

**CORRELAÇÕES DA PRODUTIVIDADE DO ALGODOEIRO COM ÍNDICES DE
VEGETAÇÃO OBTIDOS POR SÉRIES TEMPORAIS DE IMAGENS DE SATÉLITE**

Flavio S. Silva^{1,2}, Carlos M.P. Vaz^{2,*}, Eduardo Speranza³, Rafael Galbieri⁴, Júlio C.D.M. Esquerdo³, João M. Villela^{2,5}, Sílvia Crestana²

¹ Centro Universitário Central Paulista-UNICEP, R. Miguel Petroni, 5111, 13563-470, São Carlos, SP

² Embrapa Instrumentação, R. Quinze de Novembro, 1452, 13561-354, São Carlos, SP

³ Embrapa Informática, Av. Dr. André Tosello, 209, Cidade Universitária, 13083-886, Campinas, SP

⁴ Instituto Matogrossense do Algodão-IMAmt, R. Eng. Edgard Prado Arze, 1777, 78049-015, Cuiabá, MT

⁵ Universidade de São Paulo-USP, Escola de Engenharia de São Carlos-EESC, Av. Trab. São Carlense, 400, 13566-590, São Carlos, SP

* Autor correspondente, e-mail: carlos.vaz@embrapa.br

Resumo: Neste estudo utilizam-se séries temporais de NDVI obtidas das imagens do satélite MODIS (resolução espacial de 250 m) utilizando o aplicativo SATVeg desenvolvido pela Embrapa, em 138 talhões de produção comercial de algodão no estado de Mato Grosso, para estimar a produtividade do algodoeiro. Os resultados mostraram uma correlação não-linear positiva do NDVI médio em todo o ciclo (180 dias) com a produtividade e uma correlação negativa entre os coeficientes de variação dos pixels das imagens nos talhões com a produtividade, obtendo-se coeficientes de correlação linear (R^2) de 0,26 e 0,25, respectivamente. O erro quadrático médio de estimativa obtido pelo modelo foi alto (cerca de 1 tonelada/ha), levando a um erro de estimativa de cerca de 30%. De um modo geral, considera-se que o procedimento proposto tem um bom potencial de aplicação prática, mas demanda algumas melhorias como a utilização de um número maior de talhões e a avaliação de imagens de outros satélites com maior resolução espacial.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, NDVI, produtividade do algodoeiro, SATVeg

**CORRELATIONS OF COTTON YIELD PRODUCTIVITY WITH VEGETATION INDEXES
OBTAINED BY TEMPORAL SERIES OF SATELLITE IMAGES**

Abstract: This study employs NDVI temporal series obtained from MODIS satellite images (spatial resolution of 250 m) using the web-based program SATVeg developed by Embrapa, in 138 commercial cotton production areas in Mato Grosso state, to estimate cotton yield. Results showed a positive non-linear correlation between NDVI averaged for the whole growing season (about 180 days) and cotton yield, and a negative correlation between the NDVI coefficient of variation of each field and yield, with linear determination coefficients (R^2) of 0,26 and 0,25, respectively. The root mean square error obtained was high (about a ton/ha), producing an estimation error of about 30%. In general, it was considered that the proposed procedure has a good potential of practical application, but demands improvements as the use of larger number of fields and other satellite images with larger spatial resolution.

Keywords: remote sensing, NDVI, cotton yield, SATVeg

1. Introdução

O algodão é uma cultura de grande importância econômica para o Brasil, que é o 5º produtor mundial, atingindo na safra 2018/2019 um total de 2,7 milhões de toneladas de pluma, atrás apenas da Índia, China, EUA e Paquistão. Na última safra, exportou cerca de 1,7 milhões de ton. de algodão em pluma, conquistando a posição de 2º exportador mundial. O Centro-Oeste é a principal região produtora de algodão no país e o Mato Grosso é o principal estado produtor, com cerca de

1,8 milhões de ton. na safra 2018/2019, o que representa 66% da produção nacional (CONAB, 2019). Devido às extensas áreas utilizadas na produção do algodoeiro (1,59 milhões de hectares na safra 2018/2019), a utilização de sensoriamento remoto (SR) por imagens de satélite oferece uma excelente ferramenta para o monitoramento das áreas plantadas. Dentre os diversos índices de vegetação (IV) utilizados no SR, o NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) é um dos mais comuns, podendo ser utilizado para a identificação de pragas, de problemas nutricionais, de déficit hídrico, de estimativa da produtividade e na modelagem hidrológica (Shiratsuchi, 2014).

