

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E  
METEOROLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

LUCIMARA WOLFARTH SCHIRMBECK

**TVDI OBTIDO DE DIFERENTES SENSORES APLICADO AO MONITORAMENTO  
AGRÍCOLA DE RISCO DA CULTURA DA SOJA**

PORTO ALEGRE

2021

LUCIMARA WOLFARTH SCHIRMBECK

**TVDI OBTIDO DE DIFERENTES SENSORES APLICADO AO MONITORAMENTO  
AGRÍCOLA DE RISCO DA CULTURA DA SOJA**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto como requisito parcial para a obtenção do título de doutora em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

**Orientadora:** Denise Cybis Fontana

PORTO ALEGRE

2021

### CIP - Catalogação na Publicação

Schirmbeck, Lucimara Wolfarth  
TVDI OBTIDO DE DIFERENTES SENSORES APLICADO AO  
MONITORAMENTO AGRÍCOLA DE RISCO DA CULTURA DA SOJA /  
Lucimara Wolfarth Schirmbeck. -- 2021.  
145 f.  
Orientadora: Denise Cybis Fontana.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em  
Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de  
Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre,  
BR-RS, 2021.

1. agricultura. 2. sensoriamento remoto. 3. umidade  
do solo. 4. NDVI. 5. TS. I. Fontana, Denise Cybis,  
orient. II. Título.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucimara Wolfarth Schirmbeck

### **TVDI OBTIDO DE DIFERENTES SENSORES APLICADO AO MONITORAMENTO AGRÍCOLA DE RISCO DA CULTURA DA SOJA**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto como requisito parcial para a obtenção do título de doutora em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

Área de Concentração: Sensoriamento Remoto aplicado.

Aprovada em 31 de março de 2021.

---

Prof. Dr. Jerry Adriani Johann (UNIOESTE)

---

Prof. Dr. Elias Fernando Berra (UFPR)

---

Prof. Dra. Tatiana Mora Kuplich (UFRGS)

---

Prof. Dra. Denise Cybis Fontana – UFRGS (Orientadora)

## AGRADECIMENTOS

Terminar um ciclo e iniciar outro, nada como agradecer a todos que me ajudaram na condução deste estudo, participando direta ou indiretamente na condução do trabalho.

Em especial agradeço à minha orientadora Denise Cybis Fontana que ao longo destes anos além de uma professora incrível se tornou uma grande amiga, eu a admiro muito e sou muito grata por ter acreditado em mim, por sempre estar ao meu lado orientando e despertando pensamentos críticos.

À CAPES pela bolsa de estudos que recebi no decorrer dos meus estudos e que foi essencial para sua realização.

Ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da UFRGS, pelos cursos, ensinamentos, pela oportunidade de realização deste estudo.

Ao Genei Antonio Dalmago e a sua equipe da Embrapa Trigo Passo Fundo, pela oportunidade de trabalharmos juntos com este estudo e seu grande empenho e dedicação à pesquisa.

Aos professores do Sensoriamento Remoto em especial à Denise Cybis Fontana, ao Jorge Ducati e a Tatiana Kuplich, foram muitos os aprendizados e a dedicação de vocês.

Aos amigos que fiz na pós-graduação e as experiências que trocamos foi muito legal conviver com vocês, em especial: Ana Paula, Amanda, Carolina, Daniele, Grazielle e Laura.

Ao Seu Miguel Castilhos pelas palavras de apoio, encorajamento e sempre me auxiliando quando mais preciso.

A minha família em especial aos meus pais por todo apoio e ajuda ao longo do tempo, por fazerem o melhor que podiam por mim e às minhas irmãs, sempre presentes, eu amo muito vocês.

Ao Juliano marido e pai incrível, por estar sempre comigo em todos momentos e formarmos nossa linda família, nossa base e razão de viver.

À Deus por estar guiando e iluminando meu caminho.

## RESUMO

O principal desafio na atualidade do setor agrícola é produzir maior quantidade de alimentos para atender a demanda crescente da população do planeta, mas de forma mais sustentável ambientalmente. Parte deste desafio pode ser atendido a partir de incrementos na produtividade dos cultivos. Neste contexto, o índice TVDI (*Temperature-Vegetation Dryness Index*), que usa dados de sensores remotos orbitais, índice de vegetação e  $T_s$  (Temperatura de superfície), tem sido utilizado por diversos especialistas. Este índice, portanto, quando aplicado em escala regional pode-se tornar uma importante ferramenta para o monitoramento do déficit hídrico, principal fator de risco das áreas agrícolas no sul do Brasil. Este estudo buscou compreender a metodologia de determinação do índice de umidade da superfície, o TVDI, e analisar sua robustez em caracterizar a umidade da superfície, as vantagens e as limitações associadas à sua obtenção em diferentes períodos de tempo, assim como, em diferentes escalas espaciais, visando gerar informações que possibilitem seu uso em sistemas de monitoramento agrícola integrando de forma complementar dados de diferentes sensores. O TVDI foi obtido a partir de sensores espectrais de superfície, comparado a dados oriundos do balanço hídrico meteorológico diário, em experimento ‘*On Farm*’, também foi avaliada a sua coerência frente aos dados obtidos usando imagens orbitais. Foram utilizadas 4 imagens do sensor OLI/TIRS e 12 imagens MODIS com resoluções espacial, espectral e temporal distintas, para analisar a consistência na sua distribuição espacial na região. Foi, então, analisado como os padrões espaciais e temporais do TVDI, obtido com sensores terrestres e orbitais, podem ser usados de forma eficiente em programas de monitoramento agrícola. Os resultados mostraram que o ajuste do triângulo evaporativo para os distintos sensores apresentou coerência, sendo as principais diferenças entre eles associadas as características de resolução dos mesmos. Os dados do TVDI obtidos em escala local e a partir dos sensores orbitais apresentaram coerência e demonstraram a complementariedade de informações espaciais e temporais. O TVDI apresentou correlação significativa com diversas variáveis associadas a condição hídrica do sistema solo – água – planta (armazenamento, déficit,  $E_{Tr}$ ,  $E_{Tr}/E_{T0}$  e umidade). O uso conjugado dos diferentes sensores possibilitou a construção de uma proposta para um sistema de monitoramento agrícola auxiliando na identificação dos períodos de deficiências hídricas em relação as fases da cultura e o detalhamento da distribuição espacial a nível de parcela agrícola.

**Palavras chave:** agricultura, sensoriamento remoto, umidade do solo, NDVI,  $T_s$

## ABSTRACT

The main challenge in the agricultural sector today is to produce more food to meet the growing demand of the planet's population, but in a more environmentally sustainable way. Part of this challenge can be met from increases in crop productivity. In this context, the TVDI index (Temperature-Vegetation Dryness Index), which uses data from remote orbital sensors, vegetation index and  $T_s$  (surface temperature), has been used by several experts. This index, therefore, when applied on a regional scale can become an important tool for monitoring the main risk factor of agricultural areas in southern Brazil. This study sought to understand the methodology for determining the surface moisture index, the TVDI, and to analyze its robustness in characterizing the surface moisture, the advantages and limitations associated with obtaining it in different periods of time, as well as, in different scales spatial, aiming to generate information that allows its use in agricultural monitoring systems by integrating data from different sensors in a complementary way. The TVDI was obtained from spectral surface sensors, compared to data from the daily meteorological water balance, in an 'On Farm' experiment, its coherence was also assessed against the data obtained using orbital images. Four images from the OLI / TIRS sensor and 12 MODIS images with different spatial, spectral and temporal resolutions were used to analyze the consistency in their spatial distribution in the region. It was then analyzed how the spatial and temporal patterns of TVDI, obtained with terrestrial and orbital sensors, can be used efficiently in agricultural monitoring programs. The results showed that the adjustment of the evaporative triangle for the different sensors showed coherence, the main differences between them being associated with their resolution characteristics. TVDI data obtained on a local scale and from orbital sensors showed coherence and demonstrated the complementarity of spatial and temporal information. TVDI showed a significant correlation with several variables associated with the water condition of the soil - water - plant system (storage, deficit,  $E_{Tr}$ ,  $E_{Tr} / E_{T0}$  and humidity). The combined use of the different sensors enabled the construction of a proposal for an agricultural monitoring system, helping to identify periods of water deficiencies in relation to the crop phases and detailing the spatial distribution at the level of the agricultural plot.

**Keywords:** agriculture, remote sensing, soil moisture, NDVI, TS



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Área plantada (ha) e rendimento ( $t \cdot ha^{-1}$ ) da soja nas safras de 2000 a 2019 no Estado do Rio Grande do Sul.....	20
Figura 2. Triângulo evaporativo usado para o cálculo do índice de umidade da superfície (TVDI), obtido a partir da relação entre a Temperatura ( $T_s$ e $T_{Smin}$ ) e o índice de Vegetação por diferença normalizada (NDVI).....	29
Figura 3. Localização das áreas de estudo no Estado do Rio Grande do Sul. Imagens Landsat-8 OLI/TIRS de 07 de fevereiro de 2015 e de 08 de fevereiro de 2018.....	34
Figura 4. Fluxograma da abrangência espacial do estudo identificando os sensores utilizados para análise. ....	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Coeficientes utilizados no algoritmo <i>split-window</i> - Landsat 8-OLI/TIRS.....	41
--	----

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>ORGANIZAÇÃO DA TESE .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
3.1	Objetivos específicos .....	17
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
4.1	A produção agrícola do Rio Grande do Sul (RS) .....	19
4.2	Disponibilidade hídrica do RS.....	21
4.3	Indicadores de condição hídrica regional .....	23
4.4	Sistemas de monitoramento.....	24
4.5	Índice de umidade da superfície - TVDI .....	27
4.5.1	Obtenção do TVDI com imagens Landsat .....	30
4.5.2	Obtenção do TVDI com imagens MODIS .....	30
<b>5</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>33</b>
5.1	Área de estudo .....	33
5.2	Experimentação de campo.....	37
5.3	Imagens do sensor OLI/TIRS .....	40
5.4	Imagens do sensor MODIS .....	42
5.5	Obtenção dos limites úmido e seco do TVDI.....	43
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>50</b>
7.1	Artigo 1: TVDI Obtido de Imagens OLI/TIRS e MODIS .....	50
7.2	Artigo 2: Condições hídricas de lavoura de soja usando sensoriamento remoto terrestre.....	62
7.3	Artigo 3: Water monitoring of soybean crops using TVDI obtained from surface radiometric sensors.....	72
7.4	Artigo 4: Surface moisture index by local and orbital radiometric data .....	94

7.5	Artigo 5: MODIS e OLI/TIRS para estimar TVDI e a umidade da superfície em programas de monitoramento agrícola .....	112
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>140</b>
8.1	Introdução .....	140
8.2	Principais descobertas.....	141
8.3	Principais resultados .....	142
8.4	Trabalhos futuros com sistema de monitoramento agrícola.....	143
8.5	Conclusões.....	144
<b>9</b>	<b>FINANCIAMENTO .....</b>	<b>145</b>

## 1 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A Tese foi organizada em duas seções, sendo que na primeira parte do documento são apresentados introdução, hipótese, objetivo geral e objetivos específicos, revisão da literatura, material e métodos e referências bibliográficas. No item material e métodos, foi detalhada a metodologia de obtenção do TVDI num espaço maior do que geralmente é possível nos artigos científicos e buscado explicitar a relação entre os diferentes enfoques aplicados à pesquisa nos artigos originados na tese.

Na segunda seção são abordados os resultados obtidos em forma de cinco artigos científicos: dois publicados, dois submetidos para publicação e o último a ser submetido, cujos títulos são:

Artigo 1 – TVDI Obtido de Imagens OLI/TIRS e MODIS.

Este foi um artigo com um estudo de apropriação metodológica proposto no exame de qualificação do curso de doutorado, onde foi feita uma comparação do TVDI obtido com dois sensores com diferentes resoluções espaciais, temporais e espectrais (OLI/TIRS e MODIS) em área do Bioma Pampa ocupada com diferentes tipos de cobertura do solo. Ênfase foi dada neste artigo ao impacto da parametrização do TVDI considerando diferentes períodos da safra, o que mostra associação com o tipo de uso programado para o índice. Artigo publicado: *Schirmbeck, L.W., Fontana, D.C., Schirmbeck, J., Bremm, C. TVDI Obtido de Imagens OLI/TIRS e MODIS. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 34, p. 573-583, 2019.*

Artigo 2 – Condições hídricas de lavoura de soja usando sensoriamento remoto terrestre.

