

CONDIÇÕES HÍDRICAS DE LAVOURA DE SOJA USANDO SENSORIAMENTO REMOTO TERRESTRE

Lucimara Wolfarth Schirmbeck¹; Denise Cybis Fontana¹; Genei Antonio Dalmago²; Juliano Schirmbeck;
Paulo Roberto Vargas^{3,4}
Autor para correspondência: lucimaraws@gmail.com

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul; ²Embrapa Trigo; ³Universidade do Vale do Taquari; ⁴Fazenda Capão Grande

RESUMO

A busca constante pelo aumento dos rendimentos de grãos impulsiona novas tecnologia que sejam viáveis para o monitoramento das condições hídricas das culturas. Neste contexto o sensoriamento remoto vem ganhando espaço, através do uso de índices capazes de caracterizar, com alto detalhamento espacial/temporal, que possibilitam o monitoramento agrícola. O objetivo do trabalho foi verificar o desempenho do índice TVDI (*Temperature-Vegetation Dryness Index*), obtido a partir de sensores espectrais de superfície, e compará-lo a dados de déficit hídrico determinado pelo balanço hídrico meteorológico, em parcela de soja no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. O princípio de funcionamento do TVDI está ancorado na inclinação da reta de regressão linear entre o índice de vegetação e a temperatura de superfície, que representam o grau de deficiência da umidade. Para o estudo foram utilizados sensores de superfície de índice de vegetação, no caso o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e de temperatura radiométrica da superfície, conectados a dataloggers, registrando medidas a cada 15 minutos. O TVDI foi comparado frente a dados de déficit e excesso hídrico obtidos por balanço hídrico meteorológico. No período de maior déficit o TVDI apresentou os maiores valores, indicando a restrição hídrica, coerente com o armazenamento de água no solo. As temperaturas de superfície também foram altas neste período. O TVDI estimado a partir de sensores de superfície mostrou sensibilidade em representar a disponibilidade hídrica e permitiu acompanhar o desenvolvimento da cultura durante a safra.

PALAVRAS-CHAVE: TVDI; NDVI; Temperatura de superfície

WATER CONDITIONS OF SOYBEAN CROP USING GROUND REMOTE SENSING

ABSTRACT

The constant search for increased incomes drives new techniques that are feasible in monitoring the water needs of crops. In this context, remote sensing has been gaining space, through the use of indexes capable of characterizing with high spatial / temporal detail, which allow the agricultural monitoring. The aim of this work was to verify the performance of the TVDI index, obtained using surface spectral sensors, against water deficit data, determined by the meteorological water balance, in a soybean plot in the northwest of the State of Rio Grande do Sul. of the surface, with the use of the TVDI (*Temperature-Vegetation Dryness Index*) becomes attractive since this index allows to estimate the humidity of the surface with use of the surface temperature and a vegetation index. The working principle of TVDI is anchored in the slope of the linear regression line between vegetation index and surface temperature, which represent the degree of moisture deficiency. For the study were used vegetation index surface sensors, in the case of NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) and radiometric temperature. TVDI was compared to data on water deficit and excess obtained by meteorological water balance. In the period of greatest deficit the TVDI presented the highest values, indicating the water restriction, consistent with the storage of water in the soil.

Temperatures were also high in this period. The TVDI estimated from surface sensors showed sensitivity in representing the water availability and allowed to follow the development of the crop.

KEY-WORDS: TVDI; NDVI; Surface temperature

INTRODUÇÃO

No estado do Rio Grande do Sul (RS) a agricultura está presente em todas as regiões, destacando o estado no cenário brasileiro como um grande produtor de grãos. Conforme levantamento da CONAB (2018), a soja é uma das culturas que ocupa maior área e produção, sendo que o RS produziu mais de 16,968 milhões de toneladas no ano de 2018. O RS é o terceiro maior produtor brasileiro de soja, com área plantada de 5,692 milhões de hectares. Já no cenário estadual a soja está se expandindo em áreas antes ocupadas pelo milho e em conjunto com o arroz, o milho e o trigo constituem as principais culturas agrícolas (Feix et al., 2017).

Para as culturas de primavera verão, a água se constitui como o principal fator limitante para a produção de grãos no RS (Matzenauer et al., 2002, Sentelhas et al., 2015, Zanon et al., 2016). Devido a importância econômica da produção agrícola, aliada a busca constante pelo aumento da eficiência da produção, impulsionam e justificam a busca por novas tecnologias. Estas devem ser capazes de viabilizar o monitoramento das condições hídricas das principais culturas no RS, em uma larga escala geográfica e com alto detalhamento, tanto espacial como temporal. O uso do sensoriamento remoto já é realidade neste contexto e vem ganhando cada vez mais espaço, especialmente através de índices derivados das imagens orbitais (Huete et al., 2002, Ponzoni e Shimabukuro, 2009, Sandholt et al., 2002). Estes índices devem ser, portanto, capazes de caracterizar as variações ocorridas entre lavouras dentro das regiões produtoras e também de forma contínua ao longo do crescimento e desenvolvimento das plantas. Isto é possível a partir da detecção da energia proveniente da superfície pelos sensores remotos, em distintas faixas do espectro eletromagnético, e do conhecimento de como as plantas interagem com a radiação solar.

