dependendo do número de amostras enviadas para o laboratório. Na amostragem em malha, as amostras são coletadas, ao redor de pontos pré-determinados e georreferenciados dentro da área de cultivo, para formar a amostra composta. Nesse tipo de amostragem, o mapa é criado, a partir da interpolação dos valores atribuídos aos pontos. Silva et al. (2002) procuraram identificar o número de amostras de solo a serem coletadas, para representar o grau da fertilidade do solo sob plantio direto, utilizando técnicas de posicionamento geográfico, em área cultivada com soja, com rotação de trigo, milho e aveia preta. Eles constataram que de 10 a 24 amostras seriam necessárias, mas assumem que o custo da análise laboratorial e da própria coleta inviabiliza a amostragem nessa quantidade.

Quando alguma fonte de informação secundária mais barata está disponível, ela poderia ser incorporada ao mapeamento dos atributos do solo, a fim de aumentar a precisão das estimativas de solo pré-dispostas a serem utilizadas na agricultura de precisão (LÓPEZ-GRANADOS et al., 2005) e reduzir custos.

Para a agricultura de precisão, a predição espacial dos atributos do solo viabiliza o uso de insumos de forma sustentável, econômica e ambientalmente.

Para Noetzold (2015), cada fase do ciclo da AP (preparo do solo, semeadura, acompanhamento da lavoura e colheita) é de fundamental importância, para obter redução dos custos de produção, diminuição dos problemas ambientais e aumento da produtividade das culturas.

A AP utiliza a informação georreferenciadas, na área de produção, baseada na variabilidade do solo e clima, tendo o objetivo de reduzir os custos de produção e aumento da produtividade. Com essa tecnologia acoplada às ferramentas de SR, podem-se realizar a análise da vegetação e a detecção da variabilidade de atributos do solo (ZANZARINI, 2013).

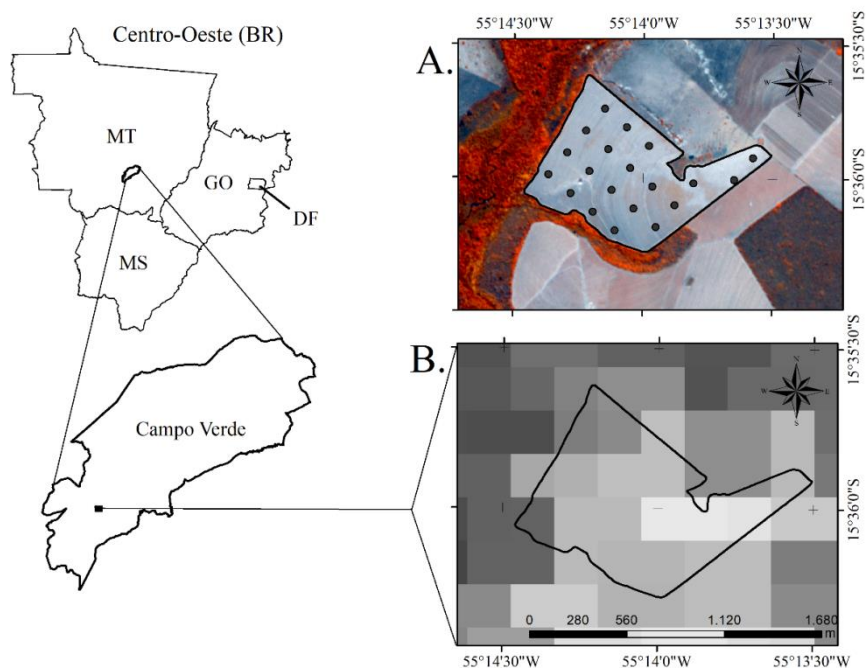
No Mato Grosso, a sojicultura de precisão apresenta grande potencial de instalação, principalmente, pelo mercado abrangido por esse grão e pelo seu custo de produção, o qual aumentou nos últimos anos, assim como o custo operacional e variável. Rizzi e Rudorff (2007) utilizaram imagens MODIS, para estimar valores de índice de área foliar (IAF), para usar em modelo agrônomico espectral, visando estimar a produtividade de soja no Rio Grande do Sul.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

Os dados *in situ* desta pesquisa foram coletados, no município de Campo Verde, em uma fazenda produtora de soja, na região Sul de Mato Grosso (MT) (FIGURA 2). O clima da região é tropical quente e subúmido (Aw), segundo o sistema de classificação de Köppen-Geiger, a temperatura média é de 22,3 °C com pluviosidade média anual de 1726 mm (DADOS..., 2017).

Figura 2 - Localização geográfica da área e malha utilizada na amostragem de solo.



Legenda: Área de estudo e malha amostral sobre uma imagem Rapideye com *pixel* de 5x5 metros (A) e a área de estudo sobre uma imagem EVI/MODIS com *pixel* de 250x250 metros (B) no município de Campo Verde - MT.

Fonte: Do autor (2016).

O município apresenta elevado potencial produtivo, certo grau de desenvolvimento e localização estratégica em termos de escoamento produtivo. Algodão, milho e soja são alguns dos principais produtos agrícolas produzidos. O solo predominante da região é o Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico (SANTOS et al., 2013). O relevo apresenta declividade plana a suave ondulada (IBGE, 2007).

A semeadura ocorreu, no dia 29 de setembro de 2012, com espaçamento entre linhas de 0,45 m. O talhão foi preparado sob cultivo mínimo, sendo realizada a semeadura sobre a palhada da cultura anterior (milho), com a cultivar M 7639 RR, de hábito de crescimento indeterminado e ciclo semiprecoce (115 a 120 dias). Desde 2010 foi adotado o sistema de cultivo mínimo e a adubação em taxa variável nesse talhão.

Com base em mapas de recomendação, foi feita a aplicação em taxa variável de fertilizantes, aos 30, 20 e 10 dias, antes da semeadura da soja, para que as plantas tivessem condições nutricionais adequadas e, conseqüentemente, obter a produtividade de grãos desejada. Foram aplicados calcário, superfosfato simples (SS) e o cloreto de potássio (KCl), para a homogeneização da fertilidade do solo da área, seguindo as recomendações da Embrapa (2011).

3.2 Coleta dos dados *in situ*

Dados de textura, matéria orgânica do solo (MOS), terreno e produtividade de grãos por ponto amostral em malha regular foram coletados, em talhão comercial de produção de soja, com área de 93,13 ha. A amostragem de solo foi realizada, em agosto de 2012, na profundidade de 0,0 a 0,20 m. Cada ponto amostral foi representado por uma amostra composta, coletada em cinco locais, com distância entre eles de 60 a 80 metros, representando quadrícula de, aproximadamente, 4 hectares, sendo coletados 20 pontos amostrais na área

(FIGURA 2A). Foi utilizada parafusadeira com broca de uma polegada de diâmetro, acoplada em moto modelo bross 150 CC, com GPS Mio P 350, configurado em datum WGS 84, fuso 21S para realizar a coleta.

Logo após a coleta, as amostras de solo foram encaminhadas ao laboratório para efetuar a análise textural (teores de argila, areia e silte) e MOS. A partir da determinação do carbono (C) e uso de um fator de conversão ($1,724 \times C$), a MOS (dag/kg) foi obtida pela extração em dicromato de sódio 4 mol/L e ácido sulfúrico 10 mol/L.

Os dados de produtividade foram quantificados, em fevereiro de 2013, compreendendo a safra 2012/2013. Na colheita, as plantas foram retiradas, manualmente, amarradas e identificadas por ponto amostral. Em seguida, foram levadas para dois barracões arejados, onde permaneceram até a secagem. As amostras muito úmidas, em virtude do alto índice pluviométrico, no mês de janeiro, foram expostas ao sol ou fogareiro, para acelerar o processo de secagem. Após a secagem, foram retiradas das amostras as impurezas, utilizando peneira, com auxílio de ventilador e determinaram-se a massa e o teor de água de cada amostra. Utilizaram-se balança de precisão e medidor de umidade modelo G650 para a obtenção da produtividade final. A produtividade final de grãos de soja foi obtida pela padronização do teor de água a 14% conforme a equação de Weber (2005) (Equação 2).

$$M_f = M_i \left(\frac{100 - U_a}{100 - U_p} \right) \quad (2)$$

em que M_f é a massa final; M_i é a massa inicial; U_a é a umidade atual e U_p é a umidade padronizada.

Foram calculados a média, valor máximo, valor mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) para MOS, textura, produtividade e altitude. A partir da amostragem de solo, foram gerados mapas especializados da MOS, argila e produtividade, usando o método de Interpolação pela Ponderação do Inverso da Distância (IDW). Esses mapas foram reclassificados de acordo com as classes de interpretação da fertilidade do solo (ALVAREZ et al., 1999).

O método IDW baseia-se na dependência espacial, isto é, supõe que quanto mais próximo estiver um ponto do outro maior deverá ser a semelhança entre seus valores. Dessa forma, atribui maior peso para as amostras mais próximas comparadas às amostras mais distantes do ponto a ser interpolado (EQUAÇÃO 3):

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \quad (3)$$

em que z são os valores estimados; n são os números de amostras; z_i os valores conhecidos; d_i as distâncias entre os valores conhecidos e estimados (z_i e z).

3.3 Coleta dos dados orbitais

Foram utilizados produtos do sensor MODIS, MOD13Q1 e MYD13Q1, “tile” h12v10 da coleção V6, a bordo dos satélites Terra e Aqua, respectivamente. Esses produtos, quando usados em conjunto, fornecem alta resolução temporal (8 dias), proporcionando dados, em curto intervalo de tempo, para viabilizar o estudo do ciclo fenológico da soja.

Na página do U. S. Geological Survey (USGS), foram obtidos 16 produtos MODIS (8 MOD13Q1 e 8 MYD13Q1), para englobar o ciclo fenológico do talhão, estando esses arquivos originalmente na projeção

sinusoidal e no formato hierarchical data format (.hdf). De cada um desses produtos foram extraídas as imagens (raster) EVI, NDVI e *pixel reliability*, para cada data, usando o software MODIS Reprojection Tool (MRT) (EARTH RESOURCES OBSERVATION AND SCIENCE – EROS, 2011), que reprojeteu as imagens para a projeção UTM-WGS-84-Fuso21S e formato GeoTiff (FIGURA 2B).

O NDVI e EVI foram fornecidos na forma digital pelos produtos MOD13Q1 e MYD13Q1, a cada 8 dias, o valor disponibilizado por esses produtos foi referente ao valor máximo do índice capturado pelo sensor MODIS, no mesmo *pixel*, durante os 8 dias. O cálculo do NDVI é dado pela equação 4, e do EVI pela Equação 5.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{IVP} - \text{V}}{\text{IVP} + \text{V}} \quad (4)$$

$$\text{EVI} = G * \frac{(\text{IVP} - \text{V})}{(\text{IVP} + c1 * \text{V} - c2 * \text{A} + \text{L})} \quad (5)$$

em que IVP é a reflectância no infravermelho próximo; V é a reflectância no vermelho; A é a reflectância no azul; c1 é o coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para a banda do vermelho (6); c2 é o coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para a banda do azul (7,5); L é o fator de correção para a interferência do solo (1); G = fator de ganho (2,5).

Para o estágio V0 (emergência do cotilédono), foi considerada a data 07/10/2012, 8 dias após a semeadura. Para o estágio R9 (colheita) foi considerada a imagem com a data mais próxima à colheita, dia 02/02/2013. Como o cultivar é de ciclo semiprecoce (115 a 120 dias), foi considerado o intervalo de 8 dias, para a mudança de um estágio fenológico para outro, considerando o estágio V6 como final do ciclo vegetativo para esse cultivar.

Assim, foi possível acompanhar detalhadamente todo o ciclo fenológico do cultivar M 7639 RR, determinado esse ciclo de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Descrição dos estádios de desenvolvimento do cultivar M 7639 RR.

Estádio Vegetativo	Estádio Reprodutivo
V0: Emergência a cotilédones abertos (0 dias).	R1: Início da floração (56 dias).
V1: Primeiro nó (8 dias).	R2: Floração plena (64 dias).
V2: Segundo nó (16 dias).	R3: Final da floração (72 dias).
V3: Terceiro nó (24 dias).	R4: Vagens no terço superior com 2-4cm (80 dias).
V4: Quarto nó (32 dias).	R5: Enchimento dos grãos (88 dias).
V5: Quinto nó; quarto trifólio aberto (40 dias).	R6: Vagens com granação de 100% (96 dias).
V6: Sexto nó; quinto trifólio aberto (48 dias).	R7: Início da maturação (104 dias).
	R8: 95% das vagens maduras (112 dias).
	R9: Colheita (120 dias).

Fonte: Adaptado de Neumaier, Nepomuceno e Farias (2000).

O *pixel reliability* (Confiabilidade do *pixel*) foi o produto usado para identificar os *pixels* com valores anômalos, ou seja, os valores de reflectância que sofreram interferência do fator externo, por exemplo, a grande presença de nuvens no momento da aquisição do dado terrestre pelo sensor MODIS. Esse produto é também uma imagem *raster*, assim como as imagens de EVI e NDVI, porém os valores dos *pixels* nesse produto são, na verdade, códigos identificadores e descrevem a qualidade do valor do *pixel* atribuído nas imagens EVI e NDVI (TABELA 3).

Tabela 3 - Descrição da Imagem *pixel reliability* do produto MOD13Q1 e MYD13Q1.

Valor do Pixel	Significância	Descrição
0	Dado Bom	Uso com Confiança
1	Dado Marginal	Utilizável
2	Neve	Alvo coberto por Neve/Gelo
3	Nuvem	Alvo coberto com Nuvem

Fonte: Adaptado de Silveira (2015).

