



ARTIGO ORIGINAL

## Relação espectro-temporal de índices de vegetação com atributos do solo e produtividade da soja

### *Spectral-temporal relationship of vegetation indexes with soil attributes and soybean yield*

Filipe Silveira Trindade<sup>1\*</sup>   
Marcelo de Carvalho Alves<sup>1</sup>   
Rafael Noetzold<sup>2</sup>   
Igor Carvalho de Andrade<sup>1</sup>   
Adélia Aziz Alexandre Pozza<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Lavras (UFLA/DEA),  
Aqueanta Sol, 37200-000, Lavras, MG, Brasil

<sup>2</sup> Universidade do Estado de Mato Grosso  
(UNEMAT/DA), Avenida das Arapongas,  
1384N, 78450-000, Nova Mutum, MT, Brasil

<sup>3</sup> Universidade Federal de Lavras (UFLA/DCS),  
Aqueanta sol, 37200-000, Lavras, MG, Brasil

\*Corresponding author:

E-mail: [filipe.strindade@gmail.com](mailto:filipe.strindade@gmail.com)

#### PALAVRAS-CHAVE

*Glycine max* L. Merr.  
Ciclo fenológico  
Sensoriamento remoto  
NDVI  
EVI

#### KEYWORDS

*Glycine max* L. Merr.  
Phenological cycle  
Remote sensing  
NDVI  
EVI

**RESUMO:** Recentes pesquisas, com auxílio da tecnologia, têm encontrado resultados satisfatórios visando o manejo adequado das culturas agrícolas. Assim sendo, este estudo procurou avaliar 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, no Mato Grosso (MT), na safra 2012/2013. Utilizaram-se o EVI/NDVI dos produtos do sensor orbital MODIS (MOD13Q1 e MYD13Q1) e a filtragem Savitzky-Golay (SG) para correção dos ruídos (valores anômalos) presentes em séries temporais desses IVs. Foi utilizada a correlação de Pearson ( $r$ ) ( $p \leq 0,05$ ), entre as variáveis supracitadas com a aplicação da filtragem SG na série temporal dos índices durante o ciclo fenológico da cultura. Foram identificados os melhores estádios fenológicos para se gerar modelos preditivos sobre a variabilidade dos atributos do solo e a previsão da 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. Com NDVI no estágio fenológico R2 obteve  $R^2 = 0,44$  com a produtividade. O EVI nos estádios R1, R2 e R3 (início do ciclo reprodutivo) gerou os melhores modelos de previsão dos atributos do solo e o NDVI no estágio R2 para previsão da produtividade. A filtragem SG foi ferramenta necessária ao estudo, pois a correção dos ruídos nas séries temporais, de forma geral, gerou melhores modelos preditivos.

**ABSTRACT:** Recent researches, with the aid of technology, have shown satisfactory results aiming at the proper management of agricultural crops. Therefore, this study sought to evaluate the spectral and temporal relationships of the MODIS sensor *normalized difference vegetation index* (NDVI) and *enhanced vegetation index* (EVI) with grain yield, relief, texture and soil organic matter (SOM), during the soybean phenological cycle in Campo Verde (MT), in the 2012/2013 harvest. 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 IVs were used. Pearson's ( $r$ ) ( $p \leq 0,05$ ) correlation was used, between the aforementioned variables with the application of SG filtering in the time series of the indices during the phenological cycle of the crop. The best phenological stages were identified to generate predictive models on soil attributes variability and productivity prediction. The coefficients of determination ( $R^2$ ) of EVI in the R1 stage 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 it was obtained  $R^2 = 0.44$ , with the productivity. The EVI at R1, R2 and R3 stages (beginning of the reproductive cycle) generated the best soil attributes prediction models, while the NDVI at the R2 stage resulted in the best productivity prediction. Overall, the SG filtering was a necessary tool to study, because the noise correction in the time series generated better predictive models.

## 1 Introdução

As técnicas de sensoriamento remoto (SR), principalmente utilizando os índices de vegetação (IVs), podem auxiliar no estudo de padrões espectrais e temporais da soja (*Glycine max* L. Merr.) durante seu ciclo fenológico e na relação desse grão com os fatores que condicionam o seu desenvolvimento e produção, como os atributos físicos do solo, clima e relevo. O conhecimento da distribuição espacial das deficiências no campo e o emprego das tecnologias auxiliam no manejo adequado, no uso de insumos de forma econômica e no rendimento de grãos (López-Granados et al., 2005).

IVs representam a escala de reposta espectral da vegetação, que é a medição do vigor vegetativo da cultura, a qual pode ser afetada por fatores ambientais, de manejo e da própria planta. Com o uso dos IVs na agricultura, pode-se estimar a produção, deficiência de nutrientes, presença de patógenos, estresse hídrico. Também é possível 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, com os quais têm apresentado elevados graus de correlação (Ponzoni & Shimabukuro, 2009). 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) disponibiliza dois tipos de índices de vegetação, já calculados e denominados *normalized difference vegetation index* (NDVI) e *enhanced vegetation index* (EVI). Zanzarini et al. (2013) apontam que índices podem ser analisados por meio de valores obtidos em diferentes datas, permitindo avaliar a variação da área verde em certo período de tempo, denominadas séries temporais de IVs.

Entretanto, séries temporais de IVs podem estar sujeitas a interferências por diversos ruídos. Os ruídos são valores anômalos causados por falhas de processamento, presença de

nuvens, falhas do detector, geometria de visada, dentre outros (Kobayashi & Dye, 2005).