Dentre diversos índices disponíveis, pode-se estimar as condições hídricas da superfície, com uso do TVDI (*Temperature-Vegetation Dryness Index*), proposto por Sandholt et al. 2002. Um dos fatores que tornam este índice atrativo é o fato de que está baseado apenas no uso de dados aportados por imagens, que são, um índice de vegetação e a temperatura de superfície (T_s).

O princípio de funcionamento do TVDI está ancorado na dispersão de formato, geralmente triangular, que ocorre entre o índice de vegetação e a temperatura de superfície, também conhecido na literatura como triângulo evaporativo. A partir desta dispersão pode-se extrair os limites considerados seco e úmido, dentre os quais estima-se o índice TVDI. A inclinação da reta de regressão linear entre o índice de vegetação e a temperatura de superfície representa o grau de deficiência da umidade, dada a relação negativa entre estes dois parâmetros, conforme diversos estudos realizados (Venturini et al., 2004, Wang et al., 2007, Holzman et al., 2014).

Apesar da difusão do seu uso, é ainda necessário testar e entender, de forma mais aprofundada, a aplicação do TVDI para condições de climas subtropicais úmidos, visto que grande parte dos trabalhos realizados são em condições de clima mais seco. Também, trabalhos realizados a campo permitem obter informações detalhadas da superfície, de forma controlada e com maior grau de precisão em diversos momentos do desenvolvimento dos cultivos. Aliado a isto, ao se utilizar sensores na superfície, que possuem tecnologia similar a utilizada nos sensores a bordo dos satélites, a tendência é minimizar os erros das estimativas, possibilitando uma compreensão mais verdadeira das incertezas inerentes ao índice proposto.

OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo do trabalho foi verificar o desempenho do índice TVDI, obtido a partir de sensores espectrais de superfície, e compará-lo a dados de déficit hídrico determinado pelo balanço hídrico meteorológico, em parcela de soja no noroeste do estado do Rio Grande do Sul.

MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo está localizada na região noroeste do Estado do RS, no município de Carazinho (Figura 1), em região caracterizada pela intensa produção de grãos no RS. O clima, segundo Alvares et al. (2013), que tomou como base a classificação de Köppen, é subtropical úmido, com verões quentes e chuvas com distribuição regular ao longo do ano.

A lavoura avaliada ocupou uma área de 27,4 hectares na Granja Capão Grande, sendo o experimento desenvolvido em parceria com a equipe de pesquisa em agrometeorologia da Faculdade de Agronomia da UFRGS e da Embrapa Trigo de Passo Fundo. A lavoura foi conduzida sem irrigação, sendo, portanto, a precipitação pluvial a única fonte de água para as plantas.

A lavoura foi semeada em 13/11/2017 e a emergência ocorreu em 21/11/2017, com a colheita realizada em 03/04/2018. Foi utilizada a cultivar DM 5958 RSF IPRO, semeada no espaçamento de 45 cm entre linhas e densidade de 24 plantas m^{-2} . A adubação de base seguiu a análise de solo e correspondeu a 300 $kg\ ha^{-1}$ de NPK, na fórmula 4-28-08 na semeadura e uma aplicação 160 $kg\ ha^{-1}$ de cloreto de potássio a lanço no dia anterior à semeadura. O controle de plantas daninhas, de pragas e de doenças foi realizado quando necessário, utilizando produtos indicados para a cultura (referência da reunião da soja) e foi baseado em monitoramento constante realizado no campo. Semanalmente, durante o ciclo da cultura foi registrado o estágio fenológico das plantas (Fehr & Caviness, 1977) e ao final do ciclo do determinado o rendimento de grãos, em quatro repetições de 9 m^2 .

Durante o período experimental, a precipitação pluvial ocorrida (Tabela 1) apresentou valores superiores à Normal Climatológica (1976-2005, Atlas Climático, 2011) em janeiro, fevereiro e março, meses considerados críticos quanto à condição hídrica para a cultura da soja cultivada na região. De novembro a maio a precipitação pluvial ocorrida foi de 770 mm, e no período de maior desenvolvimento vegetativo (em janeiro) ocorreu 239 mm (Tabela 1). O rendimento de grãos atingido foi de 4.629 $kg\ ha^{-1}$.