O segundo artigo foi realizado após o exame de qualificação e focou na cultura da soja, o que ocorre em todos os demais artigos da tese. Neste, são apresentadas análises exploratórias dos resultados de um experimento de campo, realizado em parceria com a EMBRAPA Trigo e a Faculdade de Agronomia da UFRGS, no qual foi utilizada uma estação radiométrica instalada na superfície em área agrícola no noroeste do Rio Grande do Sul (RS), de forma a obter o TVDI na superfície utilizando a mesma tecnologia dos sensores a bordo de satélite. O artigo aborda análises iniciais dos dados, tendo sido apresentado no Congresso Brasileiro de Agrometeorologia e, posteriormente, foi selecionado para publicação na revista da Sociedade: *Schirmbeck, L.W., Fontana, D.C., Dalmago, G.A., Schirmbeck, J., Vargas, P.R., Fernandes, J.M.C. Condições hídricas de lavoura de soja usando sensoriamento remoto terrestre. Agrometeoros, v. 27, p. 173-181, 2019.*

Artigo 3 – Water monitoring of soybean crops using TVDI obtained from surface radiometric sensors.

O terceiro artigo dá continuidade à análise dos dados oriundos do experimento de campo com a soja, apresentadas no artigo 2, abrangendo um conjunto maior de variáveis usualmente utilizadas para caracterizar a umidade da superfície. Neste artigo se buscou analisar a qualidade dos dados de umidade da superfície gerados pelo TVDI, quando obtidos por meio de sensores posicionados na superfície em área de soja cultivada em ambiente agrícola com clima subtropical úmido. O artigo foi submetido para a revista Pesquisa Agropecuária Brasileira (PAB).

Artigo 4 – Surface moisture index by local and orbital radiometric data.

O quarto artigo completa as análises focadas no experimento na lavoura de soja e teve como foco o tema da mudança de escala da aquisição dos dados. Buscou-se caracterizar as diferenças entre medições da umidade com os sensores radiométricos de

superfície, obtidas do experimento de campo com soja, com um amplo conjunto de dados e com alto grau de controle, e os dados obtidos por sensoriamento remoto (SR) orbital, no caso OLI/TIRS. Neste artigo, fica enfatizada a grande vantagem do uso do TVDI obtido com imagem orbital, que é o detalhamento espacial da umidade da superfície. O artigo foi submetido para a revista de Engenharia Agrícola (EAgrí).

Artigo 5 – MODIS e OLI/TIRS para estimar TVDI e a umidade da superfície em programas de monitoramento agrícola.

O último artigo da tese, também trata do tema mudança de escala, mas retorna a origem usando dados dos sensores OLI/TIRS e MODIS, comparando-os. Neste artigo, o foco agora foi somente na cultura da soja e foi propondo o uso do TVDI como um indicador robusto da umidade da superfície a fim de fornecer informações complementares no tempo e espaço, possíveis de serem utilizadas em sistemas de monitoramento agrícola.

Ao final é apresentado um capítulo com considerações finais, tendo como referência o conjunto do estudo desenvolvido ao longo do doutorado.

## 2 INTRODUÇÃO

O principal desafio na atualidade do setor agrícola é produzir maior quantidade de alimentos para atender a demanda crescente da população do planeta, mas de forma mais sustentável ambientalmente. Parte deste desafio pode ser atendido a partir de incrementos na produtividade dos cultivos.

Estes incrementos passam necessariamente por ações de planejamento agrícola e pelo conhecimento dos fatores de risco, os quais permitem minimizar perdas. Como exemplo, pode-se mencionar a influência de sistemas meteorológicos de diferentes escalas espaciais e temporais sobre o regime da precipitação pluvial, os quais promovem variações no armazenamento hídrico do solo e no crescimento e desenvolvimento das plantas. O rendimento agrícola das culturas de primavera-verão no sul do Brasil é definido, principalmente, pela condição hídrica no solo, sendo o déficit hídrico considerado o principal fator de perdas de safras. Precipitações pluviais abaixo da média, assim como uma distribuição temporal inadequada, reduzem o crescimento e podem afetar o desenvolvimento das plantas, a produção de biomassa, e conseqüentemente a produção de grãos ou frutos.

Uma das principais culturas do agronegócio do Estado do Rio Grande do Sul, assim como nacional, é a soja, com área significativamente superior às alcançadas pelas demais culturas anuais. A expansão territorial contínua fez a sua produção crescer nas últimas safras agrícolas, sendo esta cultura a que conta com o complexo agroindustrial de maior magnitude no cenário estadual e brasileiro. A expansão, entretanto, tem ocorrido muitas vezes em regiões com riscos elevados ou não conhecidos.

O sensoriamento remoto quando aplicado na agricultura possibilita monitorar a dinâmica das culturas, além de estimar parâmetros biofísicos e disponibilizar informações úteis para a estimativa da evapotranspiração ou mesmo de indicadores do processo

fotossintético. O monitoramento da biomassa pode ser realizado com o uso de índices de vegetação, como por exemplo, o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) o qual tem sido extensamente utilizado para caracterizar a vegetação. Quando o índice de vegetação é utilizado em conjunto com a temperatura de superfície ( $T_s$ ), pode-se obter um indicador da umidade da superfície, a qual, disponibiliza informações da condição hídrica da vegetação ao longo do tempo e do espaço.

Neste contexto, o índice TVDI (*Temperature-Vegetation Dryness Index*), que usa dados de sensores remotos orbitais, índice de vegetação e  $T_s$ , tem sido utilizado por diversos especialistas para estimar a umidade da superfície. Este índice quando aplicado em escala regional pode-se tornar uma importante ferramenta para o monitoramento de áreas agrícolas. Mas o TVDI é um índice cujo valor é relativo aos extremos seco e úmido do ambiente em estudo, o que por vezes torna a interpretação do dado de umidade da superfície confusa, especialmente quando se quer comparar regiões ou épocas do ano distintas. Esta é o principal aspecto a ser melhor compreendido, de forma a permitir uma correta interpretação da informação contida no índice.

A justificativa, portanto, para elaboração deste estudo tem como base a importância econômica das atividades agrícolas para o Rio Grande do Sul (RS) e a existência de lacunas de conhecimento, relacionadas à informação espacialmente detalhada da adequação das condições hídricas das regiões produtoras do Estado, principalmente no período de primavera-verão e especialmente para a cultura da soja. É neste contexto que se esboçou a hipótese deste trabalho de que a análise dos padrões espaciais e temporais do índice de umidade da superfície (TVDI), obtido a partir de distintos sensores orbitais, pode aportar dados robustos e complementares sobre a disponibilidade hídrica, com foco no déficit hídrico, o que gera subsídios para o planejamento do setor agrícola do RS em programas de monitoramento de safras.



### 3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo foi compreender a metodologia de determinação do índice de umidade da superfície, o TVDI, e analisar sua robustez em caracterizar a umidade da superfície, as vantagens e as limitações associadas à sua obtenção em diferentes períodos de tempo, assim como, em diferentes escalas espaciais, visando gerar informações que possibilitem seu uso em sistemas de monitoramento agrícola integrando de forma complementar dados de diferentes sensores.

#### 3.1 Objetivos específicos

Analisar a variabilidade do TVDI (*Temperature-Vegetation Dryness Index*) obtido pelos sensores OLI/TIRS e MODIS com resoluções espacial, espectral e temporal distintas, assim como, analisar a consistência na sua distribuição espacial em região de produção agrícola localizada no RS.

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 diário, em experimento ‘*On Farm*’ de soja no noroeste do estado do RS.

Analisar a qualidade dos dados de umidade da superfície gerados pelo TVDI, quando obtidos por meio de sensores posicionados na superfície em área de soja cultivada em ambiente agrícola com clima subtropical úmido.

Avaliar a coerência dos valores de TVDI, obtidos de sensores instalados na superfície, que utilizam tecnologia semelhante à dos satélites, comparados aos obtidos por imagens orbitais em uma área agrícola do sul do Brasil sob condições de clima subtropical úmido.

Analisar como os padrões espaciais e temporais do TVDI, obtido em áreas de produção de soja no sul do Brasil, a partir dos sensores terrestres e orbitais (OLI/TIRS e MODIS), pode ser usado de forma eficiente em sistemas operacionais de monitoramento agrícola.

## **4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

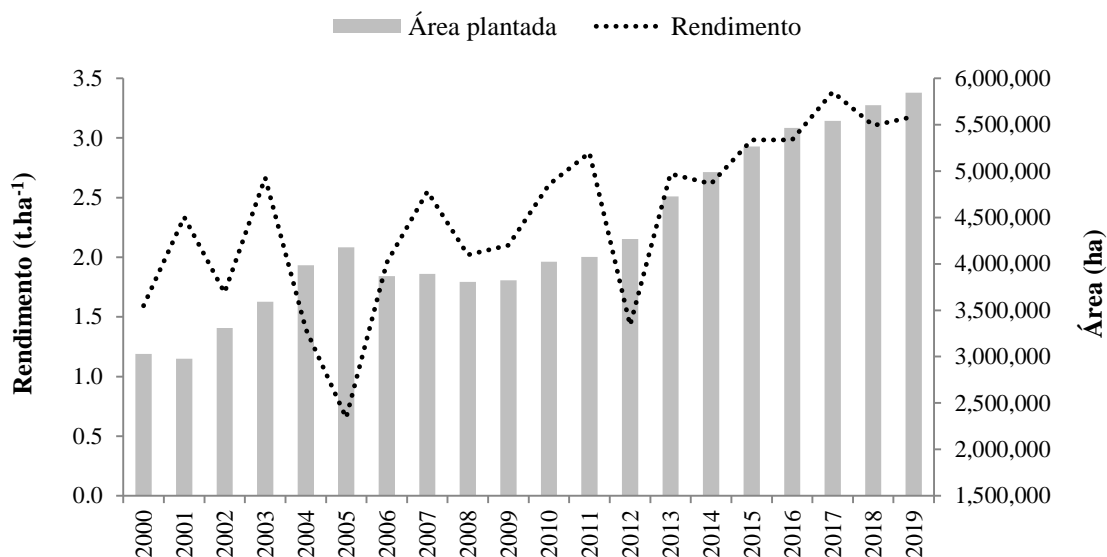
### **4.1 A produção agrícola do Rio Grande do Sul (RS)**

De acordo com levantamento estatístico, as áreas agrícolas no RS têm mostrado expansão em todas as regiões do Estado. As lavouras temporárias e permanentes ocupam aproximadamente 9 milhões de hectares, sendo que as lavouras temporárias são representadas principalmente pela produção de cereais e oleaginosas, com destaque para a soja, o arroz, o milho e o trigo (Feix e Leusin Júnior, 2019).

Dentre os principais cultivos de grãos do RS, o da soja foi o que mais avançou nos últimos anos, similar ao que ocorreu em todo o cenário brasileiro, tendo sido incentivado tanto pela demanda externa quanto pela alta nos preços. A expansão, cujo avanço se dá em regiões tradicionais, assim como em regiões não tradicionais, está ocorrendo em direção ao sudoeste e ao sudeste do Estado, em áreas originalmente ocupadas por pastagens, pecuária, ou outras lavouras temporárias (Santos et al., 2014, Feix e Leusin Júnior, 2019, CONAB 2018). A expansão nas últimas 19 safras no RS tem coincidido com o incremento das áreas de cultivo, mas também com o incremento do rendimento de grãos (Figura 1). Observa-se ainda que é grande a variabilidade nos rendimentos entre um ano e outro. A safra de 2004-2005 foi caracterizada por grandes perdas associadas a problemas de deficiência hídrica no Estado. Em 2011-2012 ocorreram perdas na produção também causadas por restrições hídricas. Já nas últimas safras (2013-2014, 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017 e 2017-2018) os rendimentos foram bastante altos e coincidiram com período em que o preço da soja no mercado nacional também teve um acréscimo nos valores. Em 2015-2016, a área cultivada com soja cresceu 3,9 %, e estima-se que a maior parte da expansão se deu sobre as áreas semeadas com milho, áreas de campo nativo e pastagens, só não foi maior o incremento devido redução da soja cultivada em áreas de

várzea, em função das chuvas intensas ocorridas no início da temporada que provocam alagamentos (CONAB, 2016).