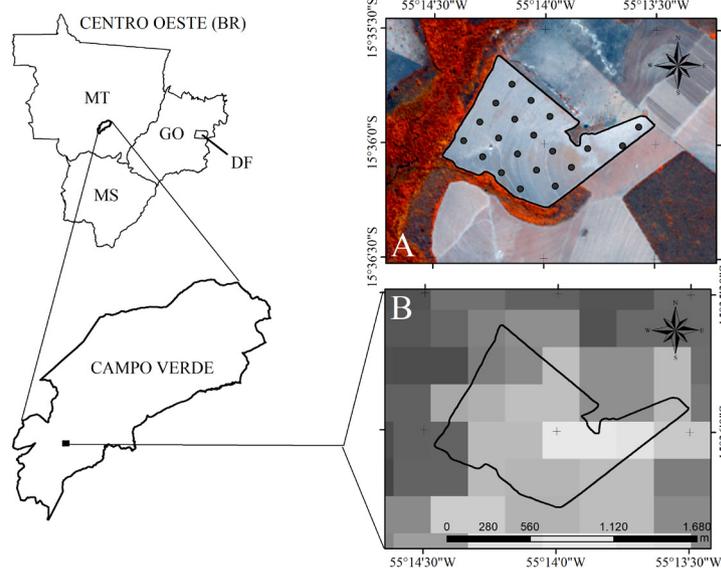
Para corrigir esses dados sem confiabilidade, a técnica de filtragem desenvolvida por Savitzky & Golay (1964), chamada de filtragem Savitzky-Golay (SG), suaviza séries de dados e substitui o valor dos pixels ruidosos da série temporal. Segundo Zhang et al. (2015), o filtro SG detectou a salinidade do solo usando séries temporais de IVs MODIS, sendo um 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 IVs, 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, modelos de predição dos atributos do solo e de previsão da produtividade de grãos podem ser gerados com base na resposta espectral da cultura da soja ao longo de seu ciclo fenológico utilizando IVs em escala de propriedade rural.

Este trabalho objetivou 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.

## 2 Material e Métodos

Os dados *in situ* dessa pesquisa foram coletados em talhão com área de 93,13 hectares (ha), em uma fazenda comercial produtora de soja, no município de Campo Verde, na região centro-sul do estado do Mato Grosso (MT) (Figura 1). O clima da região é tropical quente e subúmido (Aw), segundo o sistema de classificação de Köppen, com a temperatura média variando de 21,4 a 32,8 °C (Serra et al., 2016). O solo predominante da região é o Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico (Santos et al., 2013), e o relevo apresenta declividade plana a suave ondulada (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], 2007).



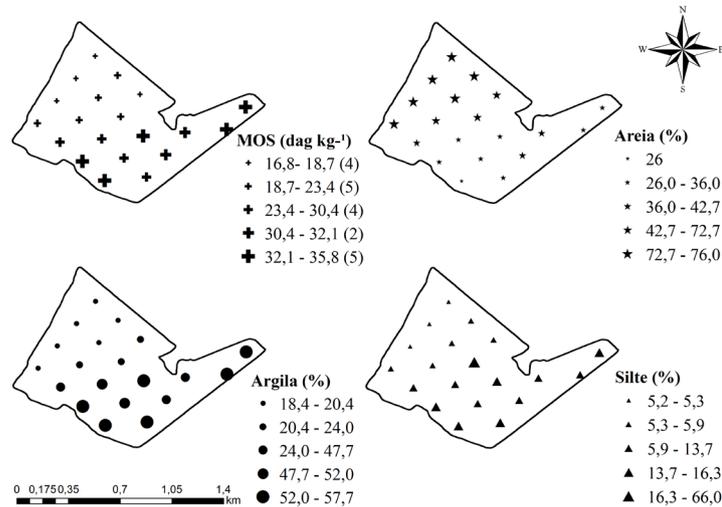
**Figura 1.** Localização geográfica da área de estudo. A) malha utilizada na amostragem de solo sobre uma imagem *Rapideye* com pixel de 5 metros x 5 metros; e B) imagem EVI/MODIS com pixel de 250 metros x 250 metros

**Figure 1.** Geographic location of the study area. A) mesh used in soil sampling on a *Rapideye* image with a pixel of 5 meters x 5 meters; and B) EVI/MODIS image with a pixel of 250 meters x 250 meters

A amostragem de solo foi realizada em agosto de 2012 na profundidade de 0 – 0,20 metros. Dados de textura, matéria orgânica do solo (MOS), terreno e produtividade de grãos por ponto amostral em malha regular foram coletados, seguindo uma escala regular, com distância de 70 metros entre os pontos de coleta, sendo coletadas cinco amostras simples para formar uma composta, sendo essa representada por uma quadrícula de aproximadamente 4,65 ha. Assim, um total de 20 amostras compostas foram coletadas para representar a área (Figura 1A). Foi utilizada parafusadeira com broca de uma polegada

de diâmetro, acoplada em motomodelo bross 150 CC, com GPS Mio P 350 configurado em datum WGS 84, fuso 21S para realizar a coleta.

Após a coleta, as amostras de solo foram encaminhadas ao laboratório para efetuar a análise textural (teores de argila, areia e silte) e da MOS. A Figura 2 representa a localização espacial dos resultados encontrados para cada atributo no talhão. A partir da determinação do carbono (C) e uso de um fator de conversão (1,724 x C), a MOS (dag kg<sup>-1</sup>) foi obtida pela extração em dicromato de sódio 4 mol L<sup>-1</sup> e ácido sulfúrico 10 mol L<sup>-1</sup>.



**Figura 2.** Teores encontrados para cada atributo a partir da análise laboratorial e localização na área de estudo

**Figure 2.** Each attribute content based on the laboratory analysis and location in the study area

A semeadura ocorreu no dia 29 de setembro de 2012 com espaçamento entre linhas de 0,45 metros. 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 de adubação em taxa variável nesse talhão.

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. Utilizou-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% (Equação 1) (Weber, 2005), dado por:

$$Mf = Mi \left( \frac{100 - Ua}{100 - Up} \right) \quad (1)$$

em que:

Mf – a massa final;

Mi – a massa inicial;

Ua – a umidade atual; e,

Up – a umidade padronizada.

Foram calculados a média, valor máximo, valor mínimo, desvio padrão (SD) e coeficiente de variação (CV) para

MOS, textura, produtividade, altitude e declividade a fim de caracterizar a oscilação dessas variáveis na área e também para ter conhecimento do terreno estudado.

A partir da amostragem de solo, foram gerados mapas de variabilidade espacial da MOS, argila, e produtividade usando o método geoestatístico de Interpolação pela Ponderação do Inverso da Distância (IDW), que é um método mais simples para se ter a visualização do padrão espacial dos atributos na área. 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 2):

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} Z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \quad (2)$$

em que:

z – valores estimados;

n – são os números de amostras;

Z<sub>i</sub> – valores conhecidos; e,

d<sub>i</sub> – distâncias entre os valores conhecidos e estimados.

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 (oito dias), proporcionando dados em curto intervalo de tempo, para viabilizar o estudo do ciclo fenológico da soja.