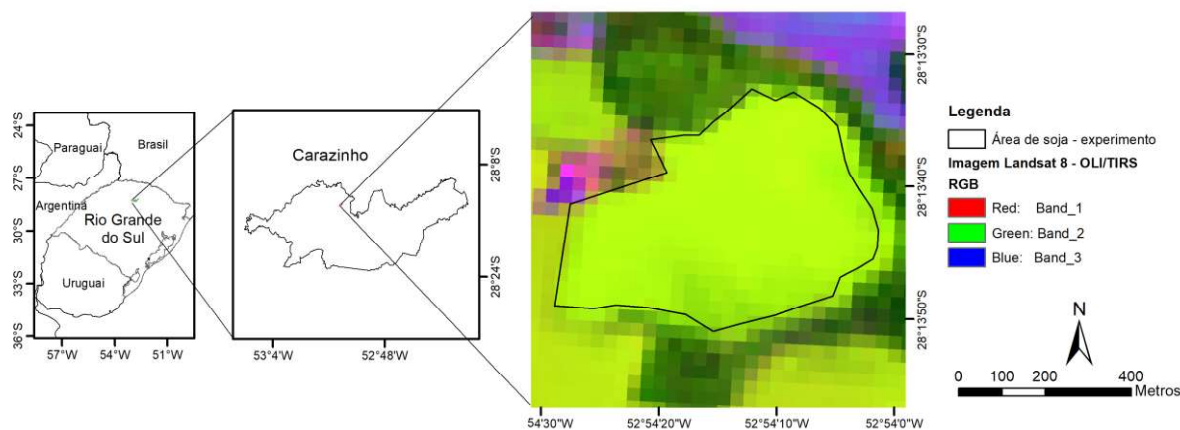


Figura 1

Figura 1: Localização da área de estudo no estado do Rio Grande do Sul, no município de Carazinho. Imagem Landsat-8 OLI de 7 fevereiro de 2018. Órbita/Ponto: 222/80. Composição RGB 6,5,4.

Tabela 1. Precipitação pluvial (mm) ocorrida na área de estudo e a Normal Climatológica, no período da safra em valores mensais.

Período	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril
Safra 2017-2018	102	70,1	238,5	154,4	201,4	3,3
Normal Climatológica	155,2	166,2	158,7	146,5	135,3	133,5

Dentre os vários sensores instalados na lavoura, no presente estudo foram utilizados os sensores de índice de vegetação SRS - Decagon (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*) e de temperatura radiométrica da superfície (T_s) SI 421- Apogee. Ambos sensores são de monitoramento contínuo com registros a cada 15 minutos (Figura 2), medindo a radiação eletromagnética incidente e refletida pela superfície nos espectros do vermelho e infravermelho próximo e também a radiação emitida pela superfície no espectro do infravermelho termal, respectivamente. Para registro dos dados foram utilizados os dataloggers Campbell modelo CR 1000. Estes sensores (NDVI e T_s) foram instalados em par, com ângulo de 90° apontando para a mesma área, a uma altura de 1 m acima do topo da cultura.

Com os dados de NDVI e T_s foi estimado o TVDI aplicando a equação proposta por Sandholt et al. (2002):

$$TVDI = (T_s - T_{Smin}) / (a + b * IV - T_{Smin}) \quad (1)$$

sendo: T_s a temperatura radiativa do pixel (K); T_{Smin} a temperatura mínima de superfície (K) correspondente ao limite úmido na dispersão do triângulo evaporativo; IV o índice de vegetação; “a” e “b” os coeficientes linear e angular da reta que representam o limite seco, obtidos a partir do gráfico de dispersão entre o IV e a T_s e foram utilizados para normalização do modelo.



Figura 2

Figura 2: Sensores utilizados nas medições durante o experimento para a cultura da soja na safra de 2017-2018 em Carazinho, RS. Da direita para esquerda: sensor de NDVI hemisférico, sensor de NDVI direcional SRS - Decagon e sensor de temperatura radiométrica (T_s) SI 421- Apogee.

O TVDI foi parametrizado a partir do estabelecimento de dois limites (Figura 3). Um deles, o limite úmido, é onde se concentram as temperaturas mínimas médias da superfície do período estudado para diferentes coberturas no solo (exposto, com cobertura parcial ou cobertura total). O outro, o limite seco, é dado pela regressão linear entre NDVI e T_s , apresentando os valores que concentram as maiores temperaturas da superfície nas distintas coberturas.

Este padrão de forma geralmente triangular de dispersão depende da biomassa existente e do teor de umidade do solo (Price, 1990; Sandholt et al., 2002; Garcia et al., 2014). No limite úmido se concentram as T_s mínimas, o TVDI é zero e não há déficit; já no limite seco o TVDI é igual a 1 e ocorre déficit de umidade na superfície.