Figura 1. Área plantada (ha) e rendimento ( $t\cdot ha^{-1}$ ) da soja nas safras de 2000 a 2019 no Estado do Rio Grande do Sul.



Fonte: (IBGE – PAM – SIDRA, 2021).

Com dados do IBGE SIDRA de área plantada e rendimento confirmam ainda a tendência dos últimos anos de aumento de área plantada. Segundo levantamento da CONAB (2018, 2019), a safra de 2017-2018 mesmo com disparidade climática entre regiões, o bom desempenho das lavouras na mesorregião noroeste do RS fez com que a média estadual de produção e rendimento atingisse o terceiro maior valor da série histórica, números inferiores somente aos da safra 2016-2017 e 2018-2019.

Segundo Feix e Leusin Júnior (2019) em um período abrangendo as safras de 2010 a 2019 e em âmbito de Estado, a soja aumentou em 45 % e o milho recuou 33,6 %. Já na mesorregião noroeste, onde se concentra importante parte da produção de grãos do Estado, a expansão foi de mais de 330 mil hectares, enquanto o milho reduziu em mais de 200 mil hectares. Em termos de expansão em áreas não tradicionais com estes cultivos,

destaca-se o avanço sobre as áreas do bioma Pampa no sul do Estado. De acordo com estimativas do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), em mais de 300.000 hectares está ocorrendo a rotação de culturas entre o arroz e a soja.

#### **4.2 Disponibilidade hídrica do RS**

Quando o regime pluviométrico é suficiente para dar aporte à demanda atmosférica dos cultivos, em geral se obtém bons resultados de rendimento. Caso contrário, as restrições de umidade no solo, dada pela disponibilidade hídrica no solo menor do que a demanda evaporativa da atmosfera, a vegetação começa a entrar em estado de estresse hídrico (Allen et al., 2006). Conforme Sentelhas et al., (2015), as maiores diferenças de rendimento da soja no cenário brasileiro estão relacionadas a este fenômeno, o déficit hídrico, e ocorrem principalmente no sul do Brasil. Já na região centro-sul, a principal causa é relacionada à gestão das culturas.

O RS, em média, apresenta distribuição bastante similar da precipitação pluvial nas quatro estações do ano. Mas, apesar disso, a deficiência hídrica se concentra no verão. Isto decorre do incremento na demanda evaporativa neste período, a qual determina a magnitude da perda de água pelos processos de transpiração e, conseqüentemente, a necessidade da absorção da água pelas raízes das plantas. Já em termos de distribuição espacial, sabe-se, que na metade sul do Rio Grande do Sul ocorre menor precipitação pluvial e maior deficiência hídrica do que na metade norte, principalmente nos decêndios do período de verão (Leivas; Berlato e Fontana, 2006, Matzenauer; Maluf e Radin, 2020).

A faixa de valores de rendimentos médios da soja varia entre as regiões de produção, associada principalmente às diferenças no regime pluviométrico. Para fins de comparação, o rendimento médio da soja no RS é de 2.597 kg. ha<sup>-1</sup> (média das safras 2011 a 2016 - IBGE, PAM 2018), enquanto no estado do Mato Grosso, maior produtor

brasileiro de soja, os rendimentos médios são superiores a  $3.000 \text{ kg.ha}^{-1}$  para o mesmo período. Os rendimentos obtidos no RS são de fato inferiores aos obtidos em outras regiões brasileiras, como consequência do fato da cultura da soja no RS ser praticada, majoritariamente, sem irrigação e submetida a constantes restrições hídricas. Já na região central do Brasil a situação hídrica é oposta, com o período de cultivo coincidindo com a estação chuvosa, o que possibilita a obtenção de maiores rendimentos.

Dada a importância deste elemento, no zoneamento agrícola de risco (ZARC), a época de semeadura é ajustada de forma a minimizar o risco de insucesso, procurando entre outros que o período do máximo desenvolvimento vegetativo não coincida com períodos de deficiência de água, sendo este assumido como o principal fator de risco. Condições hídricas desfavoráveis de umidade no solo durante este período acarretará em maiores perdas (Cunha et al., 2001, Sentelhas et al., 2015, Matzenauer; Maluf e Radin, 2020).

Em média a necessidade total de água na soja, para obtenção do máximo rendimento, varia entre 450 a 800 mm por ciclo, dependendo das condições climáticas, do manejo da cultura e da duração do ciclo da cultivar. O denominado período crítico da cultura da soja ocorre na floração e no enchimento de grãos, quando deficiências comprometem o rendimento (Bergamaschi e Bergonci, 2017). Nestas etapas do ciclo (floração e enchimento de grãos) o consumo de água da soja pode variar de 7 a  $8 \text{ mm.dia}^{-1}$  (EMBRAPA, 2013; Sentelhas et al., 2015; Zanon; Streck e Grassini, 2016). Ter conhecimento destas informações e buscar o atendimento da necessidade de água das plantas são essenciais em programas de monitoramento e de gerencialmente de riscos do setor agrícola.

### 4.3 Indicadores de condição hídrica regional

Existem vários índices que podem ser utilizados para expressar a condição hídrica, sendo que os mais frequentemente utilizados são os elementos derivados do balanço hídrico meteorológico, obtido a partir de dados de estações meteorológicas de superfície. Alguns exemplos de índices usados são: o déficit hídrico, que é a diferença entre a evapotranspiração potencial (ETP) e a evapotranspiração real (ETr); a evapotranspiração relativa, que é a razão entre a ETr e ETP; o Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA), que é a razão entre a ETr e a evapotranspiração da cultura (ETc).

O ISNA, definido para a cultura da soja no RS por CUNHA et al. (2001), leva em consideração as condições hídricas da cultura, frente aos estádios fenológicos; caracterizando períodos favoráveis, desfavoráveis e intermediários quanto à condição hídrica, conforme as diferentes opções de épocas de semeadura da cultura. Este é índice utilizado para caracterizar o mapa de riscos climáticos para a cultura, delimitando o zoneamento agroclimático de risco e publicado, anualmente, nas portarias do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento para definição das épocas recomendadas de semeadura da soja em todo o Brasil. (<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico>).

Para estudos com abrangência regional, os dados oriundos de estações meteorológicas de superfície apresentam algumas limitações decorrentes do distanciamento entre as estações, da necessidade de interpolar dados e também das falhas e discontinuidades contidas nas séries históricas. Neste contexto, as imagens orbitais podem auxiliar, pela qualidade dos dados, pela gratuidade da obtenção e pela disponibilidade de longos períodos de dados contínuos no tempo e no espaço. Existem vários índices relacionados à indicadores da condição hídrica da superfície possíveis de

serem obtidos a partir de imagens de satélite. Um exemplo bastante interessante de salientar é o TVDI, um índice que vem sendo utilizado para estimar a umidade da superfície em escala regional (Sandholt; Rasmussen e Andersen, 2002; Holzman; Rivas e Piccolo, 2014). Este índice faz um uso conjugado de dados do termal e de índice de vegetação, provenientes de sensoriamento remoto, fornecendo informações sobre a umidade da superfície com um detalhamento das variações ocorridas nas regiões de produção muito superior àquela possível com uso de dados de estações meteorológicas de superfície.

#### **4.4 Sistemas de monitoramento**

A produção agrícola está sujeita a dois importantes fatores de risco não controláveis pelo agricultor, que é o mercado e a condição meteorológica. Em relação ao segundo fator, é importante salientar que o mesmo determina grande parte da variabilidade da produção agrícola, visto que as condições meteorológicas são muito variáveis no tempo e no espaço (Fraisse et al., 2016; Radin e Matzenauer, 2016). Os sistemas de monitoramento agrícola (SMA) permitem um melhor entendimento dos impactos que a variabilidade climática pode provocar, especialmente quando ocorrem nas fases fenológicas críticas das culturas. Portanto, as análises de séries históricas de informações armazenadas pelos SMA podem auxiliar na tomada de decisão, aumentando a eficiência do uso de recursos, a lucratividade agrícola, minimizando os riscos e garantindo a estabilidade da produção agrícola (Fraisse et al., 2016; Romani et al., 2016).

Os SMA geram informações essenciais para a planejamento da agricultura. Um exemplo a ser mencionado pela sua relevância é a utilização no Brasil desde 1996 do zoneamento agroclimático de risco (ZARC) (Cunha et al., 2001), no qual se define o que, quando e onde plantar com menor risco de perdas. Mas o SMA também é valioso para



fins de monitoramento agrometeorológico em tempo real, podendo diferenciar as regiões em relação às condições de crescimento das lavouras nas diversas áreas de produção, podendo gerar alertas.

Neste caso, o uso de estações agrometeorológicas automáticas são essenciais para fornecer informações para a avaliação e gestão de risco (Massignam et al., 2016; Sivakumar, 2016). Além do uso de estações meteorológicas de superfície, dados complementares como imagens de satélite, radares meteorológicos, dados de campo e dados de reanálise, podem compor os SMA (Baethgen; Berterretche e Gimenez, 2016; Caramori et al., 2016; Moura e Fortes, 2016).

O uso das imagens de satélites é considerado uma das melhores tecnologias para coleta sistemática de dados no monitoramento das atividades agrícolas, podendo ser obtido com distintos níveis de detalhamento, desde o uso de sensores portáteis, drones até sensores orbitais (Tsukahara et al., 2016), muitas vezes usados de forma complementar. Uma característica importante dos SMA é a necessidade de equipes multidisciplinares, capazes de integrar informações de diferentes áreas do conhecimento a fim de gerar produtos capazes de se constituir em indicadores das condições que as culturas são submetidas (Fraisie et al., 2016).

Neste sentido, em escala nacional (Brasil), destaca-se o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) na geração de produtos de monitoramento abrangentes (climatológicos - atlas) que são utilizados para caracterizar os diferentes ambientes de produção (Moura e Fortes, 2016). Também é relevante mencionar o LATIS (Laboratório de Aplicação de Tecnologia de Imagens de Satélite), que é uma iniciativa de cooperação entre o INMET e a CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento), em que especialistas fazem uso de sensoriamento remoto por satélite e informações meteorológicas para apoiar as atividades de estimativa de produção agrícola. Um dos

produtos mais relevantes gerados semestralmente é o Boletim de Acompanhamento Agropecuário, que mostra estimativas de produção das principais culturas cultivadas no país.

De forma geral, os produtos oriundos de SMA buscam disponibilizar produtos específicos apropriados à caracterização dos fatores limitantes para uma cultura em uma região específica. A questão hídrica acaba tendo destaque na maior parte das regiões de produção no Brasil.

Especificamente no RS, o elemento meteorológico que mais se destaca nas análises de SMA é a precipitação pluvial. É grande a variabilidade espacial deste elemento entre as diferentes regiões, além da já reconhecida grande variabilidade interanual (Wrege et al., 2011; Radin e Matzenauer, 2016). A variabilidade da precipitação implica em variabilidade da umidade do solo, da disponibilidade de água para as plantas, com o déficit hídrico resultando em perda parcial ou completa da produção (Sentelhas et al., 2015; Radin e Matzenauer, 2016). Assim, utilizando informações meteorológicas aliadas a dados sobre a situação atualizadas dos cultivos, no RS é gerado o Boletim do Conselho Permanente de Agrometeorologia Aplicada ao Estado do Rio Grande do Sul – COPAAERGS. Com frequência trimestral, este documento informa os produtores os dados da previsão de disponibilidade de água durante fases críticas do ciclo, além de informações sobre riscos de eventos climáticos adversos, previsão do potencial de rendimento das culturas, dentre outros (Radin e Matzenauer, 2016).

A ocorrência de períodos de deficiência hídrica pode ser monitorada através de SMA que gerem diferentes índices ou indicadores que permitam visualizar de forma mais representativa a variabilidade e a representação espacial das informações (Fraisse et al., 2016; Ravelo et al., 2016).