Um modelo digital de elevação (MDE) da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM 1 Arc-Second Global) com 30 metros de resolução espacial foi utilizada, para gerar diferentes mapas com informações de relevo, como sombreamento, direção do declive, declividade, além da altitude da área, representada pelo MDE, para melhor análise do terreno. Foi utilizado o ArcGIS para gerar essas variáveis de relevo. Mapas de terreno foram elaborados, a partir desses dados, para análise das características da área. Esses dados foram extraídos, em cada ponto da malha amostral, para correlação com dados de EVI e NDVI, em cada estágio do ciclo fenológico. Dados de precipitação (milímetros por mês) foram usados do produto 3B43 do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) e os dados de temperatura de superfície diurna e noturna, a cada 8 dias. Durante o ciclo fenológico da safra, foram registrados pelo sensor MODIS, produtos MYD11A1/MYD11A2 do satélite Aqua. O Aqua dia fez o registro da temperatura às 13h30 e o Aqua noite registrou a temperatura à 01h30, sendo essas as temperaturas consideradas de superfície médias diurnas e noturnas, respectivamente. Esses dados foram adquiridos, no portal on-line SeriesView, do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) (FREITAS et al., 2011), sendo os dados de temperatura de superfície disponibilizados a cada 16 dias.

Com as imagens projetadas, foi realizada a extração nos *pixels*, utilizando os pontos amostrais (vetor) dos valores digitais dos IV's das imagens MODIS (raster) e dos valores do *pixel reliability*. As imagens do EVI e NDVI

apresentam valores digitais de *pixel* que variam de -3000 até 10000. Esses valores foram divididos por 10000, para a transformação do valor digital para valor físico, mais utilizados no estudo dos IV's, dentro da escala de -0,3 a 1. Quanto mais próximo de 1 maior é a resposta espectral pelo vigor da vegetação.

Feita a extração do EVI, NDVI e *pixel reliability* das imagens, a cada 8 dias, durante o ciclo fenológico, esses dados foram tabulados por estágio fenológico (data) juntamente com os dados adquiridos *in situ* e dados de relevo.

3.4 Métodos adotados para uso da filtragem Savitzky-Golay (SG) na série temporal

Para substituir os *pixels* com interferência das nuvens, foram obtidos novos valores de NDVI e EVI, utilizando a filtragem dos dados originais do sensor MODIS pelo método Savitzky-Golay (SAVITZY; GOLAY, 1964), adquiridos, a partir do Sistema de Análise Temporal da Vegetação (SATVeg) (SATVEG, 2016), biblioteca virtual de sensoriamento remoto que disponibiliza os valores filtrados para as séries temporais de IV's. Foi utilizada uma janela móvel de tamanho 6, que permite maior suavização do perfil temporal.

Além de utilizar os dados originais de EVI e NDVI do sensor MODIS (sem filtragem, SF), as análises de correlação e perfis espectro temporais dos IV's foram feitas, utilizando os dados em dois métodos de aplicação da filtragem SG: (1) utilizando a filtragem SG somente para os *pixels* apontados com ruído pelo produto *pixel reliability* (filtragem parcial, FP); (2) utilizando a filtragem SG para todos os *pixels*, durante o ciclo, independente de ter ruído ou não (filtragem completa, FC).

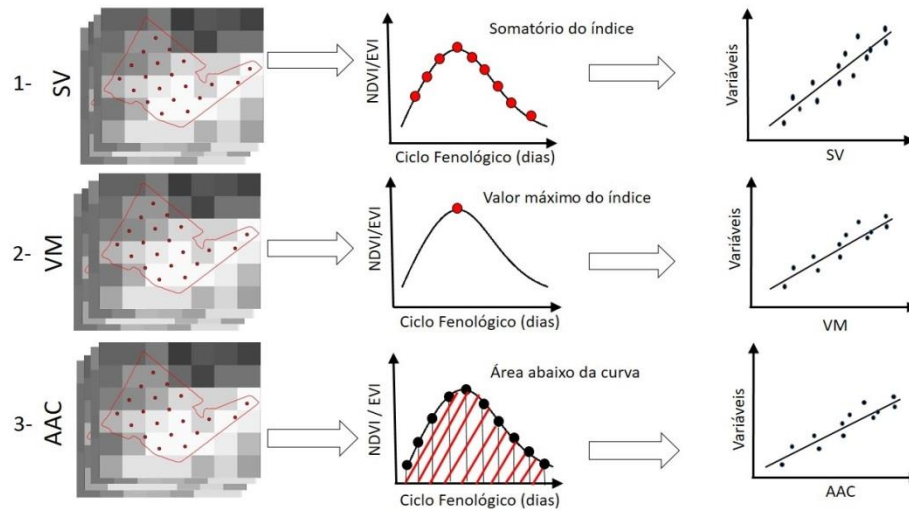
Para melhor visualização dos resultados, foram elaborados perfis temporais para cada método utilizado. Foram usados três pontos amostrais com valores altos, médios e baixos de argila, MOS e produtividade, para comparação

das curvas temporais de EVI e NDVI, em cada um desses pontos e detecção da assinatura temporal de resposta dos IV's, durante a fenologia da soja para cada taxa dessas variáveis.

3.5 Métodos para aquisição do valor único de EVI e NDVI que representa todo o ciclo fenológico

Foram elaborados e comparados três métodos de uso dos valores de EVI e NDVI, considerando todo o ciclo fenológico no talhão, da germinação até a colheita, denominados: somatório dos valores do índice, a cada 8 dias, durante 120 dias (SV), valor máximo atingido pelo índice, durante os 120 dias (VM) e área abaixo da curva do perfil temporal do índice (AAC). Os métodos propostos neste estudo foram usados por ponto amostral da malha e os valores encontrados, para cada método, foram correlacionados com a textura, MOS, produtividade e dados de relevo. Os valores obtidos, a partir desses métodos, foram relacionados com as variáveis (FIGURA 3).

Figura 3 - Representação da forma de extração dos valores de EVI e NDVI pelos métodos propostos com o intuito de adquirir um valor único para o IV considerando todo ciclo fenológico.



Legenda: Métodos, somatório do índice, a cada 8 dias, durante os 120 dias (SV). Valor máximo atingido pelo índice, durante os 120 dias (VM), área abaixo da curva do perfil temporal do índice (AAC).

Fonte: Do autor (2017).

A fórmula dos trapézios ou de Bezout (Equação 6) foi usada como alternativa de aquisição do valor de EVI e NDVI, considerando a área abaixo da curva temporal (AAC). Tal fórmula se baseia num processo analítico na avaliação de áreas ditas extrapolygonais, ou seja, que representam figuras decompostas de lados irregulares ou curvas. Consiste em dividir a figura em vários trapézios de alturas (h) iguais (ALVES; SILVA, 2016; BORGES, 2013).

$$Sb = \frac{h}{2} \left(y_1 + 2y_2 + 2y_3 + \dots + 2y_7 + y_8 \right) \quad (6)$$

em que Sb é a área abaixo da curva espectro temporal; y é o valor do lado do trapézio, que seriam os valores dos índices (EVI, NDVI); h é a altura do

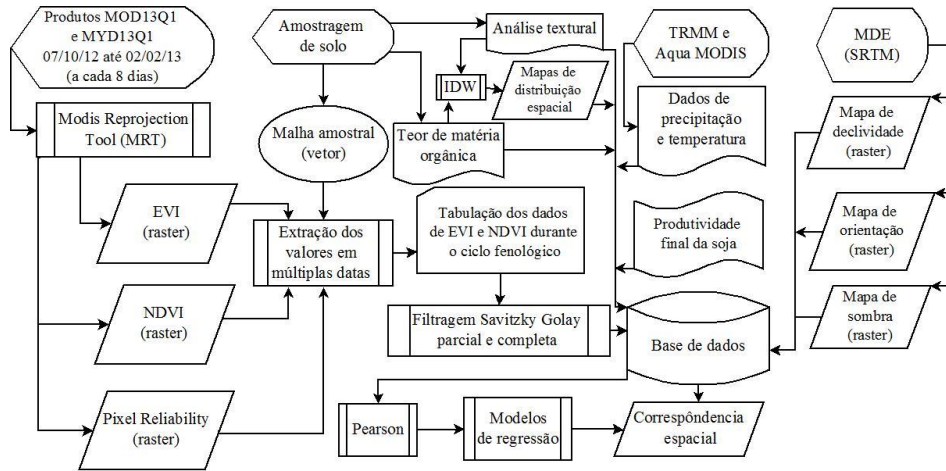
trapézio, referente ao intervalo de dias entre cada aquisição dos índices de vegetação.

Esses métodos foram escolhidos, para gerar um valor único, para a série temporal por ponto amostrado, de NDVI e EVI, que representa todo o ciclo fenológico da soja. Foram utilizados e comparados com as variáveis produtividade, relevo, textura e MOS. Além dessa análise, que considera todo o ciclo fenológico, nesta pesquisa, também, foi analisada a correlação, utilizando os índices de vegetação, em estádios específicos do ciclo fenológico (TABELA 2).

Com os dados de campo e valores dos IV's adquiridos do sensor MODIS, em estádios específicos e durante todo o ciclo fenológico, por meio dos métodos SV, VM e AAC, foram feitas as correlações dos dados, usando o coeficiente de correlação de *Pearson* (r), considerando a classificação de Dancey e Reidy (2006), em que o $r = 0,1$ até $0,39$ (fraco); $r = 0,4$ até $0,69$ (moderado); $r = 0,7$ até 1 (forte). Foi considerada correlação significativa com $P \leq 0,05$.

Com o intuito de averiguar a correlação espectral dos IV's com os atributos do solo, relevo e produtividade, foram elaboradas regressões lineares de polinômio de 1ª ordem, que indicam a relação de dependência entre as variáveis e geram modelos preditivos. A Figura 4 mostra o fluxograma da metodologia aplicada neste estudo.

Figura 4 - Diagrama de fluxo da metodologia utilizada na construção da base de dados para geração de modelos e análises espaciais das séries temporais de índices de vegetação EVI/ NDVI com atributos do solo, relevo e produtividade da soja.



Fonte: Do autor (2018).

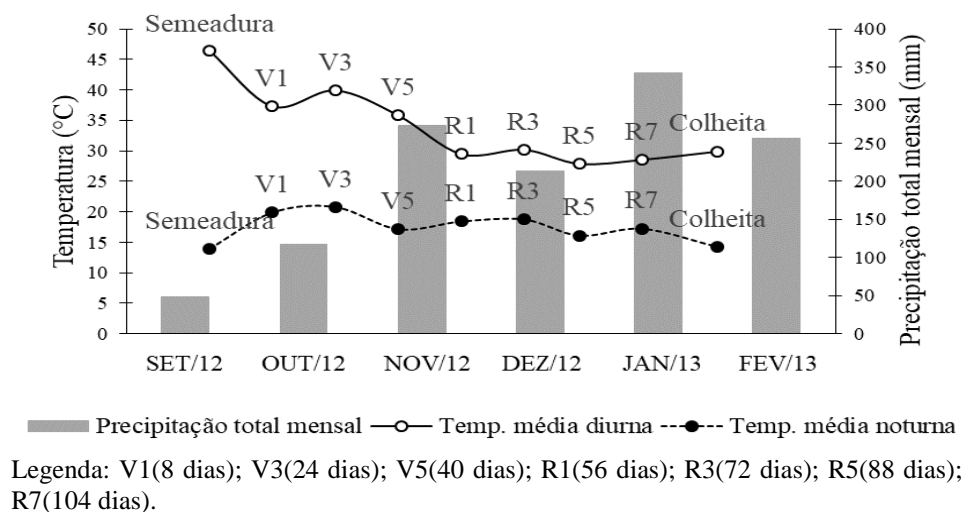
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Informações sobre as características da área, durante a safra, como o clima e relevo, auxiliaram na análise espacial combinada aos dados *in situ* com os índices de vegetação (IV's). Os dados climáticos da área forneceram subsídio ao acompanhamento e entendimento da dinâmica do ciclo fenológico da cultivar M-7639 RR. Essas informações foram utilizadas, para caracterizar a variação das variáveis meteorológicas, ao longo do tempo na área estudada.

4.1 Caracterização do clima e do relevo da área de estudo na safra 2012/2013

Na Figura 5, são apresentados os dados climáticos de precipitação pluviométrica total mensal (mm) e temperatura média diurna e noturna (°C) a cada 16 dias.

Figura 5 - Precipitação total mensal, temperatura diurna e noturna, durante o ciclo fenológico da soja, na safra 2012/2013, em Campo Verde - MT.



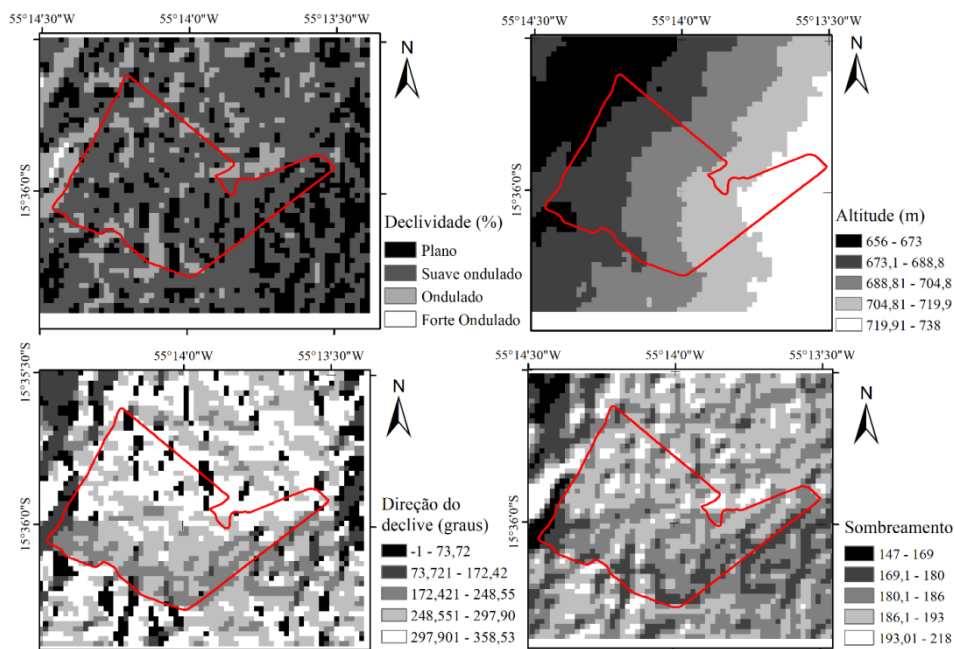
As temperaturas de superfície diurnas variaram entre 27,8 a 46,5 °C, já as temperaturas noturnas variaram entre 13,9 °C a 20,7 °C. Em relação aos fatores ambientais, a temperatura ideal, para crescimento e desenvolvimento da soja, encontra-se na faixa de 20 a 30 °C (FRANCHINI et al., 2016). A partir do mês de novembro, a precipitação chegou a quase 300 mm, isso provocou a queda da temperatura diurna, durante a safra, passando a ser registrada a média de 30° C, a partir de novembro.