Na página da web da *United States Geological Survey* (2016) foram obtidos 16 produtos MODIS (8 MOD13Q1 e 8 MYD13Q1) para englobar o ciclo fenológico da cultura, 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* (confiabilidade do pixel) para cada data, usando o software MODIS Reprojection Tool (MRT), sendo reprojatadas as imagens para a projeção UTM-WGS-84-Fuso21S e formato GeoTiff (Figura 1B).

O NDVI e EVI foram fornecidos na forma digital pelos produtos MOD13Q1 e MYD13Q1 a cada oito dias, o valor disponibilizado por esses produtos foi referente ao valor máximo do índice capturado pelo sensor MODIS no mesmo pixel durante os oito dias. O cálculo do NDVI é dado pela Equação 3, e do EVI pela Equação 4:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{IVP} - \text{V}}{\text{IVP} + \text{V}} \quad (3)$$

$$\text{EVI} = G \cdot \frac{(\text{IVP} - \text{V})}{(\text{IVP} + C_1 \cdot C_2 \cdot A + L)} \quad (4)$$

em que:

IVP – reflectância no infravermelho próximo;

V – reflectância no vermelho;

A – reflectância no azul;

$C_1$  – coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para a banda do vermelho (6);

$C_2$  – coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para a banda do azul (7,5);

L – fator de correção para a interferência do solo (1); e,

G – fator de ganho (2,5).

Foi possível acompanhar detalhadamente todo o ciclo fenológico da cultivar M 7639 RR, dividido em: a) fase vegetativa (V0: emergência a cotilédones abertos, 0 dias; V1: primeiro nó, 8 dias; V2: segundo nó, 16 dias; V3: terceiro nó, 24 dias; V4: quarto nó, 32 dias; V5: quinto nó, quarto trifólio aberto, 40 dias; e V6: sexto nó, quinto trifólio aberto, 48 dias); b) fase reprodutiva (R1: início da floração, 56 dias; R2: floração plena, 64 dias; R3: final da floração, 72 dias; R4: vagens no terço superior com 2-4 centímetros, 80 dias; R5: enchimento dos grãos, 88 dias; R6: vagens com granação de 100%, 96 dias; R7: início da maturação, 104 dias; R8: 95% das vagens maduras, 112 dias; R9: colheita, 120 dias) (Neumaier et al., 2000).

Para o estágio V0 foi considerada a data sete de outubro de 2012, oito dias após a semeadura. Para o estágio R9 foi considerada a imagem com a data mais próxima à colheita, dia dois de fevereiro de 2013. Como a cultivar é de ciclo semiprecoce (115 a 120 dias) foi considerado o intervalo de oito dias para a mudança de um estágio fenológico para outro, considerando o estágio V6 como final do ciclo vegetativo para essa cultivar.

O produto *reliability* foi 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. Tal produto é também uma imagem *raster*, assim como as imagens de EVI e NDVI, porém os valores dos pixels no *reliability* são, na verdade, códigos identificadores e descrevem a qualidade do valor do pixel atribuído nas imagens EVI e NDVI.

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 o sombreamento, direção do declive, declividade, além da altitude da área representada pelo MDE para melhor análise do terreno. Foi utilizada a plataforma ArcGIS para gerar essas variáveis de relevo. Mapas de terreno foram elaborados a partir desses dados para análise das características da área. Os dados de terreno gerados a partir do MDE, assim como dados de MOS, textura e produtividade 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 oito dias durante o ciclo fenológico da safra foram registradas 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 1h30, sendo essas consideradas as temperaturas de superfície médias diurnas e noturnas, respectivamente. Essas informações foram adquiridas no portal online *SeriesView*, do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) (Freitas et al., 2011), sendo as de temperatura de superfície disponibilizadas a cada 16 dias.

Com as imagens projetadas, foi realizada a extração nos pixels, utilizando os pontos amostrais (vetor) dos valores digitais dos IVs das imagens MODIS (*raster*) e dos valores do pixel *reliability*. As imagens do EVI e NDVI apresentam valores digitais de pixel que variam de -3.000 até 10.000. Esses valores foram divididos por 10.000 para a transformação do valor digital para valor físico, mais utilizado no estudo dos IVs, dentro da escala de -0,3 a 1. Quanto mais próximo de 1, maior é a resposta espectral, devido ao vigor da vegetação.

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

Para substituir os valores dos pixels com ruídos na série temporal, foram obtidos novos valores de NDVI e EVI utilizando a filtragem dos dados originais do sensor MODIS pelo método Savitzky-Golay. Esse filtro está implementado no software Timesat 3.0 (Eklundh & Jönsson, 2012) e foi utilizado para o processo de parametrização da série temporal dos IVs. Foi adotada a janela móvel de tamanho seis, que permite maior suavização do perfil temporal. Os dados foram implementados no software R (R Development Core Team, 2013) para serem feitas a correlação de Pearson ( $p \leq 0,05$ ) com as outras variáveis.

Além de utilizar os valores originais de EVI e NDVI do sensor MODIS (sem filtragem [SF]), as análises de correlação e perfis espectro temporais dos IVs 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 do mesmo ter ruído ou não (filtragem completa [FC]).

Com os dados de campo e valores de NDVI e EVI adquiridos do sensor MODIS em estádios fenológicos específicos, foram feitas as correlações usando o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), considerando a classificação de Dancey e Reidy (2006), em que  $r = 0,1$  até  $0,39$  (fraco);  $r = 0,4$  até  $0,69$  (moderado);  $r = 0,7$  até  $1$  (forte). Foi considerada correlação significativa com  $p \leq 0,05$ .

Foram identificados os melhores estádios fenológicos para se gerar modelos preditivos sobre a variabilidade dos atributos do solo e a previsão da produtividade, aplicando a filtragem Savitzky-Golay (SG) para eliminação dos ruídos na série temporal dos IVs, verificando a aplicabilidade dessa filtragem nesse estudo.