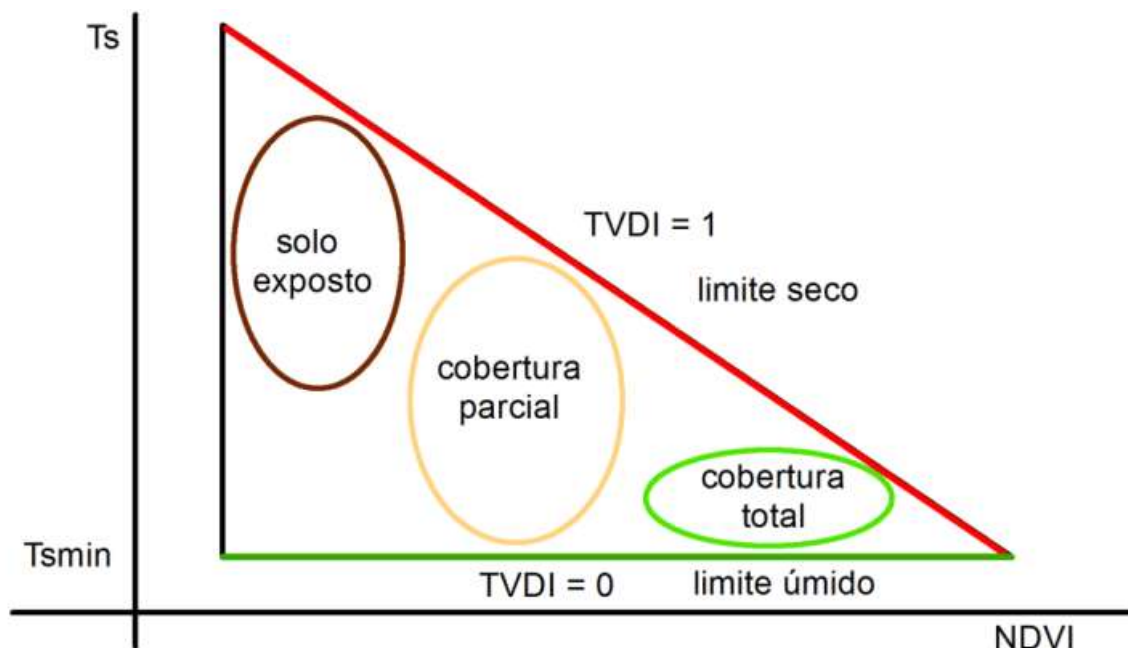


Figura 3

Figura 3: Dispersão entre o índice de vegetação (NDVI) e a temperatura de superfície, configurando o triângulo evaporativo. Reta em vermelho onde o TVDI é 1 e indica deficiência hídrica, reta em azul é onde se localiza a temperatura de superfície mínima média do período analisado, o TVDI é zero e não há deficiência hídrica. Dentro do triângulo onde se localizam os diferentes tipos de cobertura no solo.

No processo de estimativa das condições hídricas a partir do índice TVDI é necessário que na área em estudo ocorram condições hídricas extremas, em termos de umidade do solo, de forma a propiciar uma correta determinação dos limites secos e úmidos (Roerink et al., 2000; Kustas et al., 2004). No presente trabalho, em que o índice TVDI foi obtido a partir dos dados medidos com os sensores radiométricos em uma lavoura de soja, a parametrização do modelo foi feita utilizando imagens Landsat-8 que abrangem áreas com diversos tipos de uso e cobertura vizinhas à mesma. Foi utilizada a técnica de parametrização por múltiplas imagens, de acordo com Schirmbeck et al. (2018a).

Também foram utilizados os dados de radiação solar global, precipitação pluvial, vento, temperatura e umidade relativa do ar medidos sobre a lavoura. A partir destes dados foi estimada a evapotranspiração de referência pelo Método de Penman Monteith (FAO) (Allen et al., 2006) e após calculado o balanço hídrico meteorológico para obtenção dos dados de déficit e excesso hídrico. O balanço hídrico foi calculado usando a metodologia de Thornthwaite-Matter (1955), em escala diária (Pereira, 2005), considerando o K_c (entre 0,4 e 1,15) (Allen et al., 2006) e a CAD variável durante o ciclo em função do crescimento das plantas e as raízes ao longo do período (Dourado Neto et al., 1999). A soma térmica foi calculada conforme Rosa et al. (2009), com temperatura base de 10°C (Schneider et al., 1987).

Para a análise dos dados do TVDI foram escolhidos 25 dias ensolarados onde não há interferência de nuvens ou sombras na hora da passagem do satélite Landsat. Como critério de seleção se usou dados medidos de radiação solar global.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período da safra, verificou-se variações no armazenamento de água no solo (Figura 4) em função dos déficits e excessos hídricos ocorridos. No período inicial, em que a cultura se encontrava nos estádios

vegetativos (até início de janeiro), observou-se maior ocorrência de déficits diários com valores de até 4 mm, o que acarretou em diminuições no armazenamento de água no solo em praticamente todo este período. A ocorrência de déficit no período vegetativo não necessariamente implica em redução no rendimento de grãos de soja. Durante o crescimento das plantas, danos causados por qualquer fenômeno adverso, inclusive déficit hídrico, poderão ser revertidos parcial ou totalmente se as condições do ambiente forem favoráveis no restante do ciclo (Bergamaschi e Bergonci, 2017), que foi o que ocorreu na safra 2017-2018.

Posteriormente, a condição hídrica se alterou e os déficits diminuíram em valores e frequência e se observou diversos períodos de excesso hídrico de magnitudes superiores aos déficits, justamente no período reprodutivo, o de maior consumo de água das plantas (Matzenauer et al., 2002, Mundstock e Thomas, 2005) e que definem condições para obtenção de maiores rendimentos de grãos.