No mês de janeiro, antes da colheita, ocorreu alto índice de precipitação, sendo registrados 340 mm de chuva. Durante o estágio vegetativo da cultura, a temperatura de superfície encontrava-se mais elevada, e a ocorrência de chuvas foi baixa. Somente no fim do ciclo vegetativo (estádios V5 e V6) e durante o ciclo reprodutivo da soja, a temperatura de superfície diminuiu e a precipitação aumentou. Essa mudança climática foi importante para o desenvolvimento da lavoura.

Para avaliar a relação entre produtividade da cultura da soja e textura do solo, é importante conhecer o histórico pluviométrico local de distribuição das chuvas, bem como o potencial de evapotranspiração, para avaliar a relação entre essas duas variáveis (SANTOS et al., 2008). Segundo esses autores, em caso de déficit hídrico, a produtividade dos grãos, nos solos arenosos, após a homogeneização da fertilidade do solo, será mais prejudicada do que nos solos argilosos.

Por meio do SRTM, os mapas de terreno da área de estudo foram gerados. Os dados desses mapas foram necessários à caracterização do relevo da área e, também, como variáveis nas correlações com os IV's (FIGURA 6).

Figura 6 - Mapas de análise de terreno da área de estudo.



Fonte: Do autor (2017).

A área do talhão apresenta declividade de plana a ondulada, de 0 a 15% e variação da altitude, de 656 a 738 metros. No lado leste do talhão, observaram-se as maiores cotas em relação ao lado oeste. O mapa de sombreamento apontou áreas com maior predomínio de sombra mais ao sul do talhão, causada pelo terreno nessa região, cuja temperatura do talhão pode ser mais amena. No lado oeste do talhão, também, observou-se sombreamento fora dos limites do talhão em decorrência do desnível mostrado no mapa de declividade de 14,98 até 24,87% (forte ondulado).

4.2 Distribuição espacial dos atributos do solo e análise descritiva das variáveis

As maiores variações, na distribuição espacial dos atributos do solo na área, foram encontradas para textura, com coeficiente de variação (CV) de 43,55% para argila, 41,93% para silte e 39,55% para areia; a argila apresentou maior variação. Observou-se menor variação da altitude (2,32%) e de produtividade de grãos (9,85%) na área, seguida pela MOS, com CV de 25% (TABELA 4).

Tabela 4 - Análise descritiva da produtividade de soja (sacas/ha), textura (%), MOS (g/dm³), declividade (%) e altitude (m), a partir dos pontos amostrais, durante a safra 2012/2013.

Atributo	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão	CV (%)
Produtividade	59,25	69,27	45,02	5,84	9,85
Argila	37,67	58	18	16,42	43,58
Silte	10,15	16	5	4,26	41,93
Areia	52,17	74	26	20,64	39,55
MOS	26,66	35,80	16,80	6,66	25,00
Declividade	5,30	13,54	2,32	2,62	49,43
Altitude	696,50	729	678	16,12	2,32

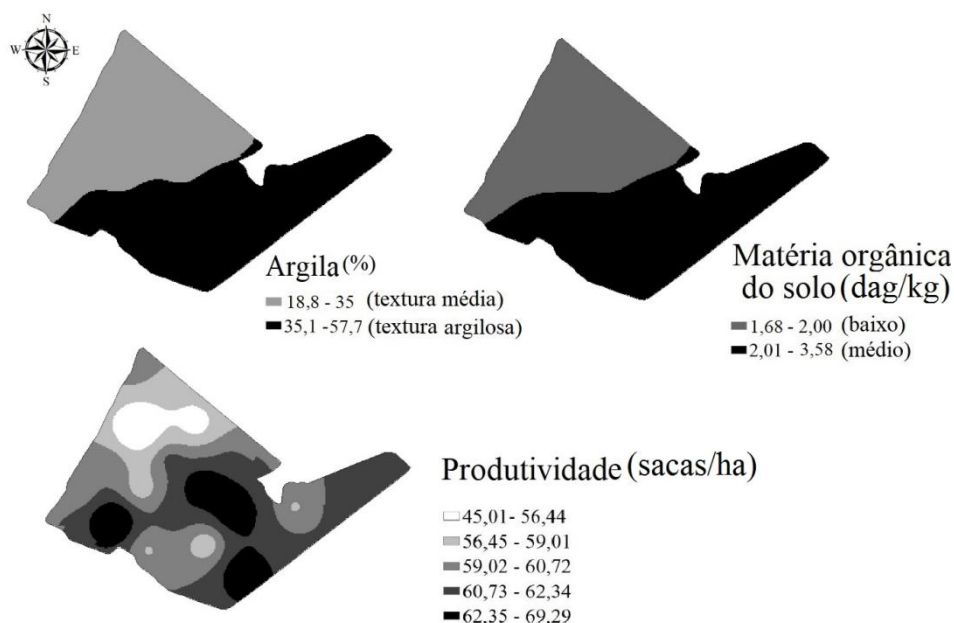
Fonte: Do autor (2017).

A área em estudo apresentou grande variabilidade em relação à textura. A MOS também apresentou alta variabilidade na área, mas em menor proporção do que a textura. Queiroz (2009) avaliou a variabilidade espacial de atributos do solo e da produção de soja em Latossolo, no município de Selvíria/MS, obtendo resultado semelhante para a MOS, com um CV de 23% para amostras com profundidade de 0 a 0,20 m. Quanto à textura, tamanha variação, provavelmente, é causada por variação de material de origem dos solos (RESENDE et al., 2014).

O baixo CV, em relação à altitude, pode ser explicado pelo relevo plano da área (IBGE, 2007), como observado nos mapas de terreno na Figura 6.

Zanzarini et al. (2013), estudando área de cana-de-açúcar, encontrou CV semelhante para altitude de 2,2%, ele também utilizou dados de terreno e correlacionou atributos do solo com NDVI. Observou-se a variabilidade dos atributos do solo também pelos mapas interpolados (FIGURA 7).

Figura 7 - Mapas de distribuição espacial da MOS (g/dm³), argila (%) e produtividade de grãos (sacas/ha) da área.



Fonte: Do autor (2017).

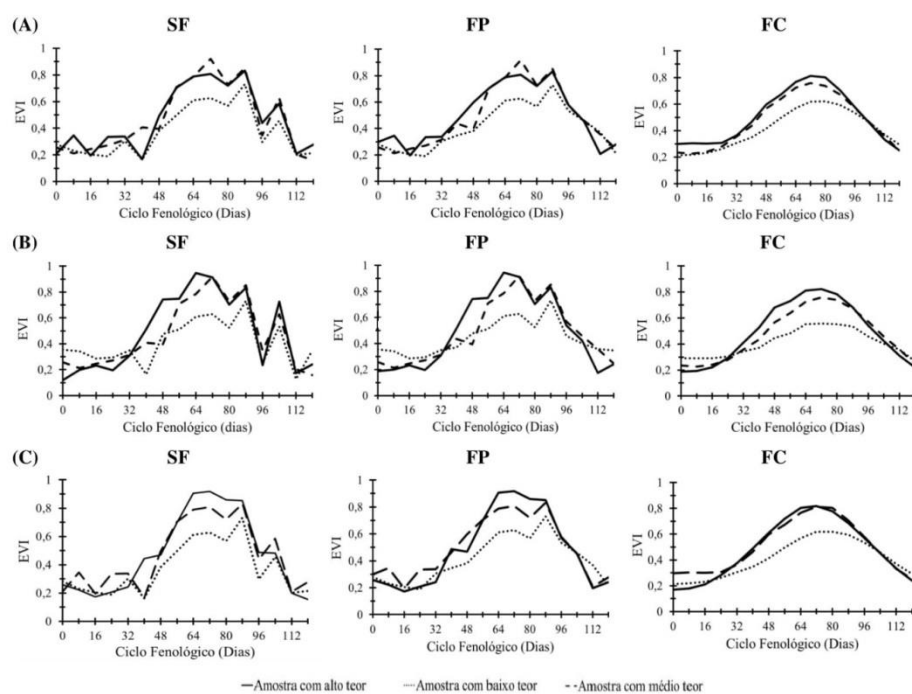
A argila e a MOS apresentaram variabilidade espacial semelhante em termos de distribuição no talhão. O teor de argila está fortemente relacionado com o teor de MOS, quanto mais frio e mais úmido for o local maiores são os teores de MOS e maior é a capacidade de troca catiônica (CTC). Considerando o mesmo manejo na área e demais fatores constantes, em solo com mais presença de areia, maior é a aeração do solo e, conseqüentemente, mais rápida é a decomposição da MOS em solos com condições bem drenadas. Com o mapa de

produtividade observa-se que as áreas com maiores teores de argila e MOS foram as áreas que mais produziram grãos de soja. Em áreas com a textura média e com menor teor de MOS, a produtividade foi mais baixa.

4.3 Análise da filtragem Savitzky-Golay (SG) com os diferentes métodos de tratamento dos valores de EVI e NDVI

A visualização dos perfis temporais de EVI e NDVI, utilizando os dados originais MODIS (SF), parcialmente filtrados (FP) e totalmente filtrados (FC), podem ser comparados, na Figura 8, com os dados de EVI e, na Figura 9, com os dados de NDVI. Na série temporal, utilizando os dados originais (SF), identificou-se o comportamento anômalo da curva temporal causado pelas interferências atmosféricas (ruídos), já o perfil espectro temporal do índice, durante o ciclo fenológico com a filtragem completa (FC), apresentou uma curva temporal suavizada, como propõe o método Savitzky-Golay (SG).

Figura 8 - Perfis temporais de EVI extraídos em pontos amostrais com valores altos, médios e baixos da variável, usando os valores dos índices originais do sensor (SF), corrigindo os valores sem confiabilidade (FP) e corrigindo todos os valores da série temporal (FC).

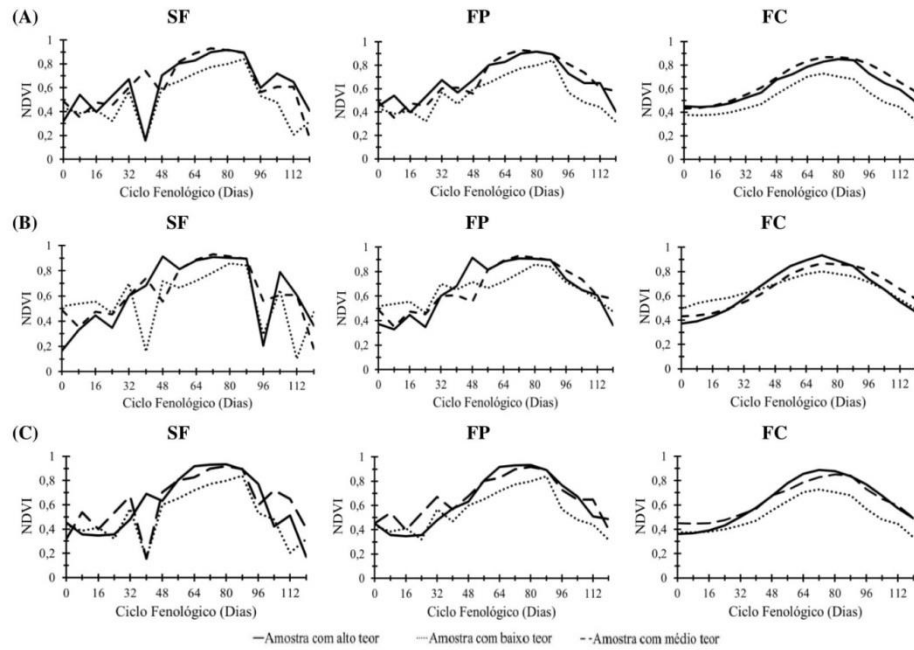


Legenda: Curvas temporais de EVI em três pontos amostrais com diferentes valores (baixo, médio, alto) para cada variável: A (produtividade: 54,19; 61,92; 69,27 sacas/ha), B (teor de argila: 18,8; 47,7; 57,7%) e C (MOS: 1,68; 2,34; 3,58 dag/kg).

Fonte: Do autor (2017).

Quanto menor o valor atingido pelo EVI, durante o ciclo fenológico, tanto menor foi o teor de MOS encontrado naquele mesmo pixel do perfil temporal. Já para os pixels, em que foi encontrado alto teor de MOS, o valor atingido no perfil espectro temporal desse pixel foi mais alto, indicando melhor vigor vegetativo da cultura nessa região do talhão.

Figura 9 - Perfis temporais de NDVI extraídos em pontos amostrais com valores altos, médios e baixos da variável, usando os valores originais do sensor (SF), corrigindo os valores sem confiabilidade (FP) e corrigindo todos os valores da série temporal (FC).