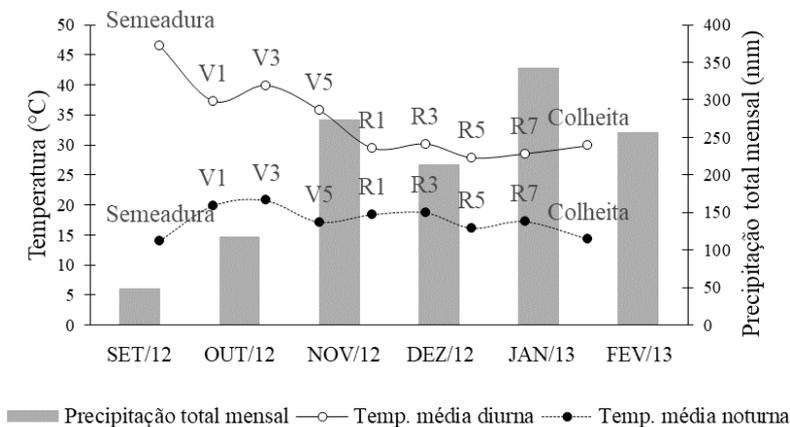
Com o intuito de averiguar a correlação espectral dos IVs com os atributos do solo, foram elaboradas regressões lineares de polinômio de primeira ordem, que indicam a relação de dependência entre as variáveis e geram modelos preditivos.

### 3 Resultados e Discussão

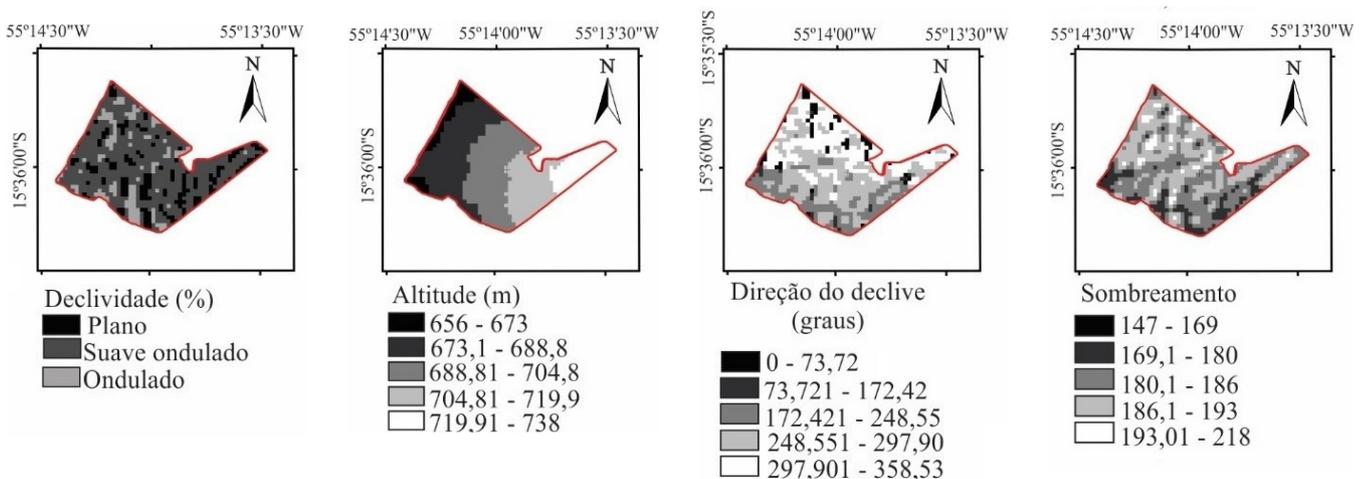
Os dados de precipitação pluvial total mensal (mm) e temperatura média diurna e noturna ( $^{\circ}\text{C}$ ) da área forneceram subsídio ao acompanhamento do clima durante o ciclo fenológico da cultivar M-7639 RR. Essas informações foram utilizadas para caracterizar a variação das variáveis meteorológicas ao longo do tempo na área estudada (Figura 3).

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.

Os mapas de terreno da área de estudo foram gerados por meio do SRTM e os dados desses mapas foram necessários à caracterização do relevo da área e também como variáveis nas correlações com os IVs (Figura 4).



**Figura 3.** Precipitação total mensal e temperatura de superfície diurna e noturna durante o ciclo fenológico da soja na safra 2012/2013 em Campo Verde, MT  
**Figure 3.** Total monthly precipitation and diurnal and nocturnal surface temperature during the soybean phenological cycle in the 2012/2013 harvest in Campo Verde, MT



**Figura 4.** Mapas de análise de terreno da área de estudo derivados da imagem SRTM  
**Figure 4.** Field analysis maps of the study area derived from the SRTM image

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.

As maiores variações na distribuição espacial dos atributos do solo na área do talhão foram encontradas para textura, com coeficiente de variação (CV) de 43,55% para argila, 41,93% para silte e 39,55% para areia, sendo que a argila apresentou maior variação. Pôde ser visto a menor variação da altitude (2,32%) e de produtividade de grãos (9,85%) na área, seguido

pela MOS, com CV de 25% (Tabela 1). Quanto à textura, tamanha variação observada a partir da amostragem de solo na área provavelmente é causada pelo material de origem dos solos (Resende et al., 2014).

Na série temporal utilizando os dados originais (SF) identificou-se o comportamento anômalo da curva temporal causado pelas interferências atmosféricas (ruídos). Já o perfil espectrotemporal do índice durante o ciclo fenológico com a filtragem completa (FC) apresentou curva temporal suavizada, como propõe o método Savitzky-Golay (SG) (Figura 5).

**Tabela 1.** Análise descritiva da produtividade de soja (sacas/ha), textura (%), MOS (dag kg<sup>-1</sup>), declividade (%) e altitude (m) a partir dos pontos amostrais  
**Table 1.** Descriptive analysis of the yield of soybean (bags/ha), texture (%), MOS (dag kg<sup>-1</sup>), slope (%) and altitude (m) from the sample points

Atributo	Média	Máximo	Mínimo	Desvio-padrão	CV(%)
Produtividade	59,25	69,274	45,02	5,839	9,854
Argila	37,67	57,7	18,4	16,416	43,579
Silte	10,155	16,3	5,2	4,258	41,932
Areia	52,175	74,3	26	20,638	39,555
MOS	26,665	35,8	16,8	6,665	24,997
Altitude	696,5	729	678	16,123	2,315

CV = coeficiente de variação

Como visto na Figura 5, 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. Com as filtragens parcial e completa utilizando o filtro SG, corrigiram-se os ruídos presentes no perfil espectro temporal do NDVI e EVI durante o ciclo fenológico.

Quanto menor o valor atingido pelo EVI durante o ciclo fenológico, menor foi o teor de MOS encontrado naquele mesmo pixel do perfil temporal (Figura 5A). 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 5B).