A produção do algodoeiro está relacionada com a quantidade de tecido fotossintético, índice de área foliar e biomassa e, dessa forma, os IV obtidos por SR podem ser utilizados para a obtenção de modelos de estimativa da produtividade (Baio et al. 2018). Nas aplicações de SR para a estimativa da produtividade são utilizadas imagens obtidas em um determinado momento do estágio vegetativo da cultura. No caso do algodoeiro Brandão et al. (2014) sugere que o melhor momento para a obtenção das imagens é em torno de 70 dias após a emergência, no início da fase reprodutiva, com o aparecimento do primeiro botão floral. No trabalho de Baio et al. (2018) as imagens de satélite utilizadas para se correlacionar a produtividade com NDVI foram obtidas entre 80 e 120 dias após o plantio (DAP). Entretanto, alguns trabalhos tem sugerido a utilização de séries temporais de IV para a correlação dos IV com a produtividade (Meng et al. 2017), minimizando assim alguns problemas como a da ocorrência de nuvens nas imagens de satélite.

Um sistema que permite a análise temporal de IV foi desenvolvido pela Embrapa, denominado SATVeg (Sistema de Análise Temporal da Vegetação). Trata-se de um software web que permite observar séries temporais dos índices vegetação NDVI e EVI (Índice de Realce da Vegetação) dos satélites MODIS, oferecendo um monitoramento para todo o território brasileiro. Este trabalho tem o objetivo de correlacionar IV obtidos em áreas de produção do algodoeiro no estado do Mato Grosso com a produtividade, utilizando séries temporais fornecidas pelo SATVeg, durante todo o ciclo da cultura (cerca de 180 dias). Para tanto, foram utilizados talhões de produção do algodoeiro no Mato Grosso, contendo informações das produtividades e as datas da semeadura, bem como outros parâmetros físicos e químicos dos solos dessas áreas (Galbieri et al. 2016).

2. Materiais e Métodos

Os dados utilizados nesse estudo foram obtidos pelo IMAmt (Galbieri et al. 2016) com 1.779 talhões de cultivo comercial de algodão no Mato Grosso, em 4 safras (2011-2012 até 2014-2015). Desses, foram selecionados 138 talhões, com grande variação na produtividade. A produtividade média desses 138 talhões foi de 3,4 toneladas/ha, com máxima de 6,1 e mínima de 0,95 ton/ha. Quanto ao sistema de plantio, em um total de 132 talhões (96%) utilizou-se o Plantio Direto (6 talhões utilizaram Plantio Convencional). Quanto ao espaçamento, em 31 talhões (22%) adotou-se o plantio adensado (linhas espaçadas de 45 cm), sendo o restante convencional (90 e 76 cm). O cultivo em safra foi realizado em 81 talhões (57 foram safrinha). As semeaduras foram realizadas nos meses de dezembro a fevereiro, sendo a maioria em dezembro.

As séries temporais de NDVI foram obtidas da plataforma SATVeg, que utiliza imagens dos satélites MODIS obtidos e disponibilizados gratuitamente pela NASA desde 2000, com tempo de revisita de 16 dias e resolução espacial de 250 m. O NDVI é um dos IV mais utilizados em SR, o qual é determinado por uma razão entre a reflexão da luz do sol em comprimentos de onda do infravermelho próximo (IVP) e do vermelho (V): $NDVI = (IVP - V) / (IVP + V)$.

Cada talhão foi identificado no SATVeg pela sua coordenada geográfica e, posteriormente, desenhado um polígono nos limites do talhão, definindo o número de blocos ou pixels existentes nas imagens para as análises de NDVI no talhão. Devido à presença de nuvens os valores de NDVI podem apresentar oscilações ao longo da safra e para minimizar esse problema o SATVeg pode aplicar uma pré-filtragem. Contudo, testes realizados mostraram que alguns períodos de entressafra foram confundidos com nuvem e assim esse procedimento automático não foi adotado. Em alguns poucos casos onde verificou-se efeito severo de nuvem no NDVI, o mesmo foi corrigido manualmente pela média dos vizinhos. Após as análises no SATVeg os dados de NDVI foram

exportados em planilhas de Excel, contendo valores de NDVI médios, desvios padrão e datas das imagens. Em função da data da semeadura de cada talhão define-se a escala de DAP (dias após o plantio) para cada valor de NDVI das 12 imagens obtidas entre 0 e 180 DAP.