Legenda: Curvas temporais de NDVI em três pontos amostrais com diferentes valores (baixo, médio, alto) para cada variável: A (produtividade: 54,19; 61,92; 69,27 sacas/ha), B (teor de argila: 18,8; 47,7; 57,7%) e C (MOS: 1,68; 2,34; 3,58 dag/kg).

Fonte: Do autor (2017).

O padrão temporal dos perfis dos índices (NDVI e EVI), utilizando os dados sem a filtragem (SF) com a filtragem parcial (FP) e completa (FC), demonstrou a importância de substituição dos dados discrepantes da série temporal, utilizando a filtragem Savitzky-Golay (SG), caracterizando melhor a assinatura do EVI e NDVI, durante o ciclo fenológico da cultura. Como visto nos perfis, a diminuição dos valores do EVI e NDVI, aos 40 dias após a germinação das plantas com os dados originais do sensor (SF), pode ser explicada pela presença de nuvens ou outra interferência atmosférica captada pelo sensor MODIS, chamado também de ruído. Notou-se a importante função

do filtro SG, no tratamento desse dado ruidoso, quando são comparados o padrão do EVI sem o uso da filtragem (SF) e totalmente filtrados (FC). Com o perfil suavizado, valores de EVI e NDVI sem confiabilidade, como os indicados, aos 40 dias do ciclo fenológico nos gráficos SF, são substituídos por novos valores mais confiáveis.

Com a filtragem parcial e a filtragem completa, utilizando o filtro SG, foi possível caracterizar a assinatura espectral do desenvolvimento da cultura pelo perfil de variação temporal do NDVI e EVI, durante sua fenologia. Isso tornou possível identificar o período vegetativo e reprodutivo da soja da germinação até a colheita de forma mais nítida do que utilizando os dados originais do sensor, ou seja, sem a filtragem (SF), pois o ruído, no momento da leitura do sensor, retornou um valor que não representa a verdadeira resposta da vegetação.

Analisando os perfis temporais, houve aumento do EVI e do NDVI da fase vegetativa para a fase reprodutiva da planta (a partir dos 40 dias). Na fase reprodutiva, observou-se um valor com pouca variação (entre 0,7 e 0,9) dos índices dos 56 aos 88 dias, momento em que a cultura atingiu o ápice de biomassa. No estágio R5 (a partir dos 88 dias) até R8, a queda dos valores de EVI e NDVI foi consequência da perda da pigmentação verde da folha da soja, que faz parte da mudança fisiológica natural da planta, pois os grãos estão se desenvolvendo nas vagens para serem colhidos. Por fim, ocorreu a colheita no estágio R9, em que a cultura estava com 115/120 dias de ciclo, no caso dessa variedade de soja em estudo.

Os picos de NDVI foram identificados nos estádios R3 e R4. Resultados semelhantes foram obtidos, adquirindo-se o NDVI, de forma diferente, por Silva, Santi e Dal (2015). Utilizaram o aparelho GreenSeeker 505 Handheld Sensor e verificaram picos de NDVI no fim da floração e início da formação das vagens (estádios R3 e R4) da cultivar BMX vanguarda. Dessa forma, verifica-se

que sensores orbitais e sensores terrestres podem fazer essa medição de forma semelhante.

Nos perfis suavizados dos índices, o EVI apresentou melhor separabilidade entre as curvas temporais de cada ponto amostral com níveis diferentes dos atributos. Houve melhor diferenciação entre as curvas com altos, médios e baixos teores da variável, utilizando o EVI comparado ao NDVI. Tal observação apresenta relação com o método de uso do dado, usando a área abaixo da curva (AAC), para correlacionar com as variáveis.

Quanto maior foi o valor do EVI atingido, no ponto amostral durante o ciclo, maior foi o teor de argila, MOS e produtividade nesse ponto. Nesse caso, temos o método de valor máximo (VM) mais relacionado com essa observação (FIGURA 8). O perfil temporal do EVI teve amplitude maior do que o NDVI, mas os dois índices caracterizaram melhor o ciclo fenológico, quando foi utilizada a filtragem SG, em todas as datas (FC).

Em relação ao NDVI e à produtividade, não foi verificada diferença na amplitude dos IV's nas curvas temporais, porém, nos locais com baixa produtividade de grãos, as curvas tiveram comportamentos diferentes entre si. Já nos locais com alta produtividade de grãos, as curvas temporais apresentaram perfil semelhante, atingindo altos valores de NDVI (FIGURA 9).

A partir da utilização de imagem NDVI/MODIS, para o monitoramento da cana no estado de São Paulo, Moraes e Rocha (2011) detectaram a importância do *pixel reliability*, para separar os valores de *pixel* confiáveis, para serem utilizados em estudos que trabalham com IV's. Sakamoto et al. (2005) afirmaram que a aplicação de filtros foi útil para eliminar ou minimizar a interferência de ruídos em estudos da fenologia do arroz utilizando EVI/MODIS.

Utilizando o produto MODIS de reflectância diária (MOD 09), Goltz et al. (2004) verificaram sua confiabilidade e precisão, para o monitoramento de áreas agrícolas, utilizando a resposta espectral em três diferentes culturas de

variedades de soja. Eles identificaram que a alta resolução temporal desse produto se impõe à baixa resolução espacial, mostrando-se um produto confiável no monitoramento dos ciclos culturais.

O filtro Savitzky-Golay (SG) pode ser entendido como um filtro de média móvel ponderada cujos pesos são determinados por um ajuste polinomial (OLIVEIRA, 2014). Segundo Chen et al. (2004), este polinômio foi desenvolvido com o objetivo de preservar os pontos máximos, ao longo da série de dados e minimizar os ruídos. O método foi mais eficaz na obtenção de séries temporais de alta qualidade, quando comparado às séries temporais de IV's com *pixels* ruidosos.

Estimativas de produção do trigo feitas por Ren, Chen e Tang (2006), utilizando IV's, demonstraram que a filtragem SG removeu o valor do NDVI/MODIS contaminado, sendo uma ferramenta efetiva no tratamento do dado com ruído, o que favoreceu a previsão de rendimento de grãos. Maatoug et al. (2013) também afirmaram que, ao se utilizar os perfis suavizados do EVI/MODIS, tornou-se possível identificar a presença de dois ciclos, o que facilitou o estudo da fenologia da soja, algodão e milho.

Conclui-se que o filtro SG foi ferramenta de apoio ao estudo, corrigindo os valores dos IV's, para correlação com a textura, MOS e produtividade, diante dos dados sem confiabilidade que o sensor MODIS fornece e que usá-lo, em séries temporais de IV's, foi viável para acompanhamento do EVI e NDVI durante o ciclo da soja. O acompanhamento da biomassa, vigor vegetativo da cultura e padrão do perfil, de acordo com as mudanças na cultura, durante o seu desenvolvimento no campo, foi representado de forma mais eficiente pelos perfis com os IV's parcialmente filtrados (FP) e totalmente filtrados (FC).

4.4 Variação temporal do EVI e NDVI e a relação desses índices com as outras variáveis de campo em estádios fenológicos da soja

Constatou-se a existência de padrão relacionado aos IV's nos estádios do ciclo fenológico que apresentam correlação com a textura, MOS e produtividade (TABELA 5).

Tabela 5 - Correlações de *Pearson* ($P \leq 0,05$) do EVI e NDVI com a produtividade (sacas/ha), MOS (dag/kg), textura (%) e altitude (m) nos estádios fenológicos da soja, utilizando valores físicos de EVI/NDVI originais do sensor MODIS (SF), com a correção dos pixels ruidosos (FP) e com a correção de todo o perfil espectro temporal (FC).

(Continua)

Atributo	Filtragem	EVI								
					Estádios fenológicos					
		V4	V5	V6	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Produtividade					0,54	0,57	0,54			
MOS			0,59	0,48	0,75	0,62	0,77	0,62	0,67	0,47
Argila	SF		0,56	0,53	0,73	0,57	0,77	0,56	0,64	
Silte			0,56	0,54	0,74	0,58	0,76	0,54	0,64	
Areia			-0,56	-0,53	-0,74	-0,57	-0,77	-0,56	-0,64	
Altitude			0,69			0,46	0,74 ^R	0,66	0,57	0,53
Produtividade						0,54	0,60	0,54	0,45	
MOS			0,86 ^R	0,58	0,75	0,62	0,75	0,62	0,52	0,67
Argila	FP		0,85 ^R	0,62	0,73	0,57	0,77	0,56		0,64
Silte			0,84	0,64	0,74	0,58	0,75	0,54	0,46	0,64
Areia			-0,85	-0,63	-0,74	-0,57	-0,77	-0,56	-0,45	-0,64
Altitude						0,46	0,73	0,66	0,66	
Produtividade					0,48	0,53	0,58	0,61	0,57	
MOS		0,63	0,82	0,84	0,88 ^R	0,85	0,82	0,75	0,67	0,53
Argila	FC	0,64	0,81	0,83	0,86 ^R	0,84	0,78	0,69	0,60	0,47
Silte		0,63	0,80	0,83	0,86 ^R	0,83	0,79	0,71	0,62	0,46
Areia		-0,64	-0,81	-0,83	-0,89 ^R	-0,84	-0,78	-0,7	-0,60	-0,44
Altitude			0,44		0,56	0,55	0,54	0,51	0,60	0,68

Tabela 5 - Correlações de *Pearson* ($P \leq 0,05$) do EVI e NDVI com a produtividade (sacas/ha), MOS (dag/kg), textura (%) e altitude (m) nos estádios fenológicos da soja, utilizando valores físicos de EVI/NDVI originais do sensor MODIS (SF), com a correção dos pixels ruidosos (FP) e com a correção de todo o perfil espectro temporal (FC).

(Conclusão)

		NDVI								
Atributo	Filtragem	Estádios fenológicos								
		V4	V5	V6	R1	R2	R3	R4	R5	R8
Produtividade						0,66				
MOS			0,54		0,55	0,66	0,80	0,61	0,68	0,52
Argila	SF		0,49		0,48	0,60	0,77	0,57	0,65	0,46
Silte			0,48		0,48	0,59	0,76	0,56	0,65	0,48
Areia			-0,49		-0,48	-0,66	-0,77	-0,57	-0,65	-0,47
Altitude			0,68			0,63	0,58			
Produtividade						0,66 ^R	0,56	0,53		
MOS			0,47		0,63	0,66	0,80	0,61	0,68	
Argila	FP		0,52		0,56	0,60	0,77	0,57	0,65	
Silte			0,53		0,56	0,59	0,76	0,56	0,65	
Areia			-0,53		-0,56	-0,60	-0,77	-0,57	-0,65	
Altitude		-0,59				0,63	0,58			
Produtividade										
MOS				0,46	0,56	0,69	0,70	0,69	0,57	
CTC				0,47	0,57	0,69	0,70	0,69	0,57	
Argila	FC			0,47	0,56	0,69	0,72	0,69	0,57	
Silte				0,48	0,56	0,68	0,72	0,69	0,57	
Areia				-0,48	-0,56	-0,69	-0,72	-0,69	-0,57	
Altitude						0,53	0,52			

Fonte: Do autor (2017).

Legenda: ^R Foi feita a análise de regressão pela forte correlação de *Pearson* observada. Sem dado, considerar não significativo.

Verificou-se forte correlação entre o EVI, usando a FC com as variáveis, no fim do ciclo vegetativo e no estágio reprodutivo da cultura da soja até o estágio R3. Para argila e MOS, a correlação mais forte foi com o EVI, no estágio R1, com $r = 0,86$, $P = 0,0000006$ e $r = 0,88$, $P = 0,0000009$, respectivamente. A MOS apresentou as melhores correlações com os IV's seguido pela textura, em

que o teor de argila e silte se correlacionam de forma positiva e a areia de forma negativa no final do estágio vegetativo até o estágio R3. A correlação mais forte do EVI com a altitude ocorreu no estágio R3 ($r= 0,74$, $P= 0,0002$), com os dados originais do sensor MODIS. A maior correlação negativa foi também no estágio R1 entre o EVI e a areia, $r= -0,89$, $P= 0,0000006$.

Houve correlação do EVI entre o estágio V4 até o R6 dependendo do tratamento de filtragem imposto ao índice de vegetação. O uso dos dados MODIS originais e parcialmente filtrados apresentaram, aproximadamente, o mesmo número de relações entre as variáveis, porém, com a correção dos *pixels* com ruído (FP), a correlação aumentou, consideravelmente, no estágio V5 com a textura (argila= 0,85, $P= 0,000002$; silte= 0,84, $P= 0,000002$; areia= -0,85, $P= 0,000002$) e MOS ($r= 0,86$, $P= 0,0000009$). Nos estágios V6 e R6, a correlação melhorou também com a filtragem parcial (FP). Para os outros estágios a FP não melhorou o coeficiente.

Já a filtragem completa (FC) ampliou o número de correlações com as variáveis, em alguns estágios específicos, além de incluir o estágio V4 na faixa de correlações do ciclo. A filtragem de todo o perfil temporal de EVI aumentou a correlação, para todas as outras variáveis, em todos estágios fenológicos, significativamente, nos estágios V4 e V6 do ciclo vegetativo e entre os estágios R1 e R5 no ciclo reprodutivo.

A forte correlação da MOS com o EVI, principalmente, em estágios reprodutivos, pode ser explicada pela maior disponibilidade do carbono orgânico que aumenta a capacidade de troca de cátions (CTC) e retém mais a água no solo. A planta da soja se beneficia em áreas com maior disponibilidade de água e CTC, como resposta, o vigor vegetativo nessas áreas foi mais alto, reforçado pela resposta do EVI diante dessas condições de solo. Nos estágios vegetativos, principalmente nos primeiros estágios, existe ainda a influência do solo no dado de resposta da cultura captada pelos IV's.