Os picos de NDVI foram identificados nos estádios R3 e R4 (Figura 5D, coluna FC). Resultados semelhantes foram obtidos adquirindo-se o NDVI de forma diferente, por Silva et al. (2015), que utilizaram o aparelho *GreenSeeker 505 Handheld Sensor*, um sensor óptico terrestre ativo que faz medições de NDVI, na banda do vermelho e infravermelho próximo. Eles 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 a medição dos IVs com resultados semelhantes, sendo possível também a análise portátil.

Em relação ao NDVI e à produtividade, não foi verificada diferença na amplitude atingida pelos IVs nas curvas temporais, porém, nos locais com baixa produtividade de grãos, as curvas tiveram comportamentos diferentes entre si (Figura 5C). Já nos locais com alta produtividade de grãos as curvas temporais apresentaram perfil semelhante, atingindo altos valores de NDVI (Figura 5D). Os dados de direção do declive, sombreamento

e declividade não apresentaram correlação ( $p > 0,05$ ) com os IVs nos estádios fenológicos.

O EVI apresentou melhores resultados e correlações mais fortes com a textura e a MOS, porém houve maior correlação com a produtividade utilizando o NDVI. Constatou-se a existência de padrão relacionado aos estádios do ciclo fenológico que apresentam relação com as variáveis em estudo.

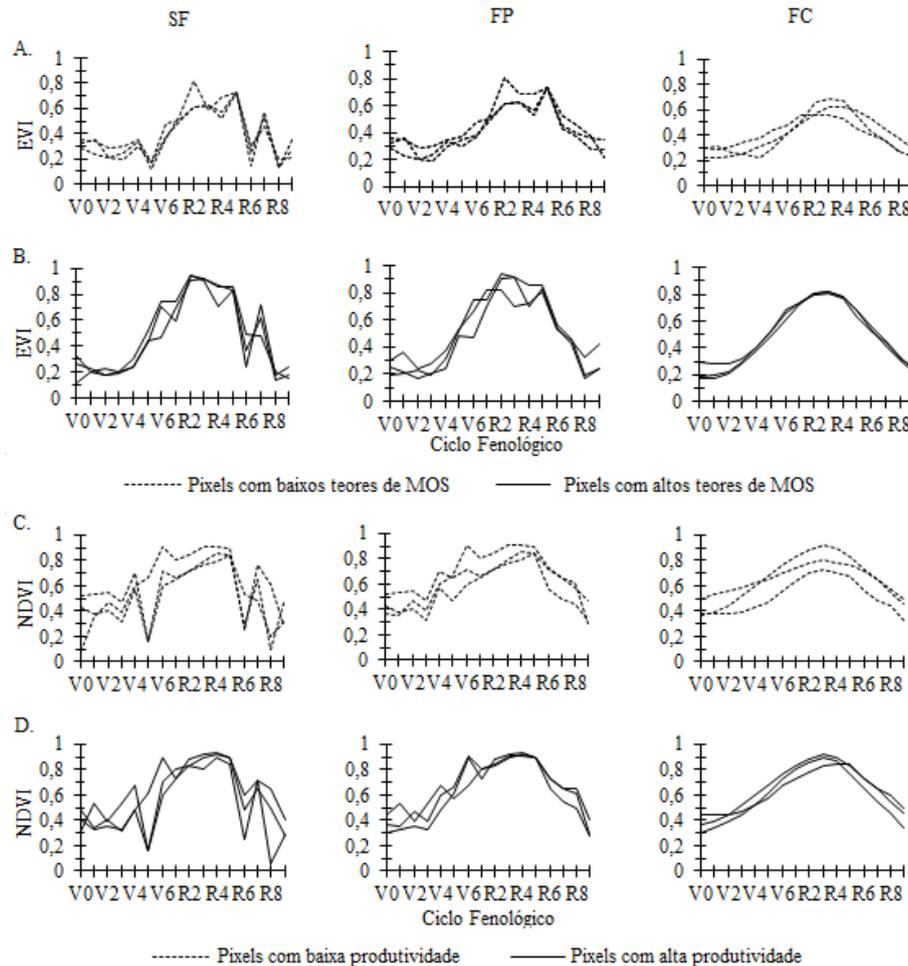
Houve fortes correlações entre o EVI com a FC e as variáveis no fim do ciclo vegetativo e no estágio reprodutivo da cultura da soja, até o estágio R3. Moderada correlação com a produtividade foi verificada no estágio R2 utilizando o NDVI com a FP,  $r = 0,66$ ,  $p = 0,001$ . Para argila e MOS, a correlação mais forte foi com o EVI no estágio R1, com  $r = 0,86$ ,  $p = 0,0000006$  e  $r = 0,88$ ,  $p = 0,0000009$ , respectivamente (Tabela 2). A MOS apresentou as melhores relações com os IVs 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 forte correlação da MOS com o EVI, principalmente em estádios 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 (Santos et al., 2012). 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 estádios vegetativos, principalmente nos primeiros estádios, existe ainda a influência do solo no dado de resposta da cultura captada pelos IVs (Moreira et al., 2004).

Essa relação negativa entre a área arenosa e a resposta do EVI pode ser explicada pelas menores retenção de água e de CTC nos solos mais arenosos. Segundo Franchini et al. (2016),

as áreas arenosas onde ocorre a expansão da soja se encontram em 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.



**Figura 5.** Perfis espectrotemporais dos IVs durante o ciclo fenológico da safra 2012/2013 na área de estudo utilizando valores de EVI e NDVI sem a filtragem (coluna SF); valores de EVI e NDVI com pixels não confiáveis filtrados (coluna FP); valores de EVI e NDVI completamente filtrados (coluna FC). Linha: A. Perfil espectro temporal em três pixels em que a amostragem de solo resultou em baixos teores de MOS (1,68; 1,74; 2,06 dag kg<sup>-1</sup>); B. Perfil espectro temporal em três pixels em que a amostragem de solo resultou em altos teores de MOS (3,58; 3,48; 3,39 dag kg<sup>-1</sup>); C. Perfil espectro temporal em três pixels com baixa produtividade de grãos calculada (45,02; 50,43; 54,22 sacas ha<sup>-1</sup>); e D. Perfil espectro temporal em três pixels com alta produtividade de grãos calculada (69,27; 66,85; 65,78 sacas ha<sup>-1</sup>)