O SMA brasileiro a plataforma web do AgriTempo usa o índice de seca SPI (*Standardized Precipitation Index*), um indicador desenvolvido para detecção de seca e monitoramento de capacidade hídrica. Calculado com dados de precipitação, o SPI pode ser aplicado para análise de recursos hídricos considerando diferentes escalas de tempo e quantificando o déficit ou o excesso de precipitação em distintas escalas de tempo (Romani et al., 2016).

Na Argentina foi criado um SMA o *Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales* (CREAN) de avaliação das secas. Um dos índices utilizados é o NDVI obtido por imagens de satélite aplicando a metodologia de diferença de imagens do sensor MODIS. A magnitude das diferenças negativas no NDVI indica a intensidade da seca, enquanto as diferenças positivas indicam uma situação de abundância de água (Ravelo et al., 2016). O Uruguai implementou o SMA o *Sistema Nacional de Información Agropecuária* (SNIA) onde desenvolveu um índice de severidade de secas exclusivamente com base em dados de sensoriamento remoto, combinando índices de precipitação, estado da vegetação e temperatura da superfície, e são então gerados mapas em tempo real para todo o país (Baethgen; Berterretche e Gimenez, 2016).

#### **4.5 Índice de umidade da superfície - TVDI**

O índice de umidade da superfície, o TVDI, tem sido utilizado para verificação de períodos com ocorrência de deficiência hídrica, seja para a soja, campos, arroz, conforme estudos já realizados no Rio Grande do Sul (Moreira et al., 2014; Mengue et al., 2015; Schirmbeck; Schirmbeck e Fontana, 2015; Schirmbeck; Fontana e Schirmbeck, 2017a, Schirmbeck et al., 2017b,c).

O TVDI utiliza como entrada dados obtidos somente de imagens obtidas por sensoriamento remoto. São utilizadas imagens de temperatura de superfície ( $T_s$ ), obtidas

a partir de informações coletadas no espectro termal (Coll e Caselles, 1997; Niclòs et al., 2007), as quais são indicadoras do estado hídrico das plantas (Long e Singh, 2012; Holzman; Rivas e Piccolo, 2014; Yang et al., 2015). Também, são utilizadas imagens de um índice de vegetação, o qual é obtido a partir das bandas da porção reflexiva do espectro, que responde à variabilidade da biomassa verde (Jensen, 2009) e tem sido muito utilizado na modelagem de rendimento de grãos.

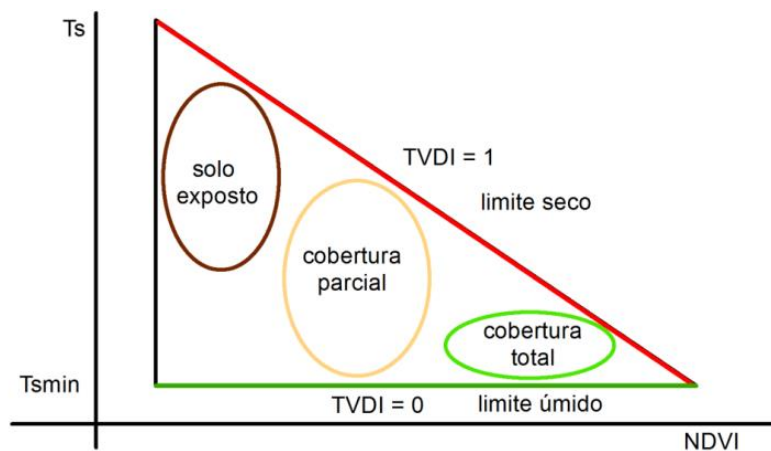
O índice TVDI é obtido com a aplicação da Equação (1), proposta por Sandholt; Rasmussen e Andersen, (2002):

$$TVDI = \frac{(T_s - T_{Smin})}{(a + b \cdot NDVI - T_{Smin})} \quad (1)$$

sendo:  $T_s$  a temperatura radiativa da superfície observada num dado pixel (K);  $T_{Smin}$  a temperatura mínima de superfície (K), correspondente ao limite úmido do triângulo evaporativo (Figura 2 - linha verde); "a" e "b" são os coeficientes, linear e angular, da reta que representa o limite seco (Figura 2 - linha vermelha).

No triângulo evaporativo, apresentado na Figura 2, pode-se visualizar em lados opostos o solo exposto (quando o NDVI é baixo e a  $T_s$  pode apresentar grandes variações) e a cobertura total da vegetação (quando o NDVI é alto e a  $T_s$  é baixa e com pequenas variações). Em condições de cobertura parcial (NDVI intermediários), quanto menor for a  $T_s$ , mais adequada é a condição hídrica e, portanto, menor é o TVDI. Neste modelo normalizado o TVDI varia entre 0 e 1; valores próximos de 0 (limite úmido) indicam que não há deficiência hídrica e que o solo tem umidade adequada; nesta parte do triângulo se localizam as temperaturas mínimas médias. Já os valores próximos de 1 (limite seco) indicam alta deficiência hídrica, associada ou não, a solo exposto ou cobertura total do solo.

Figura 2. Triângulo evaporativo usado para o cálculo do índice de umidade da superfície (TVDI), obtido a partir da relação entre a Temperatura ( $T_s$  e  $T_{Smin}$ ) e o índice de Vegetação por diferença normalizada (NDVI).



Fonte: Schirmbeck et al. (2019)b.

Para a construção do TVDI, a informação da biomassa (índice de vegetação) mais comumente é obtida do índice NDVI. Mas, alguns estudos têm utilizado o também EVI, que é uma variação aprimorada do NDVI quanto a correções de influências atmosféricas e do solo (Mallick; Bhattacharya e Patel, 2009 e Holzman; Rivas e Piccolo, 2014), no cálculo do TVDI, o qual tem apontado bons resultados (Schirmbeck; Fontana e Schirmbeck, 2019c).

A dispersão obtida, geralmente triangular ou trapezoidal, depende da condição climática e da cobertura vegetal (Price, 1990, Carlson; Gillies e Perry, 1994; Long e Singh, 2012). Em geral, a tendência do triângulo evaporativo em climas quentes com alta cobertura vegetal é trapezoidal (Carlson, 2007).

O modelo assume que a umidade da superfície é a principal fonte de variação da  $T_s$  e que o TVDI está relacionado com a umidade superficial do solo, devido às mudanças na inércia térmica e ao controle da evaporação e transpiração, conforme o balanço de energia (Sandholt; Rasmussen e Andersen, 2002).

#### 4.5.1 Obtenção do TVDI com imagens Landsat

O programa Landsat envolveu o lançamento de 8 satélites com mais de 30 anos de geração de imagens. Landsat 8 – OLI/TIRS (*Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor*) é o oitavo da série de satélites Landsat e está ativo em operação desde fevereiro de 2013. As imagens possuem resolução espacial de 30 m nas bandas multiespectrais, 15 m na banda pancromática e 100 m na banda termal, o seu horário de imageamento é às 10h. As imagens multiespectrais do satélite Landsat 8 podem ser obtidas através da base de dados do USGS/ESPA (*United States Geological Survey/Center Science Processing Architecture*) (<https://ers.cr.usgs.gov/login>), onde são disponibilizadas já com correção geométrica e com o produto de índice de vegetação. Neste sistema, ainda não apresenta a opção para a aquisição do produto de temperatura de superfície.

O satélite Landsat, sensores TM, ETM e OLI, por disponibilizarem as bandas necessárias para o cálculo do NDVI ou EVI e de  $T_s$  têm sido muito utilizados para a estimativa do TVDI (Gao; Gao e Chang, 2011; Chen et al., 2015; Li et al., 2016, Uniyal et al., 2017, Schirmbeck; Fontana e Schirmbeck, 2018) para áreas de agricultura, regiões costeiras, e também em área agrícola no bioma Pampa do RS (Mengue et al., 2015). Este sensor oferece imagens que permitem um detalhamento bastante razoável das áreas agrícolas no Estado. Apresenta, entretanto, restrições, quando o objetivo é a avaliação do TVDI ao longo do tempo, dada a frequência de imageamento de 16 dias e a possibilidade de ocorrência de nuvens no momento da coleta da imagem.

#### 4.5.2 Obtenção do TVDI com imagens MODIS

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) possui características de abrangência regional e alta repetitividade (Rudorff; Shimabukuro e

Ceballos, 2007), assim como disponibilidade dos dados em forma de produtos, tornando a avaliação direta, sem a necessidade de processamentos complexos e aplicação de modelos. Os produtos processados são disponibilizados gratuitamente para *download*, onde se pode encontrar mais de 50 tipos diferentes, os quais podem ser utilizados em várias áreas de estudo, tanto para o continente, atmosfera ou mesmo para os oceanos.

Terra é a primeira plataforma deste programa, foi lançada em dezembro de 1999, sua órbita é quase polar com inclinação de 98,2° e passa pelo Equador às 10h30min. A segunda plataforma é a Aqua, lançada em maio de 2002, sua inclinação é de 98° e passa pelo Equador às 13h30min.

As imagens do sensor MODIS são obtidas através da base de dados do LP DAAC (*Land Processes database - Distributed Active Archive Center*), (<https://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLT/>) onde são disponibilizadas em quadrantes (*tiles*) de 10 x 10 graus (1.200 x 1.200 km), os quais são identificados por sua posição h (horizontal) e v (vertical).

Dentre os diversos produtos disponibilizados, se destacam os produtos MOD11 de Temperatura de Superfície e o MOD13 de índices de vegetação, muito utilizados para monitoramento agrícola. Ambos os produtos podem ser empregados para a estimativa do TVDI em escala regional, já existindo diversos estudos realizados neste sentido (Garcia et al., 2014; Holzman; Rivas e Piccolo, 2014; Liang et al., 2014, Schirmbeck; Fontana e Schirmbeck, 2018).

O sensor MODIS, em função da moderada resolução espacial, pode incorrer em mistura espectral de diferentes alvos no mesmo pixel de uma cena, como a intensidade da mistura é dependente do tipo de ocupação. Por outro lado, dada a resolução temporal de 16 dias para o produto índice de vegetação, minimiza problemas de interferência

atmosférica propiciando condições para o monitoramento contínuo da superfície e compatível com a sucessão de fases de uma cultura anual, como a soja. Neste contexto, interessante mencionar algumas aplicações com imagens MODIS para a geração do índice TVDI com abrangência em todo o território do Rio Grande do Sul, como os trabalhos desenvolvidos por Schirmbeck; Fontana e Schirmbeck (2017a, 2018).



## 5 MATERIAL E MÉTODOS

Do ponto de vista de abrangência espacial, o estudo foi feito em duas escalas. Na escala local, com uso dados de campo de estação radiométrica de superfície e de imagens OLI/TIRS, busca-se entender o padrão de resposta do índice TVDI frente aos padrões de variação da cobertura vegetal e do desenvolvimento da vegetação, com foco na cultura da soja. Em escala regional, foram utilizadas as imagens do sensor MODIS para o entendimento dos padrões de variação no tempo e no espaço deste índice.

A metodologia do trabalho foi dividida nestas etapas:

- ✓ Obtenção, organização e pré-processamento das imagens de satélite e dos dados da estação radiométrica de superfície;
- ✓ Cálculo do TVDI em escala local e regional com uso de imagens do sensor OLI/TIRS e MODIS;
- ✓ Análise de dados do TVDI em relação a dados de superfície e sua capacidade em expressar de forma acurada a umidade da superfície;
- ✓ Relação entre TVDI e sistemas de monitoramento.

### 5.1 Área de estudo

O estudo compreendeu duas áreas agrícolas do Estado do RS, que está localizado no extremo meridional do Brasil (Figura 3). Ambas áreas estão inseridas no bioma Pampa do Estado.

No primeiro artigo se usou dados coletados em campo de áreas cultivadas por soja e arroz e áreas de campos localizadas nos municípios de Jaguari, São Vicente do Sul, Mata e São Pedro do Sul. Nos três artigos subsequentes se usou dados medidos em lavoura de soja, experimento *On Farm*, localizada no município de Carazinho, o qual está

inserido na mesorregião noroeste do RS, caracterizada pela intensa produção de grãos. Para o último artigo o estudo abrangeu uma área maior, a soja mapeada no município de Carazinho. Na Figura 4 é apresentado um fluxograma que detalha os sensores utilizados para as diferentes áreas de estudo e escala regional e/ou local utilizadas.