Essa correlação negativa entre o teor de areia e a resposta do EVI pode ser explicada pelas menores retenções de água e CTC nos solos com maior presença de areia. Segundo Franchini et al. (2016), em áreas arenosas em que ocorre a expansão da soja, são regiões quentes, com alta evapotranspiração, ou seja, duas situações negativas ocorrem: a pouca retenção de água e evaporação mais rápida. Existiu assim, menor resposta do EVI pela cultura da soja, que apresentou baixo vigor vegetativo nessas regiões com textura arenosa.

A filtragem somente nos *pixels* com ruído (FP) e em todos os *pixels* (FC) do ciclo melhorou a correlação entre o EVI e a produtividade no estádio R3 ($r= 0,60$, $P= 0,004$) e R4 ($r= 0,61$, $P= 0,004$), respectivamente. Usando os dados originais (SF) de EVI e parcialmente corrigidos (FP), a textura, a altitude e a MOS apresentaram maior correlação no estádio R3.

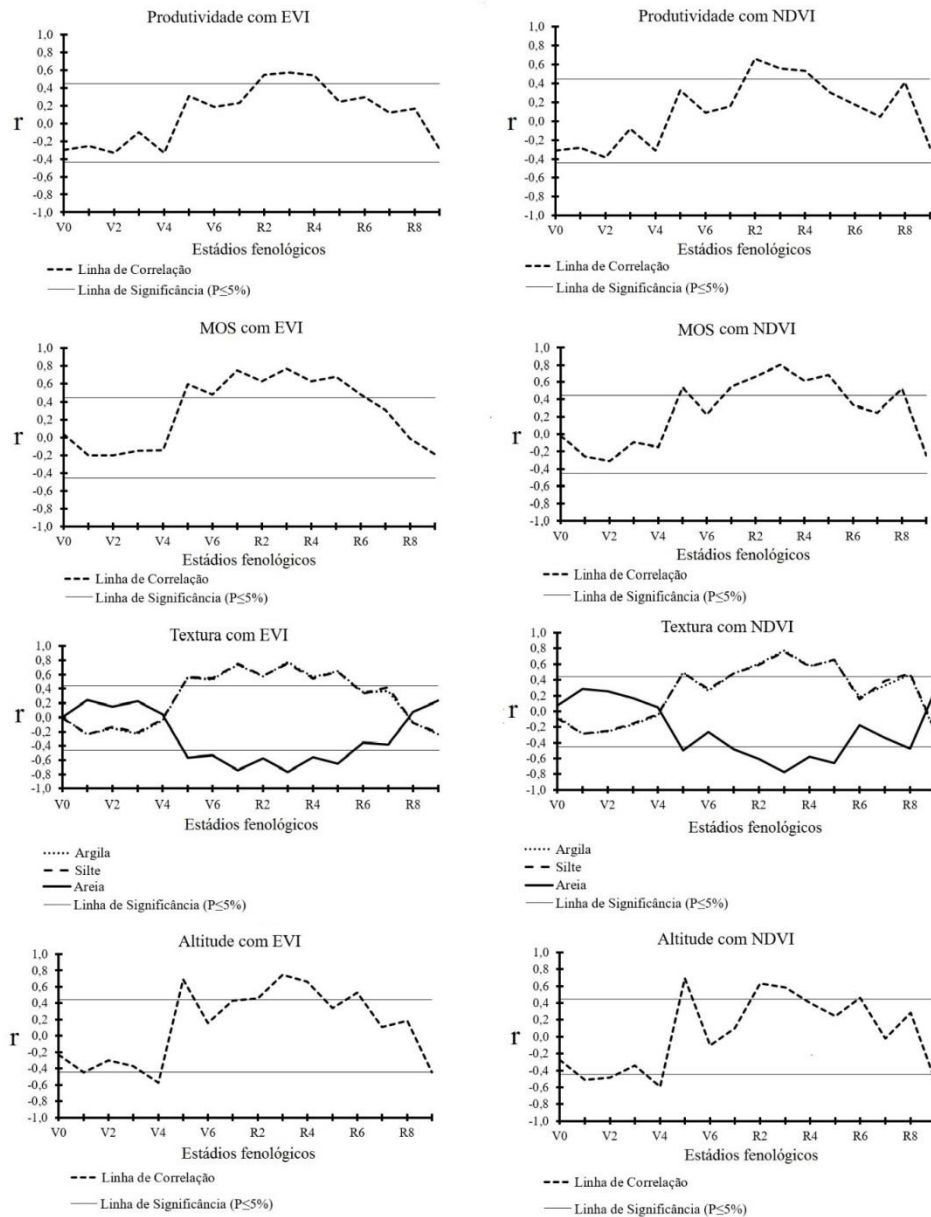
Diferentemente do EVI, o NDVI apresentou menor número de correlações utilizando a filtragem completa (FC) em todo o ciclo fenológico. Embora tenha ocultado as correlações com a produtividade, melhorou a correlação no estádio V6, R2 e R4 com a MOS e a textura. Os valores de correlação dos atributos do solo com o NDVI se apresentaram mais baixos do que o EVI nessa análise. Nos estádios R3 e R5, a filtragem completa (FC) diminuiu a correlação entre o NDVI e as outras variáveis. Zanzarini (2013) também obteve baixos coeficientes de correlação linear (R^2) entre o NDVI e argila ($R^2= 0,27$) na cultura da cana de açúcar.

No estádio V4, foram verificadas que as primeiras relações entre as variáveis aumentam ao final do ciclo vegetativo (V5 e V6) e se estende até o fim do ciclo reprodutivo, no estádio R8, utilizando o NDVI. Porém as melhores correlações estão presentes nos estádios V6, R1, R2 e R3. A correlação mais forte com a produtividade foi evidenciada no estádio R2 utilizando o NDVI com os dados originais do sensor MODIS (SF) e parcialmente filtrados (FP), que apresentou um $r= 0,66$, $P= 0,001$.

Para correlacionar o NDVI aos atributos do solo, justifica-se a análise da dependência espacial para melhor entendimento do padrão de ocorrência desses atributos no espaço (ZANZARINI et al., 2013).

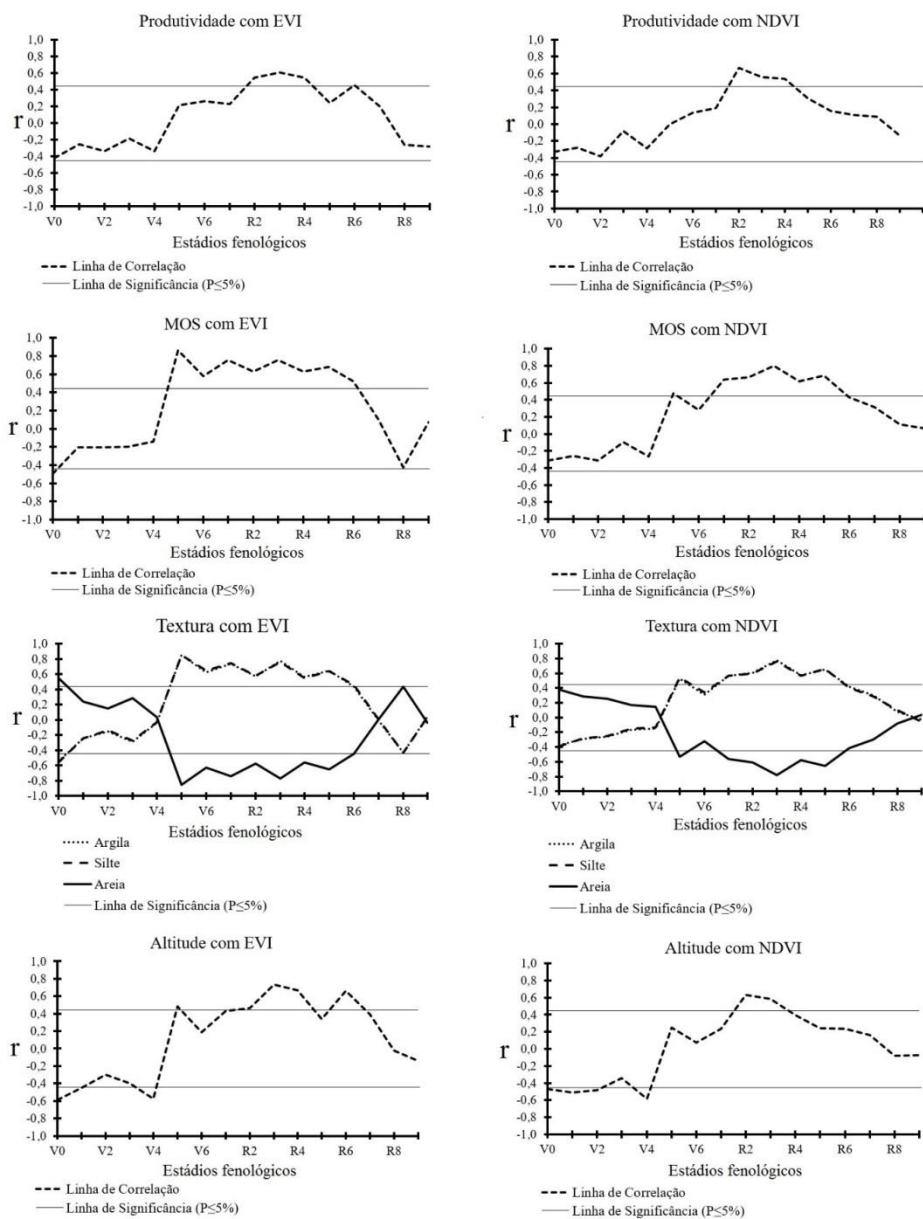
Nas Figuras 10, 11 e 12, são apresentados os perfis de correlação (r) dos índices EVI e NDVI com as outras variáveis em cada estágio do ciclo fenológico sob diferentes usos da fitagem: SF; FP e FC, respectivamente. Com esses perfis, podem-se visualizar os melhores estágios fenológicos da cultura para se estudar a correlação dos IV's com as variáveis, produtividade, textura, MOS e altitude.

Figura 10 - Perfis de correlação de *Pearson* (r) dos valores de EVI e NDVI (SF) com a produtividade (sacas/ha), MOS (dag/kg), textura (%) e altitude (m) durante o ciclo fenológico.



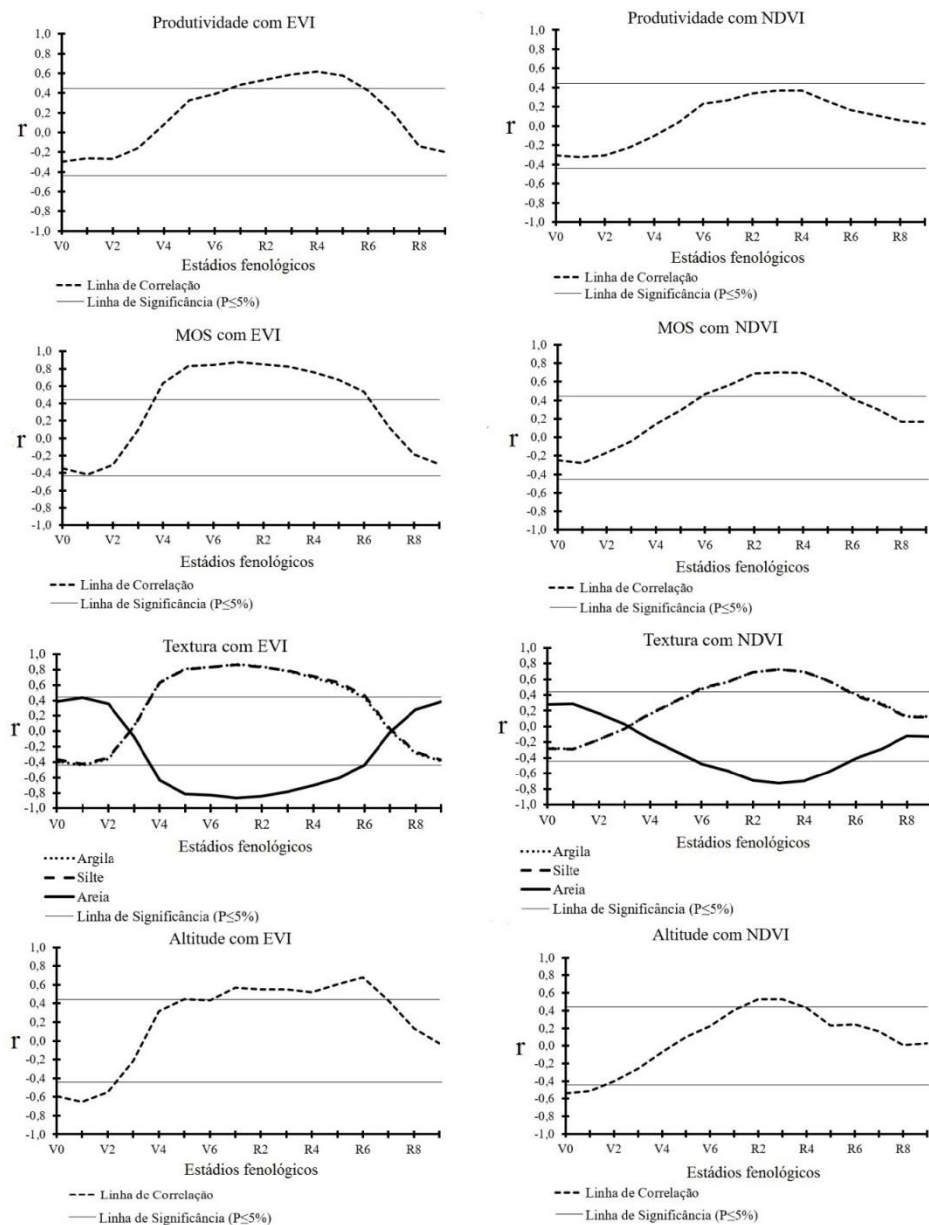
Fonte: Do autor (2017).