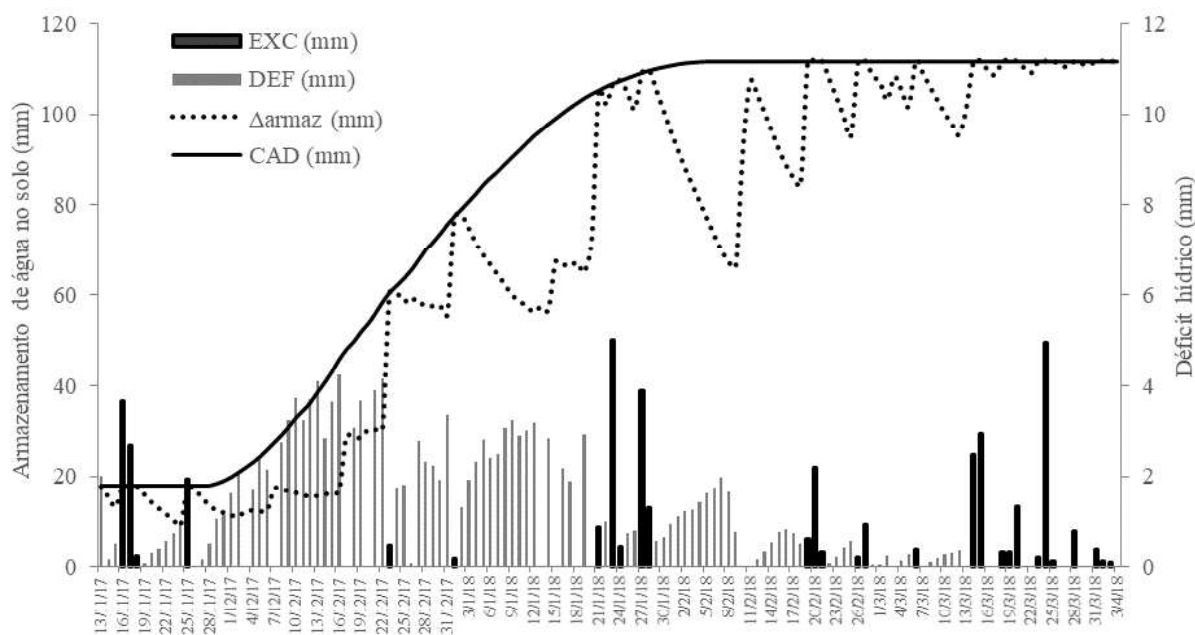


Figura 4

Figura 4: Componentes do balanço hídrico meteorológico durante o período experimental. EXC (excesso), DEF (déficit), CAD (Capacidade de água disponível no solo) e o Δ armaz (armazenamento de água no solo) para cultura da soja na safra de 2017-2018 em Carazinho, RS.

A variação do índice de vegetação NDVI (Figura 5), ao longo do período experimental, caracterizou o crescimento das plantas de soja, visto que este índice é um dos estimadores remotos de biomassa verde que mais frequentemente tem sido utilizado (Ponzoni e Shimabukuro, 2009).

Observa-se no perfil de NDVI o padrão típico de lavouras anuais, com baixos valores de NDVI no início na implantação da cultura, quando há presença de solo, crescimento do índice com o acúmulo de biomassa verde até atingir um valor máximo, próximo a 0,9, no florescimento, que em geral ocorre no mês de fevereiro (Fontana et al. 2015), quando a soja atinge o máximo índice de área foliar, e após se manteve constante.

Esta estabilidade nos valores do NDVI mesmo com os incrementos de biomassa, denomina-se de saturação do índice e ocorreu em valores de NDVI próximo a 0,9 quando a vegetação atingiu o pleno desenvolvimento vegetativo nos estádios de R1 a R5.