Figura 3. Localização das áreas de estudo no Estado do Rio Grande do Sul. Imagens Landsat-8 OLI/TIRS de 07 de fevereiro de 2015 e de 08 de fevereiro de 2018.

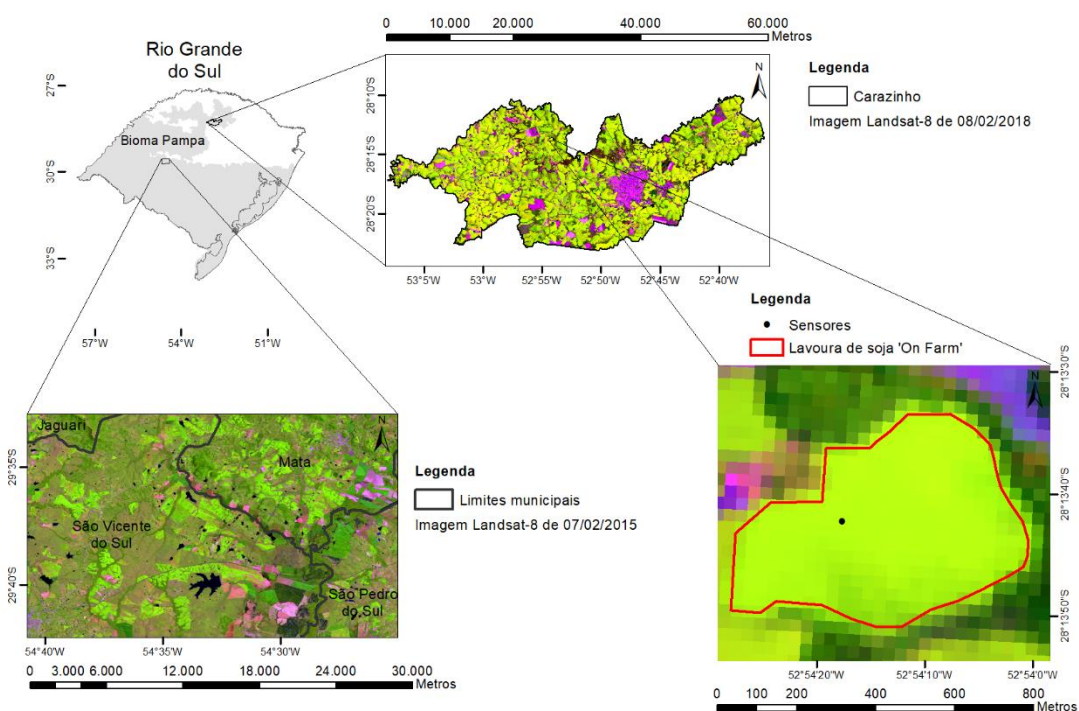
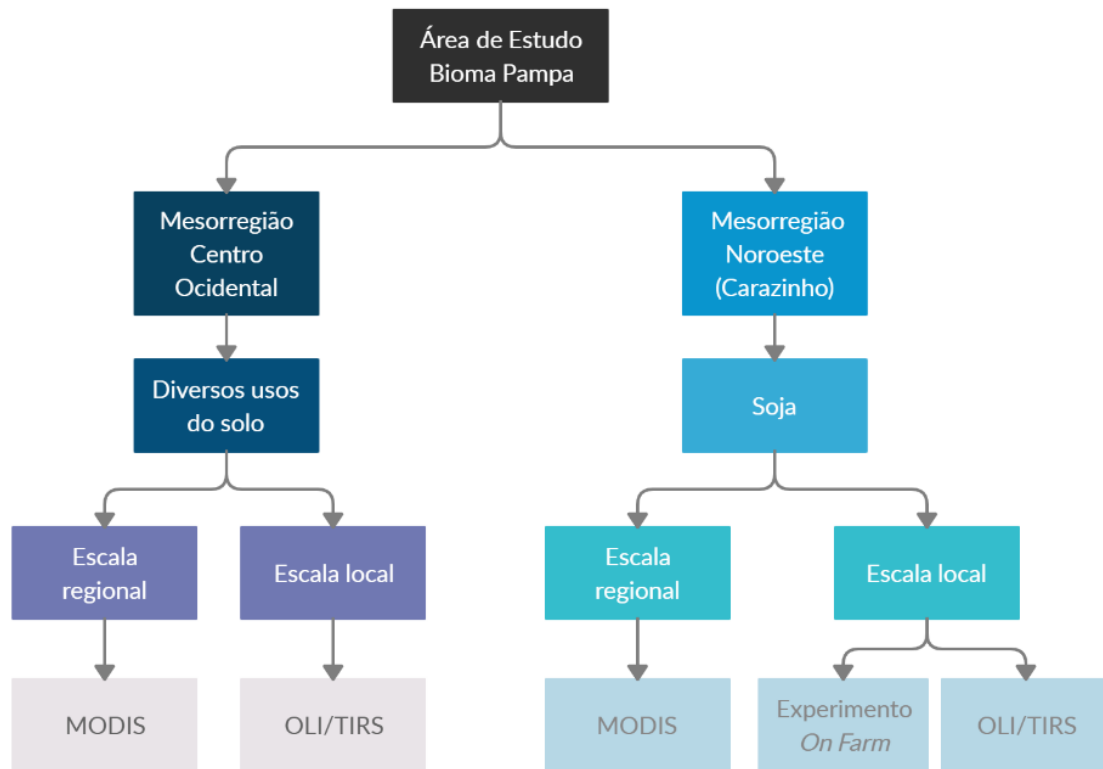


Figura 4. Fluxograma da abrangência espacial do estudo identificando os sensores utilizados para análise.



O Estado do RS possui uma grande diversidade de paisagens, com remanescentes da Mata Atlântica e os campos; o relevo apresenta altitudes que variam até 1.398 m. Com base em informações de relevo, da cobertura vegetal e do uso do solo Guasselli et al. (2006) elaboraram o mapa do macrozoneamento ambiental do Rio Grande do Sul que teve por objetivo caracterizar os principais usos do solo no RS em cinco diferentes macrozonas: Planalto, Cuesta do Haedo, Depressão Central, Escudo Sul-rio-grandense e Planície Costeira.

O Planalto com variação altimétrica de 700 a 1389 m é caracterizado principalmente por áreas de campos e pastagens; florestas e zonas agrícolas de uso intensivo de verão e inverno e zona agrícola de uso intensivo de verão, região esta que

está inserido o município de Carazinho e a parcela *On Farm* de soja. Já na Depressão Central onde está inserida a área do primeiro artigo é uma região característica por áreas de altitudes de 100 a 300 m é constituída, predominantemente, de áreas de campos e pastagens e por zonas agrícolas de uso intensivo de verão e zonas agrícolas de culturas diversificadas.

Alvares et al. (2013), tomando como base a classificação climática de Köppen, define que o RS apresenta os tipos climáticos Cfa (clima temperado úmido com verão quente) e Cfb (clima temperado úmido com verão moderadamente quente). Na região costeira do norte do Rio Grande do Sul, o Cfa foi identificado em altitudes inferiores a 500 m. No centro-Norte o Cfa abrange paisagens com altitudes abaixo de 550 m. Mais a oeste, este limite muda para 600 m, e um pouco mais a noroeste, portanto, mais longe do oceano, o limite de altitude entre Cfa e climas Cfb sobe para 650 m. O clima Cfb ocupa desde a fronteira leste da Bacia do rio Paraná até os Planaltos de Araucária.

A temperatura, na região Sul do Brasil, é de vital importância para as espécies vegetais, influenciando no calendário agrícola e no tipo de vegetação natural de cada região. Segundo o Atlas Climático da Fepagro o regime térmico do RS apresenta respectivamente, as temperaturas médias das mínimas, médias e máximas de 13,5 °C; 18,6 °C e 23,9 °C. Já a precipitação pluvial anual média na parte norte do Estado varia entre 1.600 a 2.000 mm e apresenta valores menores para a metade Sul que fica entre 1.000 a 1.600 mm. Importante caracterizar que o regime de precipitação pluvial no RS é altamente variável entre anos, e que esta variabilidade, em parte, está associada a eventos de grande escala. Geralmente, anos de baixa precipitação pluvial estão associados a eventos de La Niña e picos de alta a eventos de El Niño, especialmente na primavera e início do verão (Berlato e Cordeiro, 2017).

## 5.2 Experimentação de campo

A experimentação de campo com instalação da estação radiométrica de superfície visou aportar informações para análise das incertezas associadas à obtenção dos componentes  $T_s$ /índice de vegetação, oriundos de sensores orbitais, frente a medições realizadas em experimento de campo. Para tanto, a estação radiométrica de superfície foi instalada num experimento que foi desenvolvido em formato *On Farm*, localizado no município de Carazinho a partir de uma parceria entre a EMBRAPA Trigo de Passo Fundo e a Faculdade de Agronomia da UFRGS. O monitoramento buscou reconhecer os padrões de variação do índice TVDI frente às diversas fases de desenvolvimento do cultivo da soja, bem como o seu padrão de variação no tempo. Os dados do experimento de campo também foram usados na elaboração do último artigo da tese, o qual abrangeu todo o município de Carazinho. Foram utilizados dados coletados em campo de áreas com cultivos de soja.

O período experimental abrangeu a safra primavera-verão de 2017-2018. A semeadura soja foi feita no dia 13 de novembro de 2017, a emergência ocorreu em 21 de novembro e a colheita foi efetuada em 03 de abril de 2018. Na área foram instalados diversos sensores, em linha (Figura 5), de forma a caracterizar as condições ambientais, atmosfera e solo, durante o ciclo da cultura.

Figura 5. Foto da área experimental: a) vista aérea por drone com a localização dos sensores e instrumentos meteorológicos instalados (1, 2 e 3 Sensores de NDVI e Ts; 4 Torre micrometeorológica; 5 Saldo radiômetro e Rg; 6 Pluviômetro) e b) foto mostrando com detalhe os com sensores instalados.

a)



b)



Os sensores radiométricos instalados (Figura 6) visaram o monitoramento contínuo da radiação incidente e refletida no espectro do vermelho (0,6 a 0,7  $\mu\text{m}$ ) e do infravermelho próximo (0,805 a 0,815  $\mu\text{m}$ ) (sensor de NDVI - SRS – Meter Group). A radiação incidente foi medida com o sensor voltado para cima para fornecer os valores de referência, enquanto a radiação refletida pela cultura da soja foi medida com o sensor voltado para baixo, restringindo o campo de visão a 20 °, para monitorar o crescimento e desenvolvimento da planta. Também foi medida a radiação emitida pela superfície no

espectro termal (8 a 14  $\mu\text{m}$ ) (sensor de temperatura radiométrica - SI 421 - Apogee) com campo de visão de 18  $^\circ$ .

Estes sensores foram instalados em torre meteorológica a uma altura de aproximadamente 1 m acima do topo do dossel apontando para a mesma área a 90  $^\circ$ . Ambos os sensores coletavam informações continuamente, registrando dados a cada 15 minutos, utilizando o datalogger da série Em50 da Meter Group para coleta e armazenamento de dados.

Figura 6. Fotos dos sensores de NDVI e temperatura de superfície ( $T_s$ ): da direita para esquerda a) sensor de NDVI hemisférico, sensor de NDVI direcional e sensor de temperatura radiométrica b) datalogger sendo instalado e configurado em campo, c) foto dos sensores em fase inicial de desenvolvimento da soja em 01/12/2017 d) foto dos sensores monitorando a soja já com cobertura total de vegetação em 14/02/2018.

a)



b)



c)



d)



Foram utilizados também três sensores de conteúdo de umidade nos primeiros centímetros da superfície do solo (sensor de umidade do solo TDR - Campbell Scientific), os quais foram instalados verticalmente e mediram a umidade média entre 0 e 30 cm no perfil. Nas análises foram utilizados os dados diários de umidade coletados às 9h, momento em que há equilíbrio termodinâmico com o dia anterior. Os dados foram registrados usando o datalogger (CR 1000 - Campbell Scientific,)

Os sensores de NDVI e  $T_s$  capturam informações a partir de medições radiométricas, com tecnologia análoga a captura de imagens dos satélites, desta forma as análises conjugadas dos dados destes sensores possibilitarão a análise do padrão diário do TVDI ao longo do dia, possibilitando a melhor compreensão da variabilidade temporal das condições hídricas dos cultivos.