Figura 11 - Perfis de correlação de *Pearson* (r) dos valores de EVI e NDVI (FP) com a produtividade (sacas/ha), MOS (dag/kg), textura (%) e altitude (m) durante o ciclo fenológico.



Fonte: Do autor (2017).

Figura 12 - Perfis de correlação de *Pearson* (r) dos valores de EVI e NDVI (FC) da série com a produtividade (sacas/ha), MOS (dag/kg), textura (%) e altitude (m) durante o ciclo fenológico.



Fonte: Do autor (2017).

Observou-se, em geral, pelas linhas de significância, que a MOS e a textura tiveram mais estádios fenológicos envolvidos nas relações com os índices EVI e NDVI, refletidos pela cultura da soja, posteriormente, à produtividade e à altitude, considerando a filtragem completa nessa análise (FIGURA 12). Ao início do ciclo, mais especificamente no ciclo vegetativo da cultura, menores valores de correlação foram verificados. Os índices tiveram maior relação com as variáveis do solo à medida que a cultura se desenvolveu (maiores valores de r). Em alguns casos, para o EVI, antes da colheita (R9), a correlação voltou a se tornar negativa, pois houve a perda da resposta do verde da cultura em razão do amarelecimento natural da soja.

A MOS, assim como a argila e o silte, apresentaram correlação positiva com o EVI a partir do estágio V4. Observou-se tanto para o NDVI quanto para o EVI que a argila apresentou padrão semelhante ao silte, ao longo do ciclo, e a areia padrão oposto, com forte correlação negativa com os índices, entre os estádios R1 e R4, principalmente. Os altos valores físicos de EVI e NDVI foram verificados em locais em que os resultados da amostragem do solo apontaram altos teores de MOS, argila e silte. Esses atributos do solo proporcionaram melhor resposta da cultura, em termos produtivos e de vigor vegetativo, confirmado pelo valor de resposta do NDVI e EVI.

Altitude e produtividade apresentaram menor coeficiente de correlação com os índices, apesar de serem significativos. Zanzarini et al. (2013) obtiveram correlação entre a altitude e o NDVI igual a 0,58 estudando a cana-de-açúcar, mesmo valor encontrado no estágio R3 na correlação com essas mesmas duas variáveis no presente trabalho com a soja.

Estudando a soja e correlacionando o NDVI e a produtividade de grãos, Ma et al. (2001) obtiveram forte relação entre NDVI e rendimento de grãos, com R^2 de até 0,8 utilizando a reflectância nos estádios R2, R4 e R5 do ciclo da soja. Já Antuniassi, Baio e Sharp (2007) identificaram correlação entre a reflectância

do dossel das plantas, expressa em valores de NDVI e a produtividade das culturas. Qualquer estresse drástico, durante o estágio R3, pode afetar o rendimento de grãos da soja de forma irreversível, de acordo com Neumaier, Nepomuceno e Farias (2000).

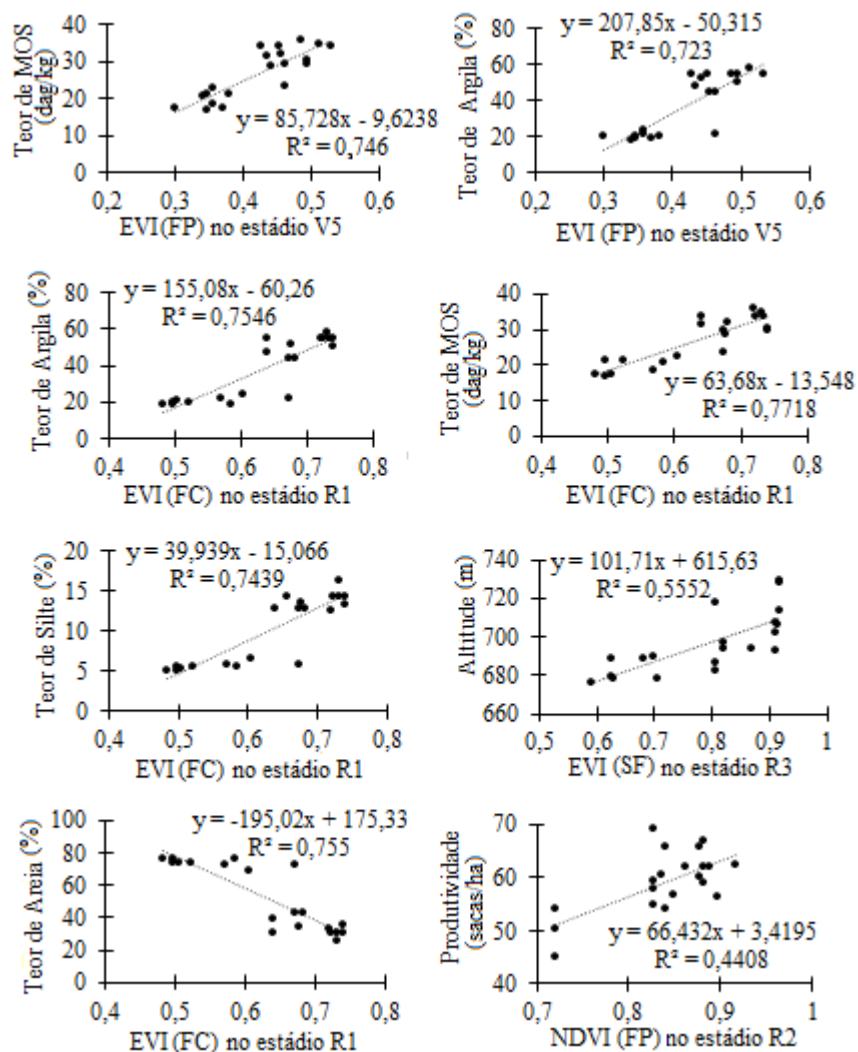
Utilizando o índice GNDVI, Groff et al. (2013) obtiveram coeficiente de determinação (R^2) com a produtividade igual a 0,59 também em fase específica do ciclo fenológico. No estágio V5 eles verificaram o baixo coeficiente de determinação ($R^2= 0,16$) com a produtividade, o que pode ter sido causado pela interferência do solo ainda nessa fase do ciclo. Conforme Dalmolin et al. (2005), vários atributos do solo (matéria orgânica, textura, composição mineralógica e umidade) podem afetar a reflectância do dossel e, por consequência, o valor do índice de vegetação.

A MOS aumenta a capacidade de retenção de água no solo, o que proporciona um solo mais propício ao desenvolvimento da lavoura. Santos et al. (2012), estudando atributos do solo em áreas de Latossolo, utilizadas para pecuária no Cerrado, observaram que o teor de MOS das diferentes áreas estudadas esteve relacionado com a porcentagem de argila e com o manejo adotado, ou seja, existe uma relação de dependência espacial entre essas variáveis.

A partir das fortes correlações de *Pearson* identificadas, geraram-se os modelos de regressão entre os índices e as variáveis de forma linear. Observou-se que a filtragem completa da série temporal (FC) dos IV's retornou os melhores resultados com os atributos físicos do solo e a filtragem parcial (FP) com a produtividade. Os coeficientes de determinação (R^2) do EVI, no estágio R1 com MOS, argila, silte e areia, foram $R^2= 0,77; 0,75; 0,74; 0,75$, respectivamente. Usando o NDVI no estágio fenológico R2 (50 dias antes da colheita), foi obtido $R^2= 0,44$ com a produtividade, essa correlação poderia ter sido melhor, possivelmente, se tivesse sido coletado um número maior de

amostras de plantas, para o cálculo da produtividade e, também, se o *pixel* da imagem fosse de melhor resolução espacial. Dessa forma, podem-se utilizar os modelos gerados para prever os atributos do solo e estimar a produtividade da soja (FIGURA 13).

Figura 13 - Relação linear e modelos de regressão das variáveis de campo com os valores de EVI e NDVI em estádios específicos do ciclo fenológico sob diferentes usos da filtragem SG. Valores de EVI e NDVI sem a filtragem (SF); valores de EVI e NDVI com pixels não confiáveis filtrados (FP); valores de EVI e NDVI completamente filtrados (FC).



Legenda: EVI e NDVI originais (SF); valores de EVI e NDVI com *pixels* não confiáveis corrigidos (FP); valores de EVI e NDVI completamente corrigidos na série temporal pela filtragem SG (FC).

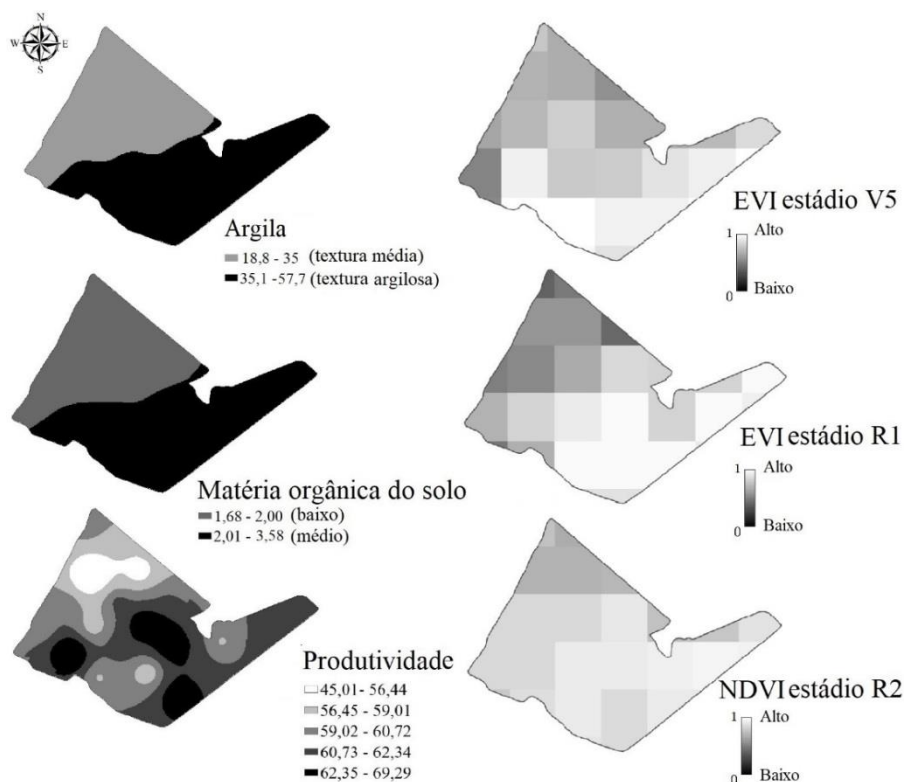
Fonte: Do autor (2017).

A reflectância no infravermelho próximo, banda utilizada no cálculo do NDVI, é uma estimativa do acúmulo de biomassa e do estágio de desenvolvimento da cultura refletindo seu potencial produtivo (BREDEMEIER et al., 2013). Esse fator pode ter contribuído para que o NDVI tenha tido melhor correlação com a produtividade do que o EVI. O NDVI também foi mais sensível à variação da fitomassa. Com o desenvolvimento da cultura, as correlações desse índice com a produtividade ocorreram, em estágios específicos do ciclo, pois a superfície de fundo (solo e resíduos vegetais) passou a ter menos efeito sobre o NDVI e a biomassa da parte aérea passou a ser fator determinante da magnitude desse índice.

Métodos de predição, para o mapeamento de atributos do solo, foram comparados por López-Granados et al. (2005). Eles utilizaram as bandas do visível (verde, vermelho e azul) a partir da imagem Landsat/TM. Também obtiveram correlações negativas para areia e positivas para argila e matéria orgânica, além de identificarem que a banda do azul apresentou melhores correlações com os atributos do solo. Para o cálculo do EVI, usou-se a banda do azul e o coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para a mesma banda (Equação 5). Possivelmente essa banda da região do visível contribuiu para melhores correlações do EVI com a textura e MOS na presente pesquisa.

Observou-se a variabilidade dos atributos do solo no agrossistema pelos mapas interpolados. Esses mapas foram comparados com as imagens MODIS nas datas em que os estágios fenológicos tiveram maior R^2 com a argila, MOS e produtividade (FIGURA 14).

Figura 14 - Correspondência espacial do EVI (estádio V5 e R1, 16/11/2012 e 02/12/2012, respectivamente) e NDVI (estádio R2, 10/12/2012) do sensor MODIS, em estágio do ciclo fenológico, que apresentaram as maiores correlações com argila (%), MOS (dag/kg) e produtividade (sacas/ha).



Legenda: imagens de EVI (FC) no estágio V5 e R1 (40 e 56 dias após a germinação) e NDVI (FP) estágio R2 (50 dias antes da colheita), estádios do ciclo fenológico que apresentaram as correlações mais fortes com argila (%), MOS (dag/kg) e produtividade (sacas/ha).

Fonte: Do autor (2017).

Na busca do desenvolvimento de modelos empíricos para previsão do rendimento de milho e soja na região central dos Estados Unidos, Bolton e Friedl (2013) identificaram um bom desempenho do NDVI e EVI2 do sensor MODIS, para prever a produtividade da soja, com $R^2 = 0,69$, 80 dias após a germinação. Foi sugerido que informações da fenologia de culturas detectadas

remotamente são úteis para aplicações de monitoramento e mapeamento. V5, R1 e R2 foram os mais importantes estádios do ciclo fenológico da cultivar M-7639 RR, para se detectar possíveis alterações espectrais na cultura como reflexo das condições de solo, ou outros fatores, para uma possível intervenção e manejo.