**Figure 5.** Spectral temporal profiles of the IV's during the phenological cycle of the crop 2012/2013 in the study area using EVI and NDVI values without filtration (SF column); EVI and NDVI values with filtered untrusted pixels (FP column); fully filtered EVI and NDVI values (FC column). Line: A. three-pixel temporal spectrum profile in which soil sampling resulted in low levels of MOS (1.68, 1.74, 2.06 dag kg<sup>-1</sup>); B. Three-pixel temporal spectrum profile in which soil sampling resulted in high levels of MOS (3.58, 3.48, 3.39 dag kg<sup>-1</sup>); C. Temporal spectrum profile in three pixels with low grain yield (45.02, 50.43, 54.22 bags ha<sup>-1</sup>); and D. Profile three-pixel temporal spectrum with high grain yield (69.27, 66.85, 65.78 bags ha<sup>-1</sup>)

A partir das fortes correlações de Pearson identificadas, geraram-se os modelos de regressão entre os índices e as variáveis de forma linear. A filtragem completa da série temporal (FC) dos IVs retornou os melhores resultados com os atributos físicos do solo e a filtragem parcial (FP) com a produtividade.

Os coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) do EVI no estágio R1 com MOS, argila, silte e areia, foram, respectivamente, R<sup>2</sup> = 0,77; 0,75; 0,74; 0,75. Usando o NDVI no estágio fenológico R2, 50 dias antes da colheita, foi obtido R<sup>2</sup> = 0,44 com a produtividade (Figura 6).

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<sup>2</sup> = 0,75 e R<sup>2</sup> = 0,77, respectivamente.

Bredemeier et al. (2013) apontaram que a banda do infravermelho próximo, utilizada no cálculo do NDVI, estima o acúmulo de biomassa e do estágio de desenvolvimento da cultura, refletindo seu potencial produtivo. Esse fato pode ter contribuído para que o NDVI tenha correlacionado melhor com a produtividade do que o EVI.

**Tabela 2.** Coeficientes de correlação de Pearson ( $p \leq 0,05$ ) do EVI e NDVI com a produtividade (sacas  $ha^{-1}$ ), MOS (dag  $kg^{-1}$ ), 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)

**Table 2.** Pearson correlation coefficients ( $p \leq 0,05$ ) of EVI and NDVI with yield (bags  $ha^{-1}$ ), MOS (dag  $kg^{-1}$ ), texture (%) and altitude (m) in soybean phenological stages, using physical values of the original EVI / NDVI of the MODIS (SF) sensor, with noisy pixel correction (FP) and with the correction of the entire temporal spectrum profile (FC)

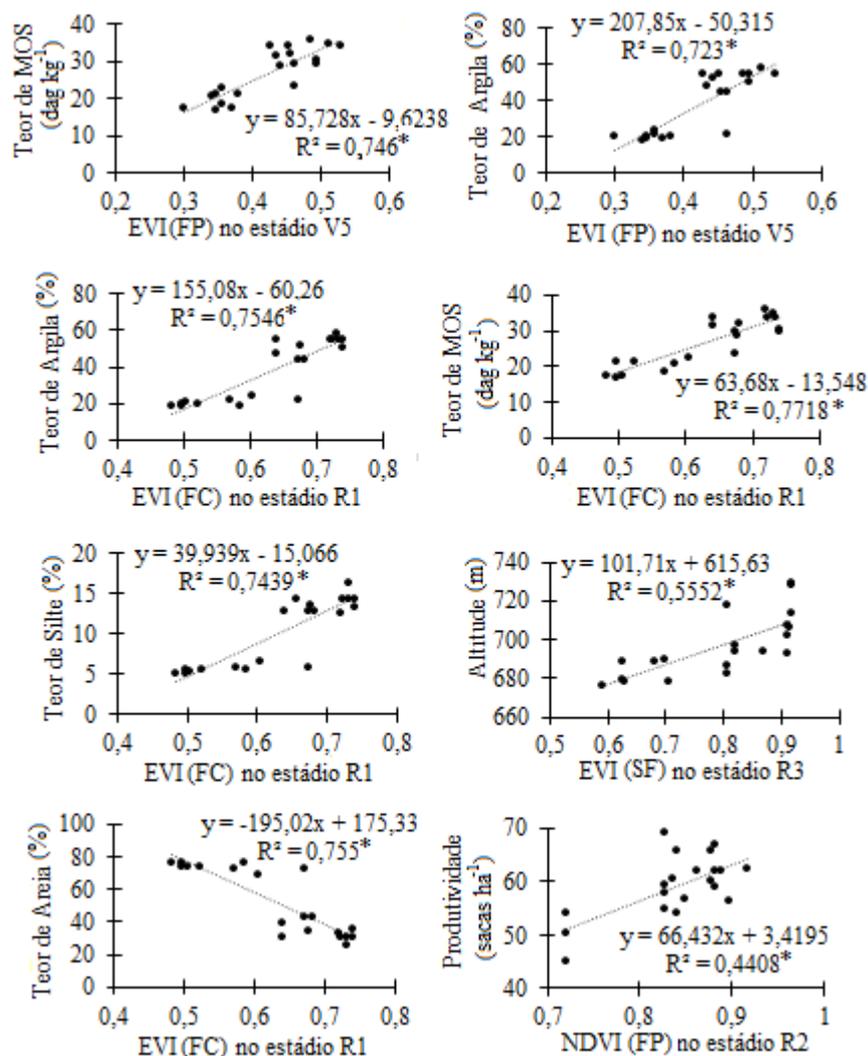
		EVI								
Atributo	Filtragem	Estádios fenológicos								
		V4	V5	V6	R1	R2	R3	R4	R5	R8
Produtividade						0,54	0,57	0,54		
MOS			0,59	0,48	0,75	0,62	0,77	0,62	0,67	0,47
Argila	SF		0,56	0,53	0,73	0,57	0,77	0,56	0,64	
Silte			0,56	0,54	0,74	0,58	0,76	0,54	0,64	
Areia			-0,56	-0,53	-0,74	-0,57	-0,77	-0,56	-0,64	
Altitude			0,69			0,46	0,74	0,66	0,57	0,53
Produtividade						0,54	0,60	0,54	0,45	
MOS			0,86	0,58	0,75	0,62	0,75	0,62	0,52	0,67
Argila	FP		0,85	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	FC	0,63	0,82	0,84	0,88	0,85	0,82	0,75	0,67	0,53
Argila		0,64	0,81	0,83	0,86	0,84	0,78	0,69	0,60	0,47
Silte		0,63	0,80	0,83	0,86	0,83	0,79	0,71	0,62	0,46
Areia		-0,64	-0,81	-0,83	-0,89	-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
		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	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			

Com o desenvolvimento da cultura, as correlações desse índice com a produtividade ocorreram em estádios específicos do ciclo, pois a superfície de fundo (solo e resíduos vegetais) passaram 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*. 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 4). Possivelmente essa região do visível contribuiu para melhores correlações do EVI com a textura e MOS.