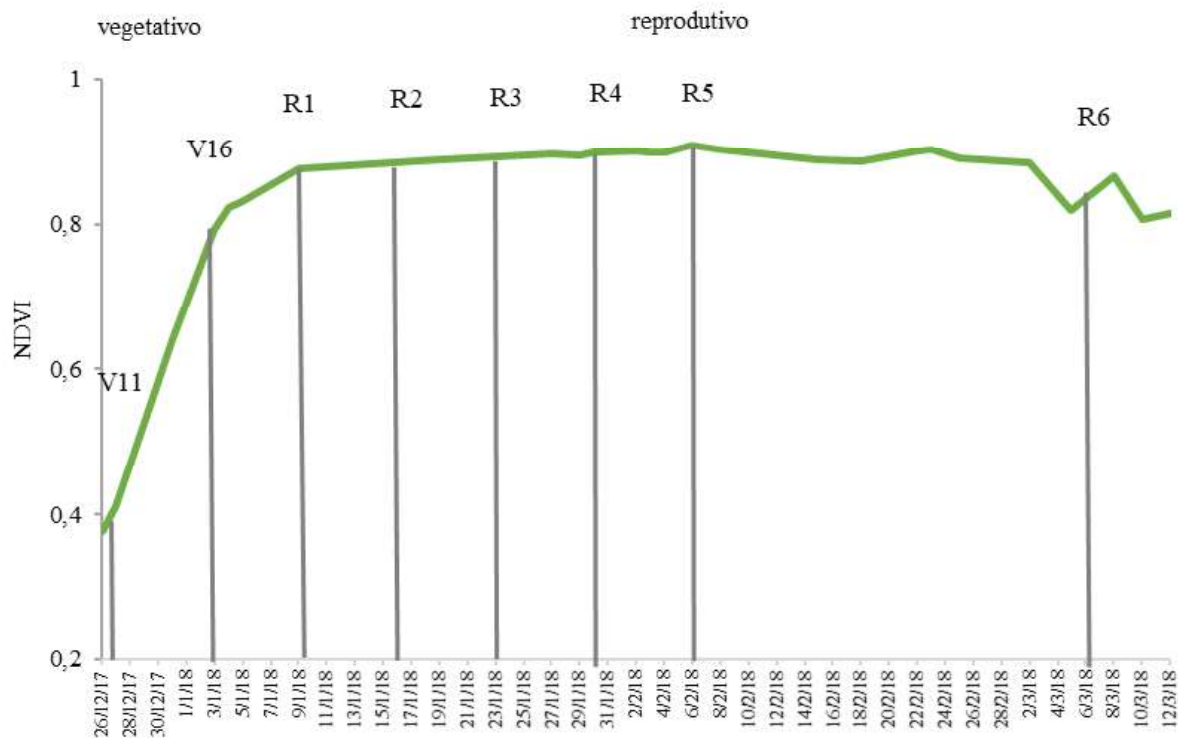


Figura 5

Figura 5: Perfil temporal de 26 de dezembro de 2017 a 12 de março de 2018 do índice de vegetação NDVI para cultura da soja na safra de 2017-2018 em Carazinho, RS.

A variabilidade dos dados da temperatura de superfície, que é apresentado na Figura 6, mostrou-se coerente com o esperado. No início da safra as maiores temperaturas na superfície do solo foram observadas, o que pode ser atribuído a duas causas principais. Primeiro, a maior disponibilidade de radiação solar global (próximo ao solstício de verão) e segundo a menor disponibilidade hídrica, o que faz com que uma maior porção do saldo de radiação seja utilizada para o aquecimento do ar e do solo (Schirmbeck et al. 2018b). A baixa cobertura do solo pela vegetação neste período inicial, propicia uma intensificação do aquecimento da superfície. Com o crescimento da vegetação nos períodos que seguem, esta passa a controlar, em parte, a temperatura da superfície através do processo de evapotranspiração, que se intensifica a partir do momento em que se verifica uma maior disponibilidade de água no solo (Goward et al., 2002, Liang et al., 2014), visto a associação que existe entre temperatura de superfície e a disponibilidade hídrica.

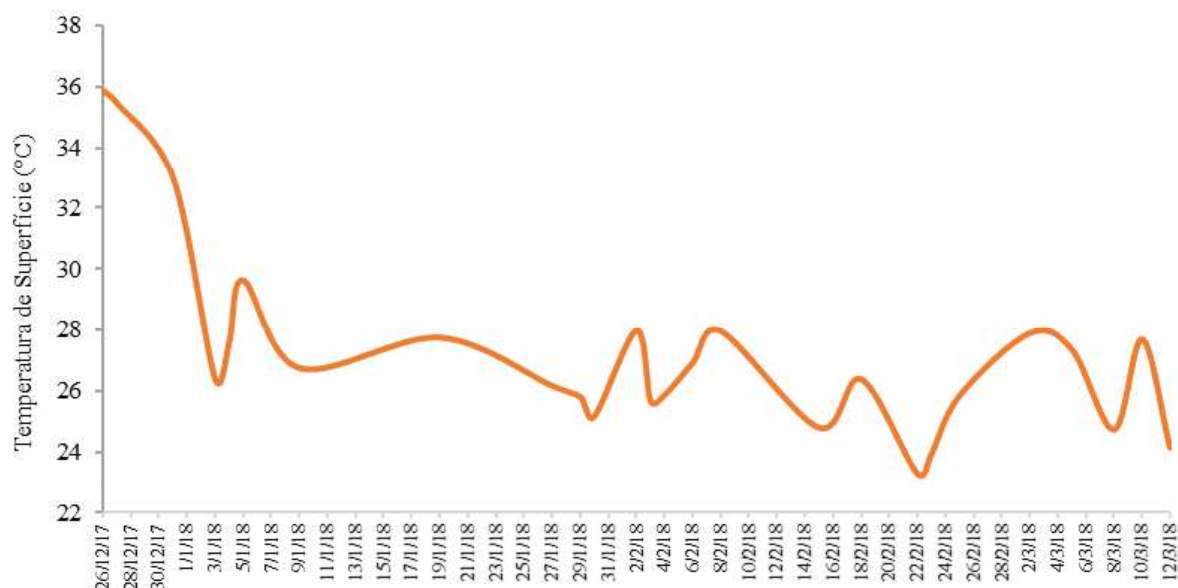


Figura 6

Figura 6: Perfil temporal de 26 de dezembro de 2017 a 12 de março de 2018 da temperatura de superfície para cultura da soja na safra de 2017-2018 em Carazinho, RS.

A relação entre o déficit hídrico ocorrido e o índice TVDI ao longo da safra, pode ser avaliada na Figura 7. Observa-se que no início da safra, em dezembro (até próximo dos 40 dias após a semeadura), foi quando ocorreram os maiores déficits. Neste período também o índice TVDI apresentou os valores mais altos, indicando a restrição hídrica. Mais próximo ao final do ciclo foi quando ocorreram os menores valores de déficit hídrico, coincidiu com a ocorrência dos mais baixos valores de TVDI. Os dados evidenciaram, portanto, uma relação que tende a ser diretamente proporcional, em que aumentos e diminuições no déficit hídrico, resultaram em aumentos e diminuições proporcionais no TVDI. Esta foi, entretanto, apenas uma tendência geral, visto que neste período final também foram observados valores altos de TVDI, principalmente nos dias após a semeadura, 109, 112, e 117 se observou menor nebulosidade e maior temperatura de superfície, em relação aos demais dias do período, além de que a vegetação estava entrando em maturação fisiológica.