### **5.3 Imagens do sensor OLI/TIRS**

Para analisar o comportamento em escala local, abrangendo a área experimental, foram utilizadas 4 imagens OLI/TIRS órbita/ponto (222/80 Carazinho), a qual abrangeu a lavoura, mas também outras áreas de interesse. As imagens utilizadas atenderam aos critérios de ausência de nuvens e período do ciclo da soja.

A resolução espacial das imagens Landsat 8 do sensor OLI é de 30 metros para as bandas do espectro visível e infravermelho próximo, já a para o sensor TIRS, a resolução espacial é de 100 metros para as bandas do termal. As imagens Landsat 8 – OLI/TIRS foram obtidas através da base de dados do USGS/ESPA (*United States Geological Survey – Center Science Processing Architecture*) (<https://ers.cr.usgs.gov/login>) fornecidas no sistema de coordenadas UTM, WGS-84 e no formato GeoTIFF e as imagens termais inclusive são fornecidas com processo de reamostragem de 30 m aplicado.



Para cálculo do TVDI foi utilizado o produto Landsat 8 – OLI de NDVI, o qual é obtido a partir das bandas do visível e infravermelho próximo, assim como, foram utilizadas as bandas 10 e 11 do sensor TIRS para a obtenção da  $T_S$ .

A  $T_S$  foi calculada pelo algoritmo *split-window* utilizado as bandas do espectro termal, citadas. O principal benefício deste modelo é o melhor desempenho no processo de correção atmosférica, visto que a atmosfera é a principal responsável pelas diferenças de temperatura obtidas nestas duas bandas termais (Nicolós et al., 2007). A  $T_S$  foi calculada aplicando a Equação 2, proposta por Jiménez-Muñoz et al., (2014) já utilizada para obtenção do TVDI (Schirmbeck et al., 2017b).

$$T_S = T_{10} + c_1(T_{10} - T_{11}) + c_2(T_{10} - T_{11})^2 + c_0 + (c_3 - c_4w)(1 - \varepsilon) + (c_5 + c_6w)\Delta\varepsilon \quad (2)$$

sendo:  $T_{10}$  e  $T_{11}$  a temperatura, em Kelvin, nas bandas do termal no satélite;  $c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$  e  $c_6$  os coeficientes estimados para o sensor TIRS (Tabela 1);  $w$  o conteúdo de vapor de água na atmosfera em  $\text{g cm}^{-2}$ ;  $\varepsilon$  a emissividade média das bandas do termal ( $\varepsilon = 0,5 (\varepsilon_{10} + \varepsilon_{11})$ );  $\Delta\varepsilon$  a diferença da emissividade nas bandas do termal ( $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{10} - \varepsilon_{11}$ ).

Tabela 1. Coeficientes utilizados no algoritmo *split-window* - Landsat 8-OLI/TIRS.

Coeficiente	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$
Valor	-0,268	1,378	0,183	54,3	-2,238	-129,2	16,4

Fonte: Jiménez-Muñoz et al. (2014).

Para o cálculo das emissividades das bandas 10 e 11 foi utilizada a Equação 3, proposta por Sobrino; Jimenez Muñoz e Paolini, (2002):

$$\varepsilon_n = \varepsilon v_n P_v + \varepsilon_{sn} (1 - P_v) \quad (3)$$

sendo:  $\varepsilon_{Vn}$  a emissividade da vegetação para cada uma das bandas do termal;  $\varepsilon_{Sn}$  a emissividade do solo para cada uma das bandas do termal;  $P_V$  é a porcentagem de vegetação.

Os valores assumidos para as emissividades nas bandas 10 e 11 para a vegetação e o solo, segundo Yu; Guo e Wu, (2014), foram respectivamente:  $\varepsilon_{V10} = 0,9863$  e  $\varepsilon_{V11} = 0,9896$ ;  $\varepsilon_{S10} = 0,9668$  e  $\varepsilon_{S11} = 0,9747$ .

A porcentagem da vegetação ( $P_V$ ) foi estimada a partir do NDVI, levando em consideração as seguintes restrições; se o NDVI está compreendido no intervalo (0 a 0,3) se considera solo exposto ( $P_V = 0$ ); se o NDVI está no intervalo de (0,3 a 0,6) responde a função linear de duas componentes: solo e vegetação (Equação 4); e se o NDVI for maior ou igual a 0,6 ( $P_V = 1$ ), conforme proposto por Schirmbeck & Rivas (2007).

$$P_v = 3,333 NDVI - 1 \quad (4)$$

#### 5.4 Imagens do sensor MODIS

Foram utilizados os produtos do sensor MODIS do satélite Terra, de Temperatura de Superfície ( $T_s$ ) e de índice de vegetação (NDVI) para a estimativa do TVDI em escala regional ambos foram obtidos na base de dados LP DAAC (*Land Processes database Distributed Active Archive Center*) (<https://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLT/>).

O produto MOD11A2 (Temperatura de Superfície) disponibiliza a temperatura a partir de imagens geradas no período do dia e da noite, estando as mesmas na ausência de nuvens. Foi utilizada a composição de 8 dias em resolução espacial de 1.000 m.

Do produto índice de vegetação (MOD13A2) foi utilizado o NDVI, que é obtido a partir de composição de máximo valor de imagens sequenciais capturadas em um período de 16 dias. De forma a compatibilizar com as imagens de temperatura, foi

utilizada a resolução espacial de 1.000 m, sendo apresentado para cada pixel da imagem o índice de vegetação mais alto encontrado no período da composição.

Os produtos abrangeram os *tiles* h13v11 e h13v12 de forma a cobrir toda o RS, os quais foram transformados da projeção sinusoidal para coordenadas geográficas WGS 84 e, após, recortada a área de estudo. Ao total foram utilizadas 12 imagens que abrangeram todo período da safra da soja.

### 5.5 Obtenção dos limites úmido e seco do TVDI

Para a construção do triângulo evaporativo foram usadas todas as imagens disponíveis para cada sensor que abrangem o período do ciclo da cultura da soja, obtendo, assim, um único triângulo evaporativo. Nele estão englobados todos os pixels de forma a apresentarem os extremos das condições hídricas do período analisado (Schirmbeck; Fontana e Schirmbeck, 2018). Esta proposta metodológica, permite realizar estudos comparativos da condição de umidade da superfície em distintas datas, já que o TVDI é um índice relativo aos extremos hídricos ajustados no triângulo.

As bordas, úmida (verde na Figura 2) e seca (vermelho na Figura 2) do triângulo evaporativo foram obtidas a partir de um gráfico de dispersão de  $T_s$  versus índice de vegetação (NDVI), delimitando o triângulo evaporativo (Figura 2). Os passos metodológicos foram os seguintes (Schirmbeck; Fontana e Schirmbeck, 2018):

- ✓ Fatiar os valores do NDVI em 100 intervalos de 0,01; obtendo os valores de  $T_s$  para cada um destes intervalos;
- ✓ Construir o histograma de frequência acumulada para cada intervalo do NDVI e identificar os valores de  $T_s$  correspondentes a 2% e 98% de ocorrência;

- ✓ Definir os pixels do limite úmido (todos os pixels com  $T_s \leq$  temperatura correspondente a 2%) e do limite seco (todos os pixels com  $T_s \geq$  temperatura correspondente a 98%). Este procedimento foi realizado para cada um dos 100 intervalos de NDVI e, subsequentemente, os pixels de cada limite e intervalo foram agrupados;
- ✓ Determinar a borda úmida – foi calculado o valor médio de todos os pixels que compõem o limite úmido (valor equivalente à média das  $T_{Smin}$ );
- ✓ Definir a borda seca – foi feito o ajuste de regressão linear usando todos os pixels que compõem o limite seco, para obter os dois coeficientes a e b da equação ajustada.

Foi assumido que os pixels da dispersão que ficaram mais distantes e representaram uma porcentagem muito pequena do conjunto, representam superfícies anômalas, incluindo água e nuvens. Estes pixels, que estão próximos das bordas seca ou úmida, foram descartados das análises, conforme recomendado por Carlson, (2007).

## 6 REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G. *et al.* **Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.** Roma: FAO. 2006. 323 p. (FAO: Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALVARES, C.A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728. 2013.
- BAETHGEN, W.E.; BERTERRETICHE, M.; GIMENEZ, A. Informing decisions and policy: The National Agricultural Information System of Uruguay. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 24, n. 1, p. 97-112, 2016.
- BERGAMASCHI, H., BERGONCI, J. I. **As plantas e o clima: princípios e aplicações.** Guaíba: Agrolivros, 2017. 352 p.
- BERLATO, M. A.; CORDEIRO, A. P. A. Sinais de mudanças climáticas globais e regionais, projeções para o século XXI e as tendências observadas no Rio Grande do Sul: uma revisão. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 25, n. 2, p. 273-302, 2017.
- CARAMORI, P. H. *et al.* Agrometeorologia operacional no estado do Paraná. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 24, n. 1, p. 65-70, 2016.
- CARLSON, T. N.; GILLIES, R. R.; PERRY, E. M. A. Method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. **Remote Sensing Reviews**, New York, v. 9, p. 161-173. 1994.
- CARLSON, T. N. An overview of the "Triangle Method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery. **Sensors**, Basel, v. 7, p. 1612-1629. 2007.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Safra 2015/2016: oitavo levantamento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**, Brasília, v. 3, n. 8, p. 1-178, maio 2016. Monitoramento agrícola. Projeto Observatório Agrícola.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Safra 2015/2016: décimo segundo levantamento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**, Brasília, v. 3, n. 12, p. 1-182, set. 2016. Monitoramento agrícola. Projeto Observatório Agrícola.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Safra 2016/2017: quinto levantamento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**, Brasília, v. 4, n. 5, p. 1-166, fev. 2017. Monitoramento agrícola. Projeto Observatório Agrícola.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Safra 2017/2018: décimo segundo levantamento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**, Brasília, v. 5, n. 12, p. 1-148, set. 2018. Monitoramento agrícola. Projeto Observatório Agrícola.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Safra 2018/2019: décimo segundo levantamento. **Acompanhamento da safra brasileira:** grãos, Brasília, v. 6, n. 12, p. 1-126, set. 2019. Monitoramento agrícola. Projeto Observatório Agrícola.

CUNHA, G.R. *et al.* Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p. 446-459. 2001.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Tecnologias de produção de soja:** Região Central do Brasil 2014. Londrina, PR: Embrapa Soja, 2013. 266 p. (Sistemas de Produção, 16).

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Qualidade de sementes e grãos comerciais de soja no Brasil:** safra 2014/15. Londrina: Embrapa Soja, 2016. 192 p. (Documentos, 378).

FEIX, R. D.; LEUSIN JÚNIOR, S. **Painel do agronegócio no Rio Grande do Sul-** 2019. Porto Alegre: SEPLAG, Departamento de Economia e Estatística, 2019.

FRAISSE, C. *et al.* AgroClimate: Tools for managing climate risk agriculture. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 24, n. 1, p. 121-129, 2016.

GAO, Z.; GAO, W.; CHANG, N. Integrating temperature vegetation dryness index (TVDI) and regional water stress index (RWSI) for drought assessment with the aid of LANDSAT TM/ETM+ images. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Washington, DC, v. 13, p. 495-503, 2011.

GARCIA, M. *et al.* 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.

GUASSELLI, L. A. *et al.* Macrozoneamento do estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre, v. 33, n. 1, p. 3-11, 2006.

HOLZMAN, M. E.; RIVAS, R.; 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**, Washington, DC, v. 28, p. 181-192. 2014.

IBGE- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção agrícola municipal.** Rio de Janeiro, [2021]. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso em: mar. 2021.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente:** uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009. 598 p.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C. *et al.* Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, New York, v. 11, n. 10, p. 1840-1843, 2014.