Em função da variação das produtividades mínimas e máximas observadas na base de dados original, estabeleceu-se 14 classes de produtividade com cerca de 10 talhões para cada classe, totalizando 138 talhões para as análises. Os 12 valores de NDVI entre DAP 0 e 180 foram interpolados pelo software Origin 6.1 e posteriormente determinados os valores médios, desvios padrão nas seguintes faixas de DAP: 0-180 (todo o ciclo), 0-30 (mês 1), 30-60 (mês 2), 60-90 (mês 3), 90-120 (mês 4), 120-150 (mês 5) e 150-180 (mês 6). Os valores médios obtidos por faixas foram correlacionados com as produtividades para todos os talhões, visando o estabelecimento dos melhores modelos para a estimativa da produtividade do algodoeiro baseado no NDVI.

3. Resultados e Discussão

A Figura 1 mostra a tela do SATVeg (Fig. 1A) com a identificação de um dos talhões avaliados neste trabalho e duas séries temporais obtidas pelas médias de grupos de 10 talhões com as menores e maiores produtividades (Fig. 1B). Nos dois casos observam-se perfis típicos de NDVI para a cultura do algodoeiro e valores mais baixos de NDVI para a classe de menor produtividade (linha vermelha). Para o ciclo do algodoeiro, observa-se uma fase inicial com forte aumento do NDVI, até cerca de 60-80 DAP, seguido de estabilização até aproximadamente 120-130 dias e depois um decaimento gradual até o final da safra (colheita).

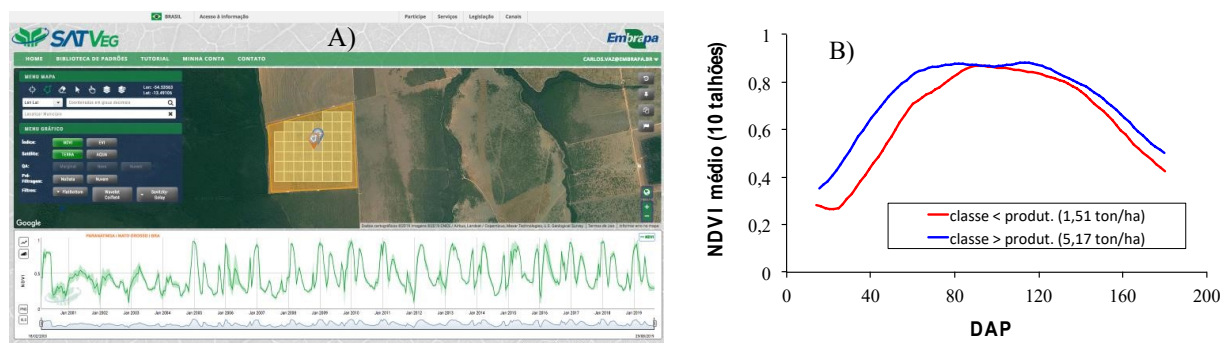


Figura 1. Tela do SATVeg (A) e séries temporais de NDVI para talhões de áreas de alta (5,2 ton/ha) e baixa (1,53 ton/ha) produtividades (B). DAP: dias após o plantio.

A Figura 2 apresenta a relação entre as médias de $NDVI_{0-180 \text{ DAP}}$ e as produtividades dos 138 talhões (Fig. 2A), bem como dos coeficientes de variação (CV) médios de NDVI obtidos dos desvios padrão dos pixels identificados nos talhões (Fig. 2B), com a as produtividades. Observa-se um aumento não-linear do $NDVI_{0-180 \text{ DAP}}$ e uma diminuição de $CV-NDVI_{0-180 \text{ DAP}}$ com o aumento da produtividade. No caso do $NDVI_{0-180 \text{ DAP}}$ isso se dá pela influência do vigor das plantas e quantidade de biomassa na produção, que é expresso no NDVI. Já o efeito inverso observado para o $CV-NDVI_{0-180 \text{ DAP}}$ se dá pelo fato de que quanto maior a variabilidade do NDVI dentro do talhão maior será a possibilidade de ocorrência de danos por doenças e pragas, compactação, déficit hídrico, e que se expressa na variabilidade espacial da produção. Efeitos similares aos aqui observados foram descritos por Baio et al. (2018) utilizando imagens do satélite do Landsat.

Os valores dos coeficientes de determinação (R^2) obtidos entre $NDVI_{0-180 \text{ DAP}}$ e $CV-NDVI_{0-180 \text{ DAP}}$ com a produtividade foram baixos, mas deve-se considerar que nesses talhões foram utilizadas diferentes cultivares, datas e sistemas de plantio, tipos de solo e condições climáticas, ou seja há diversos fatores de confundimento. Avaliando-se o erro do modelo para a estimativa da produtividade, obtêm-se um valor de cerca de 1,0 ton/ha, ou seja de cerca de 30%, considerando a média da produção dos 138 talhões que é de 3,4 ton/ha. Apesar desse erro ser muito alto, o método proposto apresenta um bom potencial e condições de ser melhorado, agregando-se mais dados, de modo a gerar um modelo mais robusto e, em uma etapa posterior, utilizando imagens de satélites com maior resolução espacial, como as do Landsat (resolução de 30 m) ou Sentinel (10 m), já que a

resolução espacial das imagens do satélite MODIS utilizadas neste trabalho é de apenas 250 m.