Holzman et al. (2014) constataram que em áreas com clima úmido, a variabilidade nos parâmetros do TVDI é mais evidente em anos onde o regime de precipitação pluvial apresenta-se abaixo do normal. Este não foi o caso da safra 2017-2018 analisada.

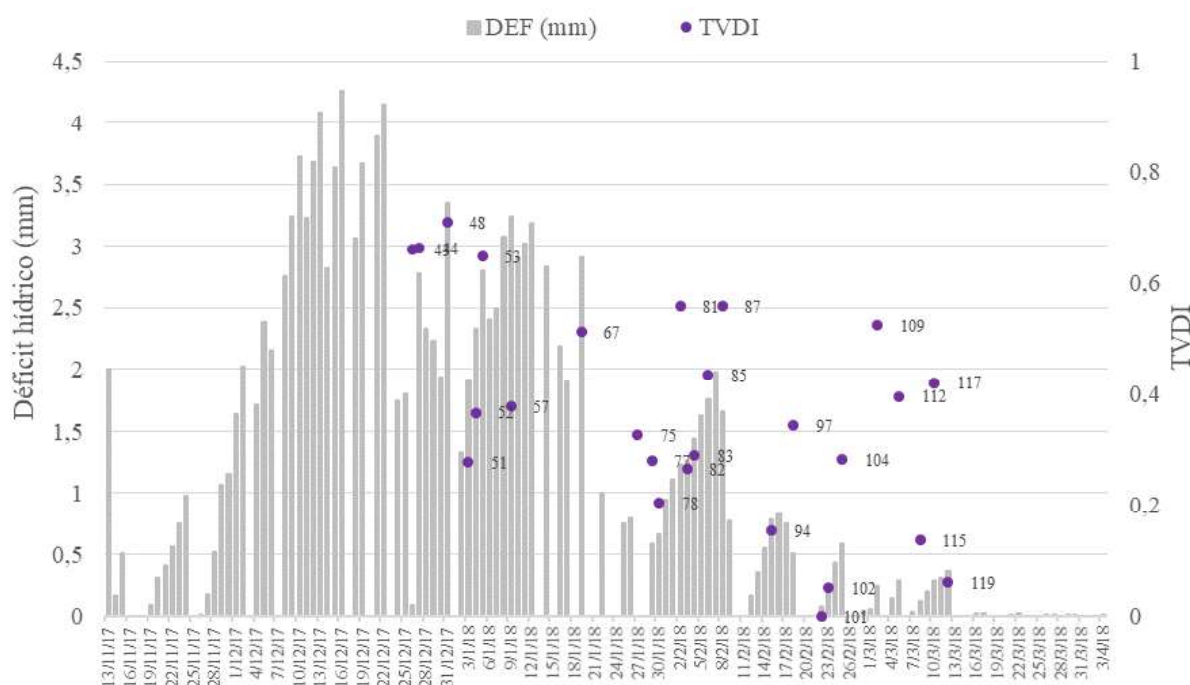


Figura 7

Figura 7: Distribuição do déficit hídrico obtido pelo cálculo do balanço hídrico e do índice TVDI apresentado em dias após a semeadura para cultura da soja na safra de 2017-2018 em Carazinho, RS.

CONCLUSÃO / CONCLUSION

O TVDI estimado a partir de sensores de superfície mostrou sensibilidade em representar a disponibilidade hídrica e permitiu acompanhar o desenvolvimento da safra.

No período de maior déficit o TVDI apresentou os maiores valores, indicando a restrição hídrica, coerente com o armazenamento de água no solo estimado pelo balanço hídrico. As temperaturas medidas em superfície também foram altas neste período.

APOIO / ACKNOWLEDGMENT

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e pela Embrapa Trigo, por meio do projeto SEG. nº: 02.15.07.003.00.00. A equipe agradece também aos funcionários da Embrapa Trigo, Elisson S. S. Pauletti e Cristian M. Plentz, que auxiliaram na condução do experimento e coletas dos dados e a Granja Campão Alto pela parceria no trabalho.

REFERÊNCIAS / REFERENCES

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M. **Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Roma: FAO. 2006, 323p. (FAO: Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 22:711-728. 2013.

BERGAMASCHI, H., BERGONCI, J. I. **As Plantas e o Clima - Princípios e Aplicações**. Guaíba: Agrolivros, 2017. 352p.

Companhia Nacional de Abastecimento CONAB. **Acompanhamento safra brasileira de grãos**, v. 5 - Safra 2017/18, n 8 - Oitavo levantamento, maio 2018.

DOURADO NETO, D.; GARCÍA, A. G.; FANCELLI, A. L.; FRIZZONE, J. A.; REICHARDT, K. Balance hídrico cíclico y secuencial: estimación de almacenamiento de agua em el suelo. **Scientia Agrícola**, v. 56, n. 3, p. 537-546, 1999.