- LIANG, L. *et al.* 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.
- LONG, D., SINGH, V. P. A Two-source trapezoid model for evapotranspiration 329 (TTME) from satellite imagery. **Remote Sensing**, Basel, v. 121, p. 370-388, 2012.
- LEIVAS, J. F.; BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. Risco de deficiência hídrica decendial na metade sul do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campinas, v. 10, p. 397-407, 2006.
- MALLICK, K.; BHATTACHARYA, B. K.; PATEL, N. K. Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 149, p. 1327–1342. 2009.
- MASSIGNAM, A. M. *et al.* A agrometeorologia operacional em Santa Catarina. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 24, n. 1, p. 55-63, 2016.
- MATZENAUER, R.; MALUF, J. R. T.; RADIN, B. **Regime de chuvas e produção de grãos no Rio Grande do Sul: impacto das estiagens e relação com o fenômeno El Niño Oscilação Sul**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2020. 133 p. il. Color. E-book.
- MENGUE, V. P. *et al.* Índice TVDI para mapeamento das culturas de arroz irrigado e soja em áreas agrícolas de Pelotas e Camaquã/RS. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 17., 2015, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: [s. n.], 2015. □p. 1899-1906.
- MOREIRA, A. *et al.* Avaliação de fisionomias campestres no Rio Grande do Sul com uso do índice de umidade TVDI. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 17., 2015, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: [s. n.], 2015. □p. 2782-2789.
- MOURA, A. D.; FORTES, L. T. G. The Brazilian National Institute of Meteorology (INMET) and its contributions to agrometeorology. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 24, n. 1, p. 15-27, 2016.
- NICLÒS, R. *et al.* Determination of sea surface temperature at large observation angles using an angular and emissivity-dependent split-window equation. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 111, p. 107-12, 2007.
- 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, p. 940-948, 1990.
- RIO GRANDE DO SUL. **ATLAS climático: Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura Pecuária e Agronegócio; Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO), [2011]. Disponível em: <<http://www.r3pb.com.br/AtlasCemetRS/>> Acesso em: 18 mar. 2018.
- RADIN, B.; MATZENAUER, R. Uso das informações meteorológicas na agricultura do Rio Grande do Sul. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 24, n. 1, p. 41-54, 2016.

- RAVELO, A. C. *et al.* Drought monitoring and assessment system for Argentina. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 24, n. 1, p. 113-120, 2016.
- ROMANI, L. A. S. *et al.* Sistema de monitoramento agrometeorológico - Agritempo: inovação em rede apoiando políticas públicas e a tomada de decisão agrícola. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 24, n. 1, p. 29-40, 2016.
- RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. O. **Sensor Modis e suas aplicações ambientais no Brasil**. São Paulo: Parêntese, 2007. 423 p.
- SANDHOLT, I.; RASMUSEN, K.; ANDERSEN, J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 79, p. 213-224. 2002.
- SANTOS, J. S. *et al.* Identificação da dinâmica espaço-temporal para estimar área cultivada de soja a partir de imagens MODIS no Rio Grande do Sul, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campinas, v. 18, p. 54-63. 2014.
- SCHIRMBECK, J., RIVAS, R. Estimación de la radiación neta a nivel del suelo a partir de datos captados por el sensor ETM+. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: [s. n.], 2007. p. 6159-6165.
- SCHIRMBECK, L. W.; SCHIRMBECK, J., FONTANA, D. C. Produtos MODIS para identificação de áreas em estresse hídrico na cultura da soja. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: [s. n.], 2015. p. 2830-2836.
- SCHIRMBECK, L. W.; FONTANA, D. C.; SCHIRMBECK, J. TVDI spatiotemporal pattern of a soybean growing area in humid subtropical climate. **Bragantia**, Campinas, v. 76, p. 447- 455, 2017a.
- SCHIRMBECK, L. W. *et al.* Understanding TVDI as an index that expresses soil moisture. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, Recife, v. 7, n. 2, p. 82-90, 2017b.
- SCHIRMBECK, L. W. *et al.* Uso do índice TVDI e modelo HAND para caracterização de condição hídrica. **Irriga**, Botucatu, v. 1, p. 76-84, 2017c.
- SCHIRMBECK, L. W.; FONTANA, D. C.; SCHIRMBECK, J. Two approaches to calculate the TVDI in the humid subtropical climate of southern Brazil. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 75, n. 2, p. 111-120. 2018.
- SCHIRMBECK, L. W. *et al.* TVDI Obtido de Imagens OLI/TIRS e MODIS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 34, p. 573-583, 2019a.
- SCHIRMBECK, L. W. *et al.* Condições hídricas de lavoura de soja usando sensoriamento remoto terrestre. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 27, p. 173-181, 2019b.
- SCHIRMBECK, L.W.; FONTANA, D. C.; SCHIRMBECK, J. Sensibilidade de resposta do TVDI ao índice de vegetação. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE



SENSORIAMENTO REMOTO, 19.; 2019, Santos. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2019c.

SENTELHAS, P. C. *et al.* The soybean yield gap in Brazil: magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, Tirana, Albania v. 153, p. 1-18. 2015.

SIVAKUMAR, M. V. K. Agrometeorological Strategies for Reducing Impacts of Natural Disasters in Agriculture. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 24, n. 1, p. 1-13, 2016.

SOBRINO, J.; JIMENEZ MUÑOZ, J. C.; PAOLINI, L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 90, p. 434-440. 2002.

TSUKAHARA, R. Y. *et al.* Pesquisa e divulgação técnica de informações agrometeorológicas aos associados das Cooperativas ABC. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 24, n. 1, p. 71-85, 2016.

UNIYAL, B. *et al.* Evaluation of SWAT simulated soil moisture at catchment scale by field measurements and Landsat derived indices. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 193, p. 55-70, 2017.

USGS- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. [**Banco de Imagens de Satélite**], Sioux Falls, SD, 2017a. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov>. Acesso em: 20 set. 2017.

USGS- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. [**Banco de Imagens de Satélite**], Sioux Falls, SD, 2017b. Disponível em: [https:// https://espa.cr.usgs.gov](https://espa.cr.usgs.gov). Acesso em: 25 abr. 2017.

WREGGE, M.S. *et al.* (ed.). **Atlas climático da região Sul do Brasil**: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2011. 336 p.

YANG, Y. *et al.* Estimation of surface soil moisture from thermal infrared remote sensing using an improved trapezoid method. **Remote Sensing**, Basel, v. 7, p. 8250-8270, 2015.

YU, X.; GUO, X.; WU, Z. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS - comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. **Remote Sensing**, Basel, v. 6, p. 9829-9852, 2014.

ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; GRASSINI, P. Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, Madison, v. 108, p. 1447-1454, 2016.

## **7 RESULTADOS**

### **7.1 Artigo 1: TVDI Obtido de Imagens OLI/TIRS e MODIS**

Artigo

## TVDI Obtido de Imagens OLI/TIRS e MODIS

Lucimara Wolfarth Schirmbeck<sup>1</sup> , Denise Cybis Fontana<sup>2</sup> , Juliano Schirmbeck<sup>1</sup> ,  
Carolina Bremm<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>2</sup>Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>3</sup>Departamento de Diagnóstico e Pesquisa Agropecuária, Secretaria da Agricultura, Pecuária e Irrigação, Porto Alegre, RS, Brasil.

Recebido em: 25 de Julho de 2018 - Aceito em: 18 de Dezembro de 2018

## Resumo

O objetivo do estudo foi analisar a variabilidade no TVDI (*Temperature-Vegetation Dryness Index*) obtido de sensores orbitais com resoluções distintas, em região agrícola no sul do Brasil. Utilizou-se três imagens OLI/TIRS (*Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor*) do satélite Landsat 8, e 12 imagens MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) do satélite Terra. Dados coletados em campo serviram como base para classificação de imagem OLI/TIRS e mapeamento de áreas de arroz, soja, campos naturais, mata ciliar e solo exposto. O TVDI foi obtido por duas parametrizações em períodos distintos, utilizando as dispersões entre Temperatura de Superfície ( $T_S$ ) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). O TVDI obtido para ambos sensores apresentou padrão similar possibilitando diferenciar os alvos. Na média de todas as datas e classes, o TVDI obtido das imagens MODIS foi superior em 0,128 unidades ao TVDI obtido com o OLI/TIRS. Quando utilizado OLI/TIRS há um melhor detalhamento espacial das condições hídricas, mas com menor repetição ao longo da safra; já utilizando o TVDI-MODIS é possível monitorar as condições hídricas em escala regional, com menor detalhamento espacial, mas com maior repetitividade no tempo. O TVDI estimado pelos sensores OLI/TIRS e MODIS, pode ser utilizado de forma conjunta, trazendo informações complementares.

**Palavras-chave:** temperatura de superfície, NDVI, agricultura, déficit hídrico.

## TVDI from OLI/TIRS and MODIS images

## Abstract

The aim of the study was to analyze the variability in the TVDI (*Temperature-Vegetation Dryness Index*) obtained from orbital sensors with distinct resolution in an agricultural region in southern Brazil. Three images of the Landsat 8 satellite OLI/TIRS (*Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor*) and 12 of Terra's MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), were used. Data collected in the field served as a basis for OLI/TIRS image classification and mapping of rice, soybean, grasslands, gallery forest and bare soil areas. The TVDI obtained by two parameterizations at different periods was evaluated, using the dispersions between Surface Temperature ( $T_S$ ) and NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). The TVDI obtained for both sensors presented a similar pattern allowing differentiation of the targets. The average of all dates and classes, TVDI obtained from MODIS was 0.128 units higher than the obtained with the OLI/TIRS. When used OLI/TIRS there is a better detail in the representation of the moisture, but with less repetition throughout the crop cycle. Using TVDI-MODIS, it is possible to monitor moisture conditions on a regional scale, with less spatial detail, but in a continuous way over time. The TVDI estimated by the OLI/TIRS and MODIS can be used together, providing complementary information.

**Keywords:** Surface temperature, NDVI, agriculture, water deficit.

## 1. Introdução

O déficit hídrico é um fenômeno que influencia tanto questões econômicas quanto ambientais, estando no Rio Grande do Sul (RS) associado a grandes perdas na produção agrícola (EMATER/RS, 2018). Os déficits no RS ocorrem especialmente no período de primavera-verão, visto que grande parte da agricultura é conduzida sem irrigação. Neste período de alta demanda evaporativa da atmosfera, seguidamente a oferta de precipitação pluvial não é suficiente para atender às necessidades hídricas das plantas. Agregam-se a isto, à alta variabilidade da precipitação pluvial entre uma safra e outra, a qual, em parte, está associada a eventos de grande escala como El Niño Oscilação Sul (ENOS). Geralmente no Rio Grande do Sul, anos de baixa e alta precipitação pluvial na primavera-verão estão associados a eventos de La Niña e a de El Niño, respectivamente (Berlato e Cordeiro, 2017).

Apesar da relevância do tema, é escassa a disponibilidade de indicadores que permitam obter informações sobre a umidade da superfície de grandes áreas de produção, com adequado nível de detalhamento espacial e com a frequência de cobertura temporal compatível com o ciclo de crescimento e desenvolvimento das plantas. As imagens de satélite podem suprir parte da lacuna na obtenção de indicadores para o gerenciamento racional do uso da água. Um exemplo, é a estimativa da umidade da superfície (Chen *et al.* 2015; Sayago *et al.* 2017), a qual pode ser obtida de forma indireta através de um índice, o TVDI (*Temperature-Vegetation Dryness Index*) (Sandholt *et al.* 2002).

Neste índice, são usados de forma conjugada, dados de temperatura de superfície ( $T_S$ ) e de índice de vegetação (IV), ambos em um espaço bidimensional, fornecendo dados que permitem avaliar a variabilidade da umidade do solo, e com repetições frequentes ao longo do tempo. O TVDI tem sido aplicado com sucesso em várias regiões e para diferentes tipos de imagens de satélite e tempo de aquisição (Sandholt *et al.* 2002; Wang *et al.* 2004; Mallick *et al.* 2009; Holzman *et al.* 2014; Chen *et al.* 2015; Uniyal *et al.* 2017; Sayago *et al.* 2017; Schirmbeck *et al.* 2018).