A argila e a MOS apresentaram variabilidade espacial semelhante em termos de distribuição no talhão. O teor de argila está relacionado com o teor de MOS. A argila presente no solo funciona como uma proteção para a MOS pela capacidade que ela tem em formar diferentes tipos de ligações com partículas com elevada superfície específica, dando proteção coloidal à MOS (SILVA; MENDONÇA, 2007). Em virtude de os seus efeitos diretos e indiretos sobre as propriedades do solo, a MOS exerce forte influência sobre a capacidade produtiva do solo (COSTA; SILVA; RIBEIRO, 2013).

Utilizando o EVI-2 já suavizado e processado pelo INPE, Santos et al. (2014) correlacionaram esse índice de vegetação com a umidade do solo medida em diferentes profundidades (60 cm e 40 cm), na cultura do café, para verificar a possibilidade de estimar a quantidade de água no solo. Eles encontraram um $R^2=0,81$ em profundidade de 60 cm e $R^2=0,77$ em profundidade de 40 cm utilizando regressão linear do EVI-2 com a umidade do solo. A umidade do solo está diretamente relacionada com o teor de argila e MOS abordados nesse trabalho, em que foi verificada a correlação linear semelhante desses atributos com o EVI, $R^2=0,75$ e $R^2=0,77$, respectivamente.

No mês de novembro e início de dezembro, a cultura estava nos estádios V5, V6, R1 e R2 do ciclo fenológico. Essa interação solo, planta e clima pode ter sido apontada como responsável pelas correlações dos IV's com os atributos físicos do solo nesses estádios. O teor de MOS e argila foram responsáveis pela maior produtividade de grãos de soja na região central e sudeste do talhão.

4.5 Relação das variáveis de campo com os IV's adquiridos pelos métodos de extração de valor único para o ciclo fenológico

Nessa outra análise comparativa, os valores dos IV's foram adquiridos pelos métodos demonstrados na Figura 3, em que todo o ciclo fenológico é considerado para aquisição de um valor único a ser correlacionado com as variáveis a partir da malha amostral. Identificou-se que o método AAC com o EVI proporcionou forte relação com textura, MOS e altitude, já o método VM com o NDVI indicou maior relação com as mesmas variáveis, mas também com a produtividade. A FC favoreceu as correlações do EVI (TABELA 6) e desfavoreceu as correlações do NDVI (TABELA 7), assim como na análise em estádios fenológicos específicos apresentados na Tabela 5. Foi utilizada a Correlação de *Pearson* (r) considerando $p \leq 0,05$.

Tabela 6 - Correlações do EVI com a produtividade (sacas/ha), MOS (g/dm³), textura (%) e altitude (m) em cada tratamento de filtragem do IV e em cada método de extração de valor único para o ciclo fenológico.

Atributo	Filtragem /Método de extração de valor único								
	SF			FP			FC		
	SV	VM	AAC	SV	VM	AAC	SV	VM	AAC
Produtividade							0,60 ^R		
MOS	0,84	0,77	0,86 ^R	0,79	0,77	0,83	0,75	0,82	0,78
Argila	0,79	0,75	0,82	0,74	0,75	0,77	0,67	0,77	0,71
Silte	0,8	0,76	0,83	0,74	0,76	0,78	0,69	0,78	0,73
Areia	-0,79	-0,75	-0,82	-0,74	-0,75	-0,78	-0,67	-0,76	-0,72
Altitude		0,68		0,46	0,68 ^R	0,51	0,45	0,54	0,47

Fonte: Do autor (2017).

Legenda: ^R Foi feita a análise de regressão pela forte correlação de *Pearson* observada. Sem dado considerar não significativo

Tabela 7 - Correlações do NDVI com a produtividade (sacas/ha), MOS (g/dm³), textura (%) e altitude (m) em cada tratamento de filtragem do IV e em cada método de extração de valor único para o ciclo fenológico.

Atributo	Filtragem /Método de extração de valor único								
	SF			FP			FC		
	SV	VM	AAC	SV	VM	AAC	SV	VM	AAC
Produtividade		0,49			0,60				
MOS	0,51	0,70	0,57		0,72 ^R			0,69	
Argila	0,45	0,62	0,51		0,66			0,70	
Silte	0,45	0,63	0,52		0,65			0,70	
Areia	-0,45	-0,63	-0,51		-0,66			-0,70	
Altitude		0,51			0,48			0,48	

Fonte: Do autor (2017).

Legenda: ^R Foi feita a análise de regressão pela forte correlação de *Pearson* observada. Sem dado considerar não significativo.

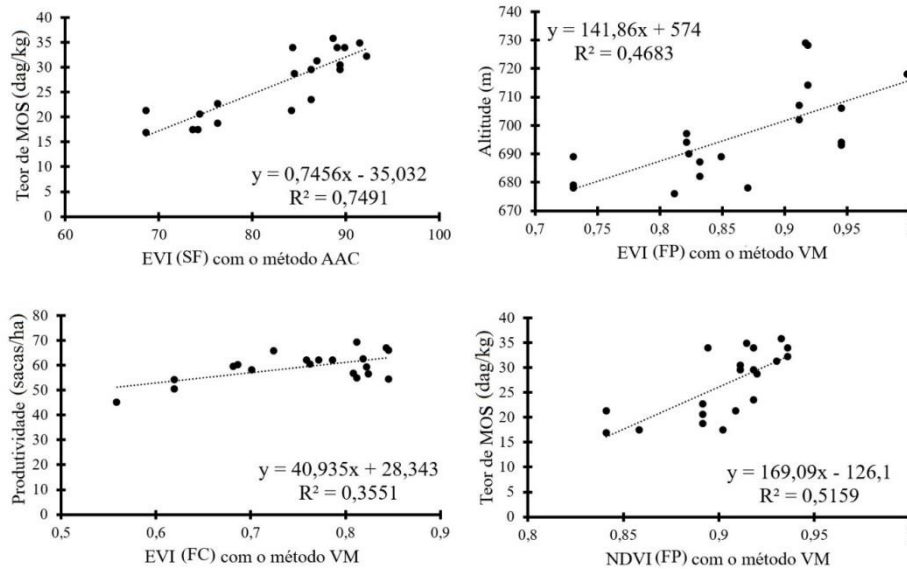
Considerando o NDVI, a filtragem SG em todo ciclo fenológico (FC) aumentou a correlação para a textura e houve pequena queda para MOS e altitude para o método do valor máximo do índice durante o ciclo (VM). Os dados originais de NDVI apresentaram maior número de correlações do que os dados alterados pela filtragem SG utilizando os métodos de extração de valor único.

O método SV e o método AAC do perfil temporal dos índices combinados com a FC apresentou queda na correlação. Em contrapartida, o método VM proporcionou fortes correlações em praticamente todas análises. Pode-se inferir que a filtragem SG fez o refinamento dos dados, melhorando as correlações neste estudo para o EVI, porém a escolha do método que gera um valor único para os IV's se faz importante, como se mostrou o método VM em resposta ao uso da FC.

O método de filtragem pode mascarar a característica fenológica da cultura em resposta ao nutriente no solo ou outro fator condicionante, visto que algumas correlações de *Pearson* que estavam presentes com a FP deixaram de ocorrer com a FC. Essa observação foi também proposta por Esquerdo,

Coutinho e Antunes (2013), que utilizaram dados de NDVI do MODIS e afirmaram que os métodos de filtragem podem causar distorções nos perfis temporais, sobretudo, naqueles obtidos em áreas agrícolas, mascarando algumas características fenológicas das culturas, dependendo da qualidade, quantidade e periodicidade dos dados disponíveis. A partir das fortes correlações de *Pearson* (r) observadas, utilizando um valor único para os IV's pelos métodos SV, VM e AAC, a relação entre as variáveis foi verificada a partir de regressão linear simples (FIGURA 15).

Figura 15 - Relação linear das variáveis de campo com os valores dos IV's obtidos pelos métodos área abaixo da curva (AAC) e valor máximo (VM), utilizando valores sem a filtragem (SF), parcialmente filtrados (FP) e totalmente filtrados (FC) considerando a malha amostral.



Fonte: Do autor (2017).

Sobre os três métodos de uso de um valor único para todo o ciclo, por meio do método soma dos valores, a cada 8 dias do ciclo (SV), obtiveram-se resultados menos satisfatórios comparados aos outros dois métodos. O método VM foi o melhor método para se utilizar combinado à filtragem SG. A AAC teve bons resultados de relação entre os IV's e as variáveis, mas esse método teve seus valores muito afetados pela FC, já que alterou o valor da AAC no perfil temporal e, conseqüentemente, as correlações. Um menor valor da janela móvel, ao se aplicar a filtragem SG, pode ser pensado, ao combinar com os métodos de uso de um valor único, para ter um efeito menor de suavização e a AAC ter pouca alteração no seu valor.

O método VM teve o melhor desempenho para ser utilizado junto à filtragem Savitzky-Golay (SG), para o EVI e NDVI, no estudo das correlações com as variáveis de campo, possivelmente, pelo filtro SG ser um polinômio que preserva os pontos máximos da série temporal e altera dados sem confiabilidade. Esse estudo demonstrou que a combinação dos métodos de filtragem com os métodos de extração dos dados das imagens EVI/NDVI faz-se necessária.

A filtragem SG proporcionou melhores correlações utilizando o método VM. Porém a FC pode mascarar o comportamento normal do perfil espectro temporal pela resposta da planta aos fenômenos naturais que ocorrem nas culturas, como ataque de pragas, intempéries e principalmente, variações climáticas.

Não aplicar um método de filtragem, em série temporal MODIS, resultará na utilização de dados não confiáveis em pesquisas que envolvem IV's. A filtragem parcial (FP) retrata a verdadeira assinatura espectral dos IV's, já que não influencia nos valores dos *pixels* confiáveis, sendo somente os *pixels* com valores anômalos tratados. Porém, neste estudo, a filtragem de toda a série temporal (FC) proporcionou forte relação do EVI com as variáveis de campo.

5 CONCLUSÃO

A filtragem SG foi ferramenta necessária ao estudo diante dos diversos ruídos presentes em séries temporais de IV's do sensor MODIS. Com a filtragem de toda a série temporal (FC), identificou-se forte correlação do EVI com os atributos físicos do solo, porém a FC pode mascarar o comportamento do perfil espectro temporal em razão dos fenômenos naturais que ocorrem em áreas produtivas.

Entre o NDVI e EVI, o EVI (FC) foi o melhor índice para estabelecer a relação da resposta espectral da cultura da soja com a textura e MOS, e o NDVI (FP) para a correlação com a produtividade. Constatou-se a necessidade de usar a filtragem SG nos valores do EVI, considerando estádios específicos do ciclo fenológico, para a relação temporal e espectral da cultura da soja com essas variáveis.

Houve correlação do NDVI (FP) com a produtividade observada em campo no estádio R2, 50 dias antes da colheita. O IV nesse estádio pode ser a variável relevante para geração de modelo agrônômico na estimativa da produtividade antes da colheita. O EVI (FC) correlacionou-se com a textura e MOS, no estádio V5 e R1, 40 e 56 dias após a germinação, respectivamente.

O método AAC mostrou-se viável para ser utilizado com a filtragem parcial (FP). Já o método VM proporcionou forte correlação com as variáveis de campo e mostrou-se viável para ser utilizado com a filtragem de toda a série temporal (FC).

A resolução espacial do sensor orbital MODIS mostrou-se viável para ser utilizado em estudos envolvendo talhões de cultivo com média de 100 ha, como nas grandes fazendas produtoras do estado do MT.

A partir da imagem MODIS e informação do estádio fenológico da soja com maior correlação espectral com os atributos físicos do solo, pode-se realizar

a modelagem preditiva, com o intuito de fornecer dados de qualidade sobre a variabilidade espacial desses atributos no solo, reduzindo o número de amostras de solos enviadas para análises laboratoriais e, conseqüentemente, os custos para a obtenção desses dados.

REFERÊNCIAS

- ADAMI, M. **Estimativa da data de plantio da soja por meio de séries temporais de imagens MODIS**. 2010. 163 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.
- ALVAREZ V. V. H. et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 25-32.
- ALVES, M. C.; SILVA, F. M. **Geomática para levantamento de ambientes: base para aplicações em topografia, georreferenciamento e agricultura de precisão**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2016. v. 1, 650 p.
- ANCHIETA, L. **Amostragem de solo em agricultura de precisão: particularidades e recomendações**. 2012. 106 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
- ANTUNIASSI, U. R.; BAIO, F. H. R.; SHARP, T. C. Agricultura de precisão. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRO DOS PRODUTORES DE ALGODÃO. (Org.). **Algodão no cerrado do Brasil**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2011. v. 1, p. 1051-1082.
- ARVOR, D. et al. Comparison of multitemporal MODIS-EVI smoothing algorithms and its contribution to crop monitoring. In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2008, Boston. **Proceedings...** Boston: IEEE, 2008. v. 5, p. 958-961.
- BOLTON, D. K.; FRIEDL, M. A. Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 173, p. 74-84, May 2013.
- BORGES, A. C. **Topografia aplicada à engenharia civil**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2013. v. 2, 216 p.
- BORKERT, C. V. et al. **Seja o doutor da sua soja**. Brasília: Potafos, 1994. 6 p. (Informações Agronômicas, n. 66).

BRADLEY, B. A. et al. A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite NDVI data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 106, n. 2, p. 137-145, Jan. 2007.

BREDEMEIER, C. et al. Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 7, p. 1147-1154, jul. 2013.

BREUNIG, F. M. et al. Variation of MODIS reflectance and vegetation indices with viewing geometry and soybean development. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 84, n. 2, p. 263-274, abr. 2012.

CHAVES, M. E. D. et al. A geostatistical approach for modeling soybean crop area and yield based on census and remote sensing data. **Remote Sensing**, Oxford, v. 10, n. 5, p. 680, 2018.

CHEN, J. et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky–Golay filter. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 91, n. 3/4, p. 332-344, June 2004.