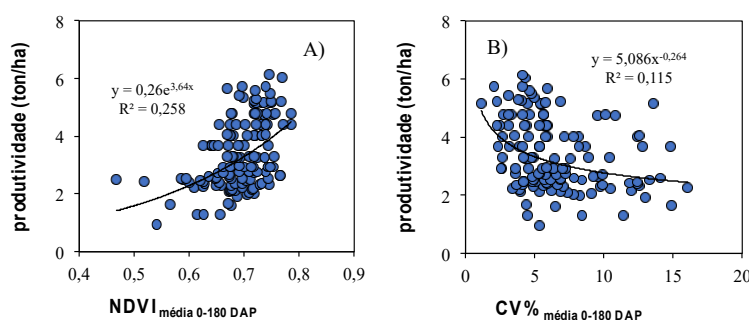


Figura 2. Correlação da produtividade com o NDVI médio ao longo de todo o ciclo da cultura (NDVI_{0-180 DAP}) (A) e com o coeficiente de variação (CV%-NDVI_{0-180 DAP}) (B).

Além da utilização dos valores de NDVI durante todo o ciclo (NDVI_{0-180 DAP}) foram obtidas as médias de NDVI por mês do ciclo de produção, que foram correlacionados também com a produtividade. Apesar dessas correlações das médias mensais de NDVI fornecerem valores de R^2 menores daqueles com o NDVI_{0-180 DAP}, as informações geradas são úteis, podendo indicar o melhor momento para se obter as imagens de satélite para o algodoeiro quando não há possibilidade de se obter as séries temporais. A Figura 3 apresenta as correlações das médias mensais de NDVI com as produtividades. Nesse caso, são apresentados os valores médios por classes de produtividades (14 classes) para facilitar a visualização e a análise, motivo pelo qual, os valores de R^2 mostrados na Figura 3 são superiores aos da Figura 2, onde todos os pontos são apresentados, ao invés das médias por classes de produtividade. Nesse caso, verifica-se a melhor correlação da produtividade com NDVI_{60-90 DAP} ($R^2=0,52$), sendo também muito próximo ao valor obtido para NDVI_{0-180 DAP} ($R^2=0,51$). Esse resultado concorda com o de Brandao et al. (2014), que verificaram também a melhor correlação da produtividade com o NDVI avaliado 70 dias após a emergência (DAE).

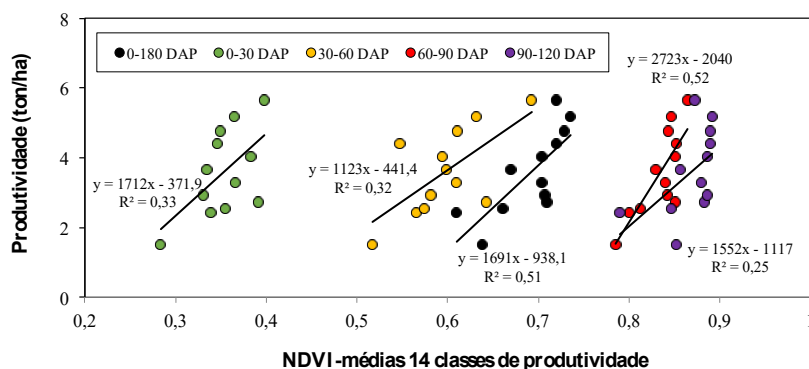


Figura 3. Variação da produtividade com as médias de NDVI das 14 classes de produtividade (~10 talhões por classe) por mês do ciclo da cultura (0-30, 30-60, 60-90, 90-120 e 0-180 DAP).