Os IVs das imagens MODIS nesse estudo não apresentaram considerável poder preditivo para a produtividade a partir das correlações, apesar de terem apresentado uma tendência na curva da regressão (Figura 6). Por outro lado, a relação dos IVs com os atributos do solo, a partir dos R<sup>2</sup> obtidos foram consideráveis, mesmo utilizando um sensor de moderada resolução espacial.

A geração de tais modelos também demonstra que é possível utilizar sensores, até mesmo de média resolução espacial, dependendo do tamanho da área de estudo, para prever atributos no solo. Além de demonstrar a importância de definir a malha amostral com base na resolução espacial do sensor que será utilizado no estudo. Isso reduz o número de amostras de solos enviadas para análises laboratoriais e, conseqüentemente, os custos para a obtenção dos resultados desejados.



**Figura 6.** 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: (\*) significativo  $p \leq 0,05$

**Figure 6.** Linear relationship and regression models of field variables with EVI and NDVI values at specific stages of the phenological cycle under different SG filtering uses. EVI and NDVI values without filtering (SF); EVI and NDVI values with filtered untrusted pixels (FP); fully filtered EVI and NDVI values (FC)

Legend: (\*) significant  $p \leq 0.05$

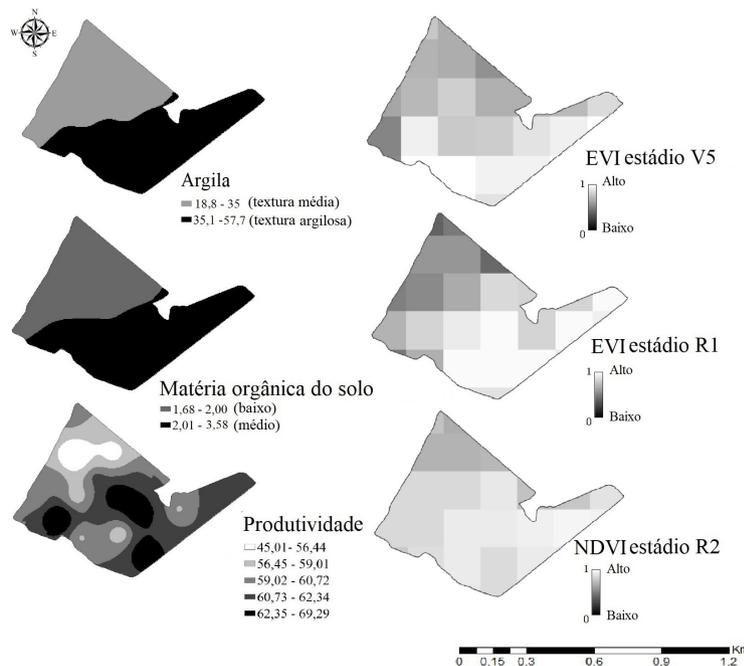
A variabilidade dos atributos do solo no agrossistema foi observada pelos mapas interpolados, com esses mapas pôde-se realizar uma correspondência espacial com as imagens MODIS nas datas em que os estádios fenológicos tiveram maior  $R^2$  com a argila, MOS e produtividade. A argila e a MOS apresentaram variabilidade espacial semelhante em termos de distribuição no talhão (Figura 7).

Na busca do desenvolvimento de modelos empíricos para previsão do rendimento de milho e soja na região central dos Estados Unidos, Bolton & Friedl (2013) identificaram o 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. Segundo eles, as informações da fenologia de culturas detectadas remotamente são úteis para aplicações de monitoramento e mapeamento. Os estádios V5, R1 e R2 foram os mais importantes do ciclo fenológico da cultivar M-7639 RR para se detectar possíveis alterações

espectrais na soja como reflexo das condições de solo, ou outros fatores, para uma possível intervenção e manejo.

Identificou-se forte correlação entre o EVI e os atributos físicos do solo em específicos estádios fenológicos. Houve correlação do NDVI com a produtividade observada em campo no estádio R2, 50 dias antes da colheita. O EVI correlacionou-se com a textura e MOS no estádio V5 e R1, 40 e 56 dias após a germinação, respectivamente.

A interação solo, planta e clima pode ter sido apontada como responsável pelas correlações dos IVs com os atributos físicos do solo no início da fase reprodutiva da cultura, nos meses de novembro e dezembro, momento que ocorreu uma maior precipitação na região. O teor de MOS e de argila foram responsáveis pela maior produtividade de grãos de soja na região mais central e sudeste do talhão.



**Figura 7.** 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, estádios do ciclo fenológico que apresentaram as maiores correlações com argila (%), MOS ( $\text{dag kg}^{-1}$ ) e produtividade ( $\text{sacas ha}^{-1}$ )

**Figure 7.** Spatial correspondence of the EVI (stage V5 and R1, 16/11/2012 and 02/12/2012, respectively) and NDVI (stage R2, 10/12/2012) of the MODIS sensor, stages of the phenological cycle that higher correlations with clay (%), MOS ( $\text{dag kg}^{-1}$ ) and productivity ( $\text{bags ha}^{-1}$ )

## 4 Conclusão

A partir da imagem MODIS e informação do estádio fenológico da soja que os IVs apresentam relação com os atributos físicos do solo estudados, pôde ser gerado a modelagem preditiva.

O EVI nos estádios R1, R2 e R3 (início do ciclo reprodutivo) gerou os melhores modelos de predição dos atributos do solo e o NDVI no estádio R2 para previsão da produtividade de grãos.

Dados de qualidade sobre a variabilidade espacial de tais atributos no solo e a previsão de safras podem ser adquiridos com as técnicas de SR, mesmo usando um sensor com imagens de moderada resolução espacial e de uso livre na sociedade.

A correção dos ruídos nas séries temporais dos IVs usando a filtragem SG, de forma geral, otimizou expressivamente os modelos preditivos para as variáveis de solo estudadas.