COSTA, E. M.; SILVA, H. F.; RIBEIRO, P. R. A. Matéria orgânica do solo e o seu papel na manutenção e produtividade dos sistemas agrícolas. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 17, p. 1842-1860, 2013.

COUTO JÚNIOR, A. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, E. S. Séries temporais de NDVI, EVI e NDWI do sensor MODIS para caracterização fenológica do algodão. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 65, n. 1, p. 199-210, 2013.

CUNHA, A. S. (Coord.). **Uma avaliação da sustentabilidade da agricultura nos cerrados**. Brasília: IPEA, 1994. 204 p.

DADOS climáticos para cidades mundiais. **Climate-Data**, Brasília, 2017. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/location/43159/>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

DALMOLIN, R. S. et al. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, Santa Marina, v. 35, n. 2, p. 481-489, mar./abr. 2005.

DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística sem matemática para psicologia**: usando SPSS para Windows. Porto Alegre: Artmed, 2006. 680 p.

DIDAN, K.; HUETE, A. **MODIS vegetation index product series collection 5 change summary**. Tucson: The University of Arizona, 2006. 17 p.

DU, Y. et al. Radiometric normalization, composition, and quality control for satellite high resolution image mosaics over large areas. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 39, n. 3, p. 623-634, Mar. 2001.

EARTH Explorer. **U.S. Geological Survey**, Survey, 2014. Disponível em: <<https://www.earthexplorer.usgs.gov>>. Acesso em: 15 maio 2016.

EARTH RESOURCES OBSERVATION AND SCIENCE – EROS. **MODIS reprojection tool user's manual**: release 4.1. Sioux Falls: EROS, 2011. 69 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil 2012 e 2013**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 262 p.

_____. **Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil 2004**. Londrina: Embrapa Soja, 2003. 237 p.

ESQUERDO, J. C. D. M.; COUTINHO, A. C.; ANTUNES, J. F. G. A. Uso combinado de dados NDVI/MODIS dos satélites Terra e Aqua no monitoramento multi-temporal de áreas agrícolas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 431-437.

FARIAS, J. R. B. et al. **A cultura da soja no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2000.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 97 p.

FONTANA, D. C. et al. Monitoramento da cultura da soja no centro-sul do Brasil durante a La Niña 1998/2000. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 135-145, 2003.

FRANCHINI, J. C. et al. **Soja em solos arenosos**: papel do Sistema Plantio Direto e da Integração Lavoura-Pecuária. Londrina: Embrapa Soja, 2016. 10 p. (Circular Técnica, 116).

FREITAS, R. M. et al. Virtual laboratory of remote sensing time series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. **Journal of Computational Interdisciplinary Sciences**, São José dos Campos, v. 2, n. 1, p. 57-68, 2011.

FURTINI NETO, A. E. et al. **Fertilidade do solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 252 p.

GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; BREUNIG, F. M. Relações entre índices de vegetação e produtividade de soja com dados de visada fora do nadir do sensor Hyperion/EO-1. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 1095-1102.

GENÚ, A. M.; DEMATTÊ, J. A. M.; FIORIO, P. R. Análise espectral de solos da Região de Mogi-Guaçu (SP). **Semina: ciências agrárias**, Londrina, v. 31, p. 1235-1244, fev. 2010.

GLENN, E. P. et al. Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: what vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. **Sensors**, Basel, v. 8, n. 4, p. 2136-2160, Mar. 2008.

GOLTZ, E. et al. Uso de medidas radiométricas a campo para aferir a precisão das imagens reflectância do sensor MODIS. In: SIMPÓSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCION REMOTA Y SISTEMA DE INFORMACION ESPACIAL, 11., 2004, Santiago. **Proceedings...** Santiago: [s.n.], 2004. p. 1-8.

GROFF, E. C. et al. Características agrônômicas associadas com índices de vegetação medidos por sensores ativos de dossel na cultura de soja. **Semina: ciência agrária**, Londrina, v. 34, n. 2, p. 517-526, 2013.

HIRD, J. N.; MCDERMID, G. J. Noise reduction of NDVI time series: an empirical comparison of selected techniques. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 113, n. 1, p. 248-258, Jan. 2009.

HOLBEN, B. N. Characteristics of maximum value composite images from temporal AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 7, n. 11, p. 1417-1435, 1986.

HUETE, A. et al. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 59, n. 3, p. 440–451, Mar. 1997.

_____. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 83, n. 1/2, p. 195- 213, Nov. 2002.

IGREJA, A. C. M.; PACKER, M. F.; ROCHA, M. B. **A evolução da soja no Estado de Goiás e seu impacto na composição agrícola**. São Paulo: IEA, 1988. 20 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA- IBGE. **Manual técnico de pedologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 316 p.

_____. **Produção agrícola nacional**. Brasília: IBGE, 2017. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618#resultado>>. Acesso em: 8 nov. 2017.

JACÓBSEN, L. O.; FONTANA, D. C.; SHIMABUKURO, Y. E. Alterações na vegetação em macrozonas do Rio Grande do Sul associadas a eventos El Niño e La Niña, usando imagens NOAA. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 361-374, 2003.

JENSEN, J. R. et al. **Down to Earth**: geographic information for sustainable development in Africa. Washington: National Academy Press, 2002. 155 p.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: Parênteses, 2010. 598 p.

JOHANN, J. A. et al. Uso de imagens do sensor orbital modis na estimação de datas do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja para o estado do Paraná – Brasil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 36, n. 1, p. 126-142, jan./fev. 2016.

JUSTINA, D. D. D. et al. Geração de perfis espectro-temporais de NDVI para diferentes cultivares de soja. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 8838-8844.

KOBAYASHI, H.; DYE, D. G. Atmospheric conditions for monitoring the long-term vegetation dynamics in the Amazon using normalized difference vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 97, n. 4, p. 519-525, Sept. 2005.

KOLCHINSKI, E. M.; SCHUCH, L. O. B.; PESKE, S. T. Vigor de sementes e competição intra-específica em soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 6, p. 1248-1256, nov./dez. 2005.

LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER – LP DAAC. **MODIS reprojection tool for windows NT+32-bit**. Sioux Falls: LP DAAC, 2014a.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: UNIDERP, 2007. 865 p.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Uso eficiente de fertilizantes e corretivos agrícolas: aspectos agronômicos**. 3. ed. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos, 2000. 61 p.

LÓPES-GRANADOS, F. et al. Using geostatistical and remote sensing approaches for mapping soil properties. **European Journal of Agronomy**, Montrouge Cedex, v. 23, n. 3, p. 279-289, Oct. 2005.

MA, B. L. et al. Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, n. 6, p. 1227-1234, Jan. 2001.

MA, M.; VEROUSTRAETE, F. Reconstructing pathfinder AVHRR land NDVI time series data for the Northwest of China. **Advances in Space Research**, Oxford, v. 37, n. 4, p. 835-840, 2006.

MAATOUG, L. et al. Monitoramento da fenologia de culturas através de Sensoriamento Remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 453-459.

MORAES, R. A.; ROCHA, J. V. Imagens de coeficiente de qualidade (Quality) e de confiabilidade (Reliability) para seleção de pixels em imagens de NDVI do sensor MODIS para monitoramento da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 547-552.

MORENO, R. et al. Extreme learning machines for soybean classification in remote sensing hyperspectral images. **Neurocomputing**, Amsterdam, v. 128, p. 207-216, Mar. 2014.

MUELLER, C. C. Dinâmica, condicionantes e impactos socioambientais da evolução da fronteira agrícola no Brasil. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 3, p. 64-87, jul./set. 1992.

MUNDSTOCK, C. M.; THOMAS, A. L. **Soja**: fatores que afetam o crescimento e rendimento de grãos. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 31 p.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NRC. **Precision agriculture in the 21st Century**. Washington: National Academy Press, 1997. 149 p.

NEIVERTH, W. et al. NDVI de estádios fenológicos da soja BRS 284 de crescimento indeterminado em casa de vegetação. In: JORNADA ACADÊMICA DA EMBRAPA SOJA, 8., 2013, Londrina. **Resumos expandidos...** Londrina: Embrapa Soja, 2013. p. 204-209.

NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. Estádios de desenvolvimento da cultura de soja. In: BONATO, E. R. (Ed.). **Estresses em soja**. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 2000. p. 19-44.

NOETZOLD, R. **Sojicultura de precisão no cerrado de Mato Grosso**. 2015. 76 p. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2015.

OLIVEIRA, J. C. **Janela de regressão**: uma análise espacial e temporal para estimar valores de NDVI classificados com baixa qualidade em séries temporais MODIS. 2014. 93 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

OLIVEIRA JUNIOR, A. et al. **Adubação potássica da soja**: cuidados no balanço de nutrientes. Piracicaba: IPNI, 2013. 10 p. (Informações Agronômicas, n. 143).

PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENSES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. (Org.). **Sensoriamento remoto**: reflectância dos alvos naturais. Brasília: Embrapa Cerrados, 2001. p. 157-199.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 126 p.

QUEIROZ, R. P. **Inter-relação da produtividade da soja com atributos de um latossolo vermelho distroférico sob plantio direto no cerrado**. 2009. 163 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

RAMME, F. L. P.; LAMPARELLI, R. A. C.; ROCHA, J. V. Perfis temporais NDVI MODIS, na cana-soca, de maturação tardia. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 480-494, jun. 2010.

REN, J. Q.; CHEN, Z. X.; TANG, H. J. Regional scale remote sensing-based yield estimation of winter wheat by using MODIS-NDVI data: a case study of Jining City in Shandong Province. **Chinese Journal of Applied Ecology**, Shenyang Shi, v. 17, n. 12, p. 2371-2375, Dec. 2006.

RESENDE, M. et al. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 5. ed. Viçosa: NEPUT, 2014. 322 p.

RISSO, J. et al. Potencialidade dos índices de vegetação EVI e NDVI dos produtos MODIS na separabilidade espectral de áreas de soja. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 379-386.

RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T. Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo para estimar a produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 1, p. 73-80, jan. 2007.

ROBERT, P. C. Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management. **Plant and Soil**, The Hague, v. 247, n. 1, p. 143-149, Nov. 2002.
RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. 26 p.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. **Proceedings...** Washington: NASA, 1973. v. 1, p. 309-317.

SAKAMOTO, T. et al. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 96, n. 3/4, p. 366-374, June 2005.

SANTOS, D. S. et al. Atributos físicos e matéria orgânica de áreas de Latossolo utilizadas para atividade pecuária no bioma cerrado. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 4, p. 500-508, jul/ago. 2012.

SANTOS, F. C. et al. Produtividade e aspectos nutricionais de plantas de soja cultivadas em solos de cerrado com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 2015-2025, set./out. 2008.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

SANTOS, W. J. R. et al. Soil moisture in the root zone and its relation to plant vigor assessed by remote sensing at management scale. **Geoderma**, Amsterdam, v. 221/222, p. 91-95, June 2014.

SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical Chemistry**, Washington, v. 36, n. 8, p. 1627-1639, July 1964.

SCHAFER, R. W. What is a Savitzky-Golay filter. **IEEE Signal Processing Magazine**, New York, v. 28, n. 4, p. 111-117, July 2011.

SEELAN, S. K. et al. Remote sensing applications for precision agriculture: a learning community approach. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 88, n. 1/2, p. 157-169, Nov. 2003.

SILVA, A. J. et al. A refletância na estimativa do efeito de fungicidas no controle da ferrugem asiática da soja. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 35, n. 1, p. 53-56, jan./fev. 2009.

SILVA, C. A. et al. Amostragem de solo em área de soja sob plantio direto: uso de técnicas de agricultura de precisão. **Comunicado Técnico**, Rio de Janeiro, n. 10, p. 1-8, set. 2002.

SILVA, D. A. A. da; SANTI, A. L.; DAL, R. A. M. Perfil de NDVI em estádios de desenvolvimento de soja em função de diferentes plantas de coberturas do solo no Rio Grande do Sul. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 11, n. 22, p. 2340-2348, dez. 2015.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 275-374.

SILVA JUNIOR, C. A. da et al. Comparação de áreas de soja (*Glycine max* (L) Merr.) obtidos através da interpretação de imagens TM/Landsat e MODIS/Terra no município de Maracaju (MS). **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, supl. 2, p. 707-716, out. 2014.

SILVA JUNIOR, M. 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.

SILVEIRA, S. W. G. **Análise de desempenho de produtos MODIS para modelagem da dinâmica de inundação do Pantanal Mato-Grossense**. 2015.100 p. Tese (Doutorado em Física Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2015.

SISTEMA DE ANÁLISE TEMPORAL DA VEGETAÇÃO. Disponível em: <[https:// www.satveg.cnptia.embrapa.br/satveg/](https://www.satveg.cnptia.embrapa.br/satveg/)>. Acesso em: 10 ago. 2017.

SOLANO, R. et al. **MODIS vegetation indices (MOD13) C5 user's guide: terrestrial biophysics and remote sensing lab**. Arizon: University of Arizona, 2010. Disponível em: <<http://www.ctahr.hawaii.edu/grem/modis-ug.pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2016.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

VITTI, G. C.; TREVISAN, W. **Manejo de macro e micronutrientes para alta produtividade da soja**. Piracicaba: Potafos, 2000. 16 p. (Informações Agronômicas, 90).

WEBER, E. A. **Excelência em beneficiamento e armazenamento de grãos**. Canoas: Salles, 2005. 586 p.

WENDLING, A. **Sensoriamento remoto para identificação da variabilidade do índice de massa da soja e auxílio no diagnóstico de suas causas**. 2014. 74 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

ZANZARINI, F. V. et al. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 17, p. 608-614, jun. 2013.

ZHANG, T. et al. Detecting soil salinity with MODIS time series VI data. **Ecological Indicators**, New York, v. 52, p. 480-489, May 2015.