A base de dados do IMAmt utilizada neste trabalho (Galbieri et al. 2016) possui informações de parâmetros, físicos e químicos do solo, bem como de fitonematoides. Visando avançar no entendimento dos fatores que poderiam estar influenciando na produtividade e no NDVI, os mesmos foram correlacionados com todos os parâmetros disponíveis na base de dados. Em geral, os coeficientes de correlação foram muito baixos ($R^2 < 0,1$). Entretanto, verificou-se alguns casos com $R^2 \geq 0,1$, como observado na Figura 4. Para o NDVI a melhor correlação (Fig. 4A) foi obtida com a resistência do solo à penetração (RP), medida com penetrômetro, na camada 0-10cm (superficial), indicando a influência da compactação ou de estresse hídrico, uma vez que a RP aumenta com a diminuição da umidade do solo no NDVI. No caso da produtividade obteve-se as melhores correlações com os parâmetros químicos do solo como teores de cálcio, magnésio, soma de bases e zinco, sendo a correlação positiva, como esperado.

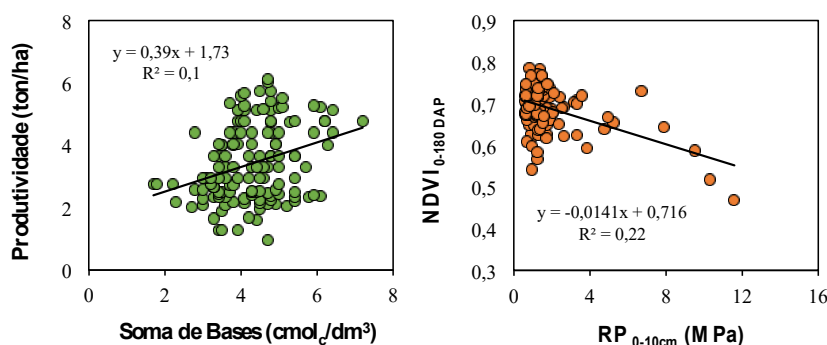


Figura 4. Relações entre a produtividade do algodoeiro e soma de bases (A) e NDVI_{0-180 DAP} com a resistência do solo à penetração (RP) na camada superficial, 0-10cm (B).

4. Conclusões

Verificou-se uma tendência (não-linear) de aumento nos valores de NDVI, com o aumento da produtividade do algodoeiro, analisando 138 talhões de produção comercial. A variabilidade espacial do NDVI nos talhões influenciou negativamente na produtividade, ou seja, quanto maior o coeficiente de variação do NDVI, menor a produtividade. Os dados apresentados mostraram um grande potencial de utilização do sensoriamento remoto com séries temporais de imagens de satélite (obtidas pelo SATVeg) para o desenvolvimento de modelos de estimativa da produtividade, baseados na análise dessas imagens, inclusive em uma etapa inicial da cultura (60-90 dias após a semeadura). O SATVeg mostrou-se uma ferramenta muito prática e com excelentes possibilidades de aplicações em estudos agrônômicos, como no caso de estimativas de produtividade.

Agradecimentos

Embrapa (projeto 41.14.09.001.00), CNPq (projeto 312282/2017-6), Instituto Matogrossense do Algodão.

Referências

- BAIO, F.H.R., D.C. NEVES, C.N.S. CAMPOS, P.E. TEODORO. Relação entre a produtividade do algodão e variabilidade de NDVI obtidos por imagens Landsat. – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Brasil
- BRANDAO, Z.N., GREGO, C.R., INAMASU, R.Y., JORGE, L.A.C. Spectral reflectance of satellite images using geostatistics methods to estimate growth and cotton yield. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology. Proc. SPIE v.9239, 923920, 2014
- CONAB, 2019. Boletim da safra de grãos. 12º Levantamento-safra 2018/19. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>> Acesso em 17/09/2019
- GALBIERI, R., C.M.P. VAZ, J.F.V. SILVA, G.L.A. AMUS, S. CRESTANA, E.S. MATOS, C.A.S. MAGALHAES. Influência dos parâmetros do solo na ocorrência de fitonematoides. In: Rafael Galbieri; Jean Louis Belot. (Org.). Nematoides fitoparasitas do algodoeiro nos cerrados brasileiros: Biologia e medidas de controle. 1ed.Cuiabá: IMAmt, v.3, p.37-90, 2016
- MENG, L., X. ZHANG, H. LIU, D. GUO, Y. YAN, L. QIN, Y. PAN. Estimation of cotton yield using the reconstructed time-series vegetation index of Landsat data. Canadian Journal of Remote Sensing, v. 43, n.3, p. 244-255, 2017
- SHIRATSUCHI, L.S., Z.N. BRANDÃO, L.E. VICENTE, D.C. VICTORIA, J.R. DUCATI, R.P. OLIVEIRA, M. F. Vilela. Sensoriamento remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão. In: BERNARDI, A.C.C, NAIME, J.M., RESENDE, A.V., BASSOI, L.H., INAMASU, R.Y. Agricultura de Precisão-Resultados de um novo olhar. Brasília-DF, 2014