## Referências

- ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. 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.
- BOLTON, D. K.; FRIEDL, M. A. Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 173, p. 74-84, 2013. doi: 10.1016/j.agrformet.2013.01.007
- BREDEMEIER, C.; VARIANI, C.; ALMEIDA, D.; ROSA, A. T. Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. *Ciência Rural*, v. 43, n. 7, p. 1147-1154, 2013. doi: 10.1590/S0103-84782013005000080

- DANCEY, C.; REIDY, J. *Estatística sem matemática para psicologia: usando SPSS para Windows*. Porto Alegre: Artmed, 2006. 608 p.
- EKLUNDH, L.; JÖNSSON, P. *TIMESAT 3.0: software manual*. Lund: Lund University, 2012. 82 p.
- FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JR, A. A.; DEBIASI, H.; COSTA, J. M.; SICHIERI, F. R.; TEIXEIRA, L. C. *Soja em solos arenosos: papel do sistema Plantio Direto e da integração lavoura-pecuária*. Londrina: Embrapa Soja, 2016. 10 p.
- FREITAS, R. M.; ARAI, E.; ADAMI, M.; FERREIRA, A. S.; SATO, F. Y.; SHIMABUKURO, Y. E.; ROSA, R. R.; ANDERSON, L. O.; RUDORFF, B. F. T. Virtual laboratory of remote sensing time series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. *Journal of Computational Interdisciplinary Sciences*, v. 2, n. 1, p. 57-68, 2011.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Manual técnico de Pedologia*. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 316p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv37318.pdf>. Acesso em: 26 out. 2017.
- 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*, v. 97, n. 4, p. 519-525, 2005. doi: 10.1016/j.rse.2005.06.007
- LÓPEZ-GRANADOS, F.; JURADO-EXPÓSITO, M.; PEÑA-BARRAGÁN, J. M.; GARCÍA-TORRES, L. Using geostatistical and remote sensing approaches for mapping soil properties. *European Journal of Agronomy*, v. 23, n. 3, p. 279-289, 2005. doi: 10.1016/j.eja.2004.12.003
- MOREIRA, M. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T. Análise espectral e temporal da cultura do café em imagens Landsat. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, n. 03, p. 223-231, 2004. doi: 10.1590/S0100-204X2004000300004
- NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B.; OYA, T. Estádios de desenvolvimento da cultura de soja. In: BONATO, E. R. (Ed.). *Estresses em soja*. Passo Fundo: EMBRAPA Trigo, 2000. p. 19-44.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. *Sensoriamento remoto no estudo da vegetação*. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 126 p.
- R Development Core Team. R: *A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2013. ISBN 3-900051-07-0. Disponível em: <http://www.R-project.org>. Acesso em: 20 out. 2016.
- RESENDE, M.; CURTI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. 4. ed. Viçosa: NEPUT, 2014. 338 p.
- SANTOS, D. S.; ARRUDA, E. M.; MORAES, E. R.; FRANCO, F. O.; ARAÚJO, J. R.; RESENDE, T. M.; BORGES, E. N.; RIBEIRO, B. T. Atributos físicos e matéria orgânica de áreas de Latossolo utilizadas para atividade pecuária no bioma cerrado. *Bioscience Journal*, v. 28, n. 4, p. 500-508, 2012.
- SANTOS, F. C.; NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; FOLONI, J. M.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; KER, J. C. Produtividade e aspectos nutricionais de plantas de soja cultivadas em solos de cerrado com diferentes texturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 5, p. 2015-2025, 2008. doi: 10.1590/S0100-06832008000500023
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.
- SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, v. 36, n. 8, p. 1627-1639, 1964. doi: 10.1021/ac602114a047
- SERRA, O. P.; CARDOSO, B. F.; RIBEIRO, A. L. M.; SANTOS, F. A. L.; SLHESSARENKO, R. D. Mayaro virus and dengue virus 1 and 4 natural infection in culicids from Cuiabá, state of Mato Grosso, Brazil. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, v. 111, n. 1, p. 20-29, 2016. doi: 10.1590/0074-027601150270
- SILVA, D. A. A.; SANTI, A. L.; DAL BELLO, R. A. M.; FIORESI, D.; BARON, F. A. 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*, v. 11, n. 22, p. 2340-2348, 2015. doi: 10.18677/Enciclopedia\_Biosfera\_2015\_205
- UNITED STATES Geological Survey (USGS). *Imagens MODIS MOD13Q1 e MYD13Q1*. Quadrante h12v10, 2016. Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 25 mai. 2016.
- WEBER, E. A. *Excelência em beneficiamento e armazenamento de grãos*. Canoas: Salles, 2005. 586 p.
- ZANZARINI, F. V.; PISSARRA, T. C. T.; BRANDÃO, F. J. C.; TEIXEIRA, D. D. B. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 6, p. 608-614, 2013. doi: 10.1590/S1415-43662013000600006
- ZHANG, T. T.; QI, J. G.; GAO, Y.; OUYANG, Z. T.; ZENG, S. L.; ZHAO, B. Detecting soil salinity with MODIS time series VI data. *Ecological Indicators*, v. 52, p. 480-489, 2015. doi: 10.1016/j.ecolind.2015.01.004

**Contribuição dos Autores:** Filipe Silveira Trindade elaborou os processos metodológicos, participou das reuniões, fez a revisão de literatura e escrita científica do trabalho; Marcelo de Carvalho Alves, professor-orientador do trabalho, forneceu os dados da pesquisa e participou das discussões do estudo juntamente com o primeiro autor, contribuindo com ideias durante sua elaboração; Rafael Noetzold foi responsável pela coleta dos dados de campo em 2012/2013, durante a elaboração da sua tese; Igor Carvalho de Andrade envolveu-se com o projeto a partir de atividade vivencial no departamento de Engenharia Agrícola, auxiliou o primeiro autor com a coleta dos dados orbitais e elaboração de figuras para o trabalho; Adélia Aziz Alexandre Pozza realizou uma revisão final do trabalho e sugeriu algumas ideias durante a elaboração da pesquisa em reuniões com o primeiro autor.

**Agradecimentos:** Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras (UFLA) pelo espaço e estrutura para a pesquisa, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento.

**Fontes de Financiamento:** Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

**Conflito de Interesses:** Os autores declaram não haver conflito de interesses.