FEIX, R. D., LEUSIN JÚNIOR, S., AGRANONIK, C. **Painel do agronegócio no Rio Grande do Sul - 2017**. Porto Alegre: Fundação de Economia e Estatística - FEE, 2017.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. 15p. (Special Report, 80).

FONTANA, D. C.; PINTO, D. G.; JUNGES, A. H., BREMM, C.. Inferências sobre o calendário agrícola a partir de perfis temporais de NDVI/MODIS. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 3, p. 350-358, 2015.

GARCIA, M., FERNÁNDEZ N., VILLAGARCÍA, L., DOMINGO, F., PUIGDEFÁBREGAS, J., SANDHOLT, I. Accuracy of the Temperature-Vegetation Dryness Index using MODIS under water-limited vs. energy-limited evapotranspiration conditions. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 149, p. 100-117, 2014.

GOWARD, S. N., XUE, Y., CZAJKOWSKI, K. P., Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements. An exploration with the simplified simple biosphere model. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 79, n. 3-3, p. 225-24, 2002.

HOLZMAN, M.E.; RIVAS, R.E.; PICCOLO, M.C. Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 28, p. 181-192. 2014.

HUETE, A., DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E. P., GAO, X., FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p.195-213. 2002.

- KUSTAS, W.P., LI, F., JACKSON, T.J., PRUEGER, J.H., MACPHERSON, J.L., WOLDE, M., Effects of remote sensing pixel resolution on model edenergy flux variability of croplands in Iowa. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 92, n. 4, p. 535-547, 2004.
- LIANG, L., ZHAO, S., QIN, Z., HE, K., CHEN, C., LUO, Y., ZHOU, X., Drought Change Trend Using MODIS TVDI and Its Relationship with Climate Factors in China from 2001 to 2010. **Journal of Integrative Agriculture**, Beijing, v.13, n. 7, p. 1501-1508, 2014.
- MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; MALUF, J.R.T.; BARNI, N.A.; BUENO, A.C.; DIDONÉ, I.A.; ANJOS, C.S.; MACHADO, F.A.; SAMPAIO, M.R. **Boletim FEPAGRO**, Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul, n. 10. 2002.
- MATZENAUER, R.; RADIN, B.; ALMEIDA, I.R. (Ed.). **Atlas Climático: Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura Pecuária e Agronegócio; Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO), 2011.
- MUNDSTOCK, C., & THOMAS, A. L. **Soja: Fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos**. Departamento de Plantas de Lavoura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: Evangraf, 2005. 31p.
- PEREIRA, A. R. Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. **Bragantia**, v. 64, n. 2, p. 311-313, 2005.
- PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 127 p.
- PRICE, J. C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 28, n. 5, p. 940-948, 1990.
- ROERINK, G. J., Su, B., & MENENTI, M. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. **Physics and Chemistry of the Earth, Part B, Hydrology, Oceans and Atmosphere**, Oxford, v. 25, n. 2, p. 147-157, 2000.
- ROSA, H. T.; WALTER, L. C.; STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Thermal time methods and sowing dates in phyllochron determination in wheat cultivars. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 11, p. 1374-1382, 2009.
- SANDHOLT, RASMUSEN, K., ANDERSEN, J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. **Remote Sensing of Enviroment**, 79, 213-224. 2002.
- SENTELHAS, P.C., BATTISTI, R., CÂMARA, G.M.S., FARIAS, J.R.B., HAMPF, A.C., NENDEL, C., The soybean yield gap in Brazil: magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science** 153, 1394-1411. 2015.
- SCHIRMBECK, L. W., FONTANA, D. C., SCHIRMBECK, J. Two approaches to calculate the TVDI in the humid subtropical climate of southern Brazil. **Scientia Agricola** v. 75, n. 2, p. 111-120. 2018a.
- SCHIRMBECK, J. FONTANA, D. C., ROBERTI, D. R. Evaluation of OSEB and SEBAL models for energy balance of a crop area in a humid subtropical climate. **Bragantia**, vol.77, n.4, pp.609-621. 2018b.
- SCHNEIDER, F. M.; BURIOL, G. A.; HELDWEIN, A. B.; MANFRON, P. A.; SACCOL, A. V.; ESTEFANEL, V. Temperatura base e soma térmica do subperíodo semeadura-emergência para algumas cultivares de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). **Revista do Centro de Ciências Rurais**, v. 11, n. 4, p.299-308, 1987.

THORNTHWAITE, C. W., MATHER, J. R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955, 104p.

VENTURINI, V., BISHT, G., & ISLAM, S.. Comparison of evaporative fractions estimated from AVHRR and MODIS sensors over South Florida. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 93, n. 1-2, p. 77-86, 2004.

WANG, X.; XIE, H.; GUAN, H. Different responses of MODIS-derived NDVI to root-zone soil moisture in semi-arid and humid regions. **Journal of Hydrology**, v. 340, p. 12–24. 2007.

ZANON, A.J.; STRECK, N.A.; GRASSINI, P. Climate and Management Factors Influence Soybean Yield Potential in a Subtropical Environment. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 4, p. 1447-1454. 2016.