No TVDI, a  $T_S$  indica o estado hídrico das plantas, visto que, se a planta não consegue atender a demanda evaporativa da atmosfera a  $T_S$  é maior do que a temperatura do ar. O IV indica a condição e variabilidade da biomassa verde. A inclinação negativa da reta da dispersão que ocorre no espaço  $T_S/IV$  está relacionada à taxa de evapotranspiração da superfície, sendo usada, portanto, para parametrizar o modelo que permite avaliar as condições da umidade do solo (Chen *et al.* 2015). Salienta-se, entretanto, que o TVDI possui importante dependência desta parametrização (Schirmbeck *et al.* 2018) e a correta compreensão do significado deste índice depende da forma como o mesmo é obtido. O TVDI é, portanto, um valor relativo às condições de umidade da área em um determi-

nado período. Alterando qualquer destes dois fatores (área e período), altera o valor do índice, o que para estudos multitemporais introduz certa complexidade, que por vezes passa despercebida aos usuários.

O uso de diferentes sensores para a obtenção do TVDI, pode gerar incertezas que decorrem de diferenças nas resoluções espaciais, espectrais e temporais dos mesmos, as quais precisam ser avaliadas e dimensionadas. Considerando os sensores atualmente disponíveis para geração de informações úteis para o setor agrícola, possivelmente sejam o OLI/TIRS (*Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor*) e o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), os mais intensamente utilizados. Isto porque existe certa complementariedade, onde o primeiro permite maior detalhamento espacial e o segundo maior detalhamento temporal, ambos atributos bastante relevantes. Também relevante é mencionar que ambos possuem bandas posicionadas em faixas do espectro que permitem a determinação do TVDI, o que justifica a presente investigação.

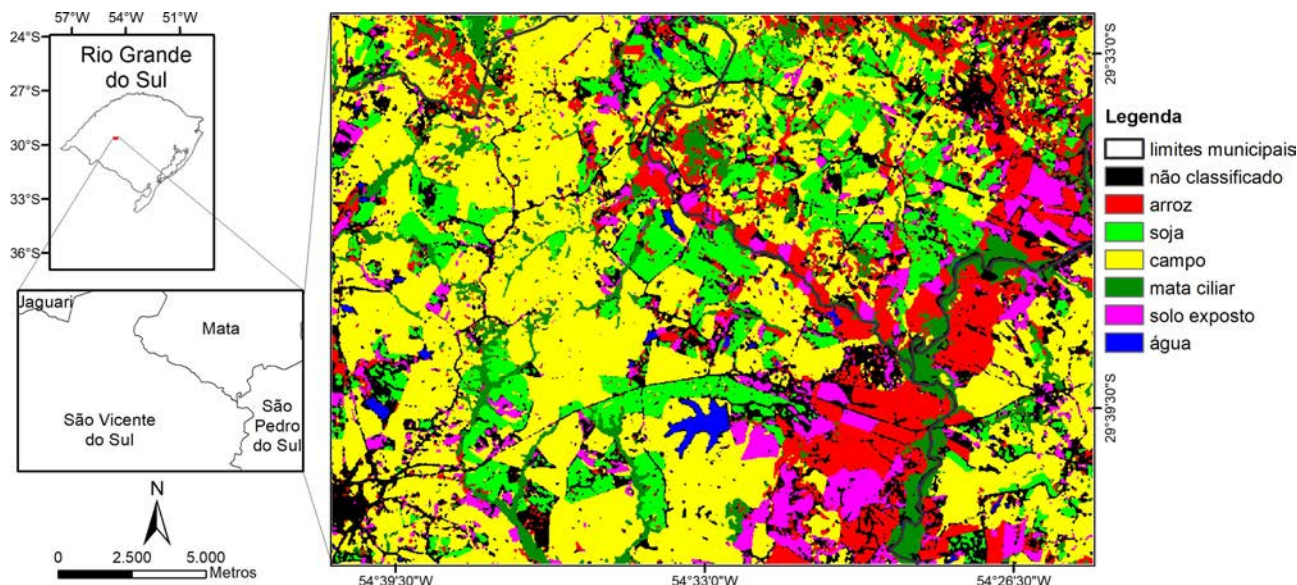
Tendo em vista a dificuldade de dispor de medições da umidade da superfície com adequada representação espacial, o objetivo do presente estudo foi analisar os valores de TVDI obtido pelos sensores OLI/TIRS e MODIS com resoluções espacial, espectral e temporal distintas, assim como, analisar a consistência na sua distribuição espacial em região de produção agrícola localizada no RS.

## 2. Material e Métodos

A área de estudo está localizada no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, na unidade geomorfológica da Depressão Central, em altitudes que variam entre 100 e 300 m e com predominância de atividades agrícolas e campos naturais do Bioma Pampa (Guasselli *et al.* 2006). O clima, segundo Alvares *et al.* (2013), com base na classificação climática de Köppen, é o tipo climático Cfa (clima temperado úmido com verão quente).

Com um total de cerca de 46 mil hectares, a área de estudo se localiza nos municípios de Jaguari, Mata, São Vicente do Sul e São Pedro do Sul (Fig. 1), num total de 270.180 pixels mapeados na imagem OLI/TIRS nas seguintes classes: áreas de arroz (28.996 pixels), campos (186.594 pixels), mata ciliar (10.153 pixels), soja (36.022 pixels) e solo exposto (8.415 pixels). Os dados de localização destas classes foram coletados *in situ* em março de 2015 em um levantamento de campo utilizando receptor GPS de navegação. Estes pontos serviram como pontos de controle para a classificação de toda a imagem.

Foi calculado o balanço hídrico meteorológico utilizando a metodologia proposta por Thornthwaite-Mather (1955) para o período das safras das culturas de primavera-verão de novembro de 2014 a abril de 2015. Para tanto foram utilizados os dados meteorológicos da estação



**Figura 1** - Delimitação da área de estudo no estado do Rio Grande do Sul com localização dos municípios. Classificação de Imagem OLI/TIRS - Landsat 8 de 07 de fevereiro de 2015. Órbita/Ponto: 223/81.

de Santa Maria ( $-29,7^{\circ}$  S e  $-53,7^{\circ}$  W; 95 m de altitude), a mais próxima da área de estudo, onde se obteve dados de déficit hídrico. Para compatibilizar com a escala temporal das imagens MODIS, o déficit hídrico foi acumulado no período de 16 dias, enquanto para OLI/TIRS foram utilizados os dados diários (dia da passagem).

O TVDI, proposto por [Sandholt et al. \(2002\)](#), foi obtido através da relação estabelecida no espaço bidimensional entre a  $T_S$  e o IV Eq. (1). O índice pode variar de zero a 1, sendo que quanto mais próximo de 1 maior a restrição hídrica.

$$TVDI = \frac{(T_S - T_{Smin})}{(a + b IV - T_{Smin})} \quad (1)$$

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  $T_S$ .

As diferenças entre escalas de aquisição tanto espacial e espectral como temporal foram analisadas a partir do uso de imagens dos sensores OLI/TIRS do satélite Landsat 8 e MODIS do satélite Terra.

## 2.1. Sensor OLI/TIRS - Landsat 8

As imagens OLI/TIRS do satélite Landsat 8 foram obtidas através da base de dados do USGS - ESPA (*United States Geological Survey - Center Science Processing Architecture*), numa resolução de 30 m nas bandas do visível e do infravermelho próximo e 100 m nas bandas termiais, da órbita ponto 223/81. Em função de ruídos, nuvens e vapor d’água, foi possível utilizar apenas três imagens ao

longo da safra de primavera-verão, abrangendo o período de implantação das culturas anuais (5 dez 2014), início do desenvolvimento vegetativo (6 jan 2015) e maior presença de biomassa verde (7 fev 2015) dos cultivos de soja e arroz no período.

Para o cálculo do TVDI-OLI/TIRS, dada a maior resolução espacial quando comparado ao sensor MODIS, a seleção dos pixels quentes e frios para cálculo do índice se restringiu à área de estudo.

A  $T_S$  foi estimada a partir das bandas 10 e 11 (100 m) usando o algoritmo *split-window* (Eq. (2)) proposto por [Jiménez-Muñoz et al. \(2014\)](#) e testado no Rio Grande do Sul por [Schirmbeck et al. 2017](#)). Este modelo proporciona melhor desempenho no processo de correção atmosférica, visto que as diferenças na constituição da atmosfera estão dentre as principais responsáveis pelas diferenças de temperatura obtidas com as 2 bandas termiais usadas no algoritmo ([Nicolòs et al. 2007](#)).

$$T_S = T_{10} + 1,378(T_{10} - T_{11}) + 0,183(T_{10} - T_{11})^2 - 0,268 + (54,3 - 2,238)(1 - \epsilon) + (-129,2 + 16,4\omega)\Delta\epsilon \quad (2)$$

sendo  $T_{10}$  e  $T_{11}$  as temperaturas (K) nas bandas 10 e 11 do termal;  $w$  o conteúdo de vapor de água na atmosfera ( $\text{g cm}^{-2}$ );  $\epsilon$  a emissividade média das bandas do termal ( $\epsilon = 0,5 (\epsilon_{10} + \epsilon_{11})$ );  $\Delta\epsilon$  a diferença da emissividade nas bandas do termal ( $\Delta\epsilon = \epsilon_{10} + \epsilon_{11}$ ).

O índice de vegetação utilizado no cálculo do TVDI-OLI/TIRS foi o NDVI, proposto por [Rouse et al. \(1973\)](#) obtido na base de dados do USGS - ESPA.

## 2.2. Sensor MODIS - Terra

Para o TVDI-MODIS foram utilizadas 12 imagens em forma de produto disponível na base de dados LP DAAC (*Land Processes database - Distributed Active Archive Center*), com resolução espacial de 1 km. O índice de vegetação NDVI foi obtido do produto MOD13A2, na forma de composição de máximo valor em 16 dias. O período de estudo abrangeu a safra das culturas de soja e arroz cultivadas no período de primavera-verão, de novembro de 2014 a maio de 2015.

Para a  $T_S$  foi utilizado o produto MOD11A2, o qual é disponibilizado para períodos compostos de 8 dias. Quando comparado com o NDVI, que é disponibilizado em 16 dias, a composição da  $T_S$  corresponde aos primeiros 8 dias (MOD13A2). Este produto de  $T_S$  é obtido a partir de imagens nos períodos do dia e da noite, com ausência de nuvens, e geradas pelo algoritmo *split-window*. Foi utilizado o produto de  $T_S$  visto a dificuldade de encontrar imagens de uma única data sem ruídos.

No caso das imagens MODIS, em função da moderada resolução espacial quando comparado ao OLI/TIRS, se adotou uma área mais ampla, abrangendo todo o Rio Grande do Sul, como área útil à seleção dos pixels quentes e frios para a parametrização e cálculo do índice.

## 2.3. Parametrizações índice TVDI

Para a parametrização foram construídos gráficos de dispersão entre a  $T_S$  e NDVI para ambos sensores, OLI/TIRS e MODIS (triângulos evaporativos característicos). No caso do TVDI-MODIS, foram utilizados dois períodos na parametrização:

- i. dezembro/janeiro/fevereiro - para compreensão das diferenças entre os sensores;
- ii. novembro a maio - para compreensão das mudanças de umidade ao longo da safra.

Utilizando a parametrização i) foi analisado o padrão de variabilidade espacial na área de estudo entre o TVDI-OLI/TIRS e TVDI-MODIS. Também, as classes temáticas de soja, campos naturais, arroz, solo exposto e mata ciliar com áreas superiores a 100 ha foram vetorizadas sobre as imagens de TVDI-OLI/TIRS e TVDI-MODIS e extraídos os valores médios do índice. Foram, por fim, testadas as diferenças entre as médias para verificar a existência de diferenças significativas entre os sensores, classes e datas das imagens. Para o teste foi considerando um modelo para experimento com parcelas subdivididas, sendo o sensor a parcela principal, a classe a subparcela e a data de avaliação a subsubparcela. Quando detectadas diferenças entre os fatores em nível de 5% de significância ( $p < 0,05$ ), as médias foram comparadas pelo teste Tukey. Foi utilizado o programa estatístico JMP (v.13).

Já a parametrização ii) foi utilizada no sensor MODIS para obtenção dos perfis temporais médios do

índice ao longo de toda a safra para as classes de soja, arroz e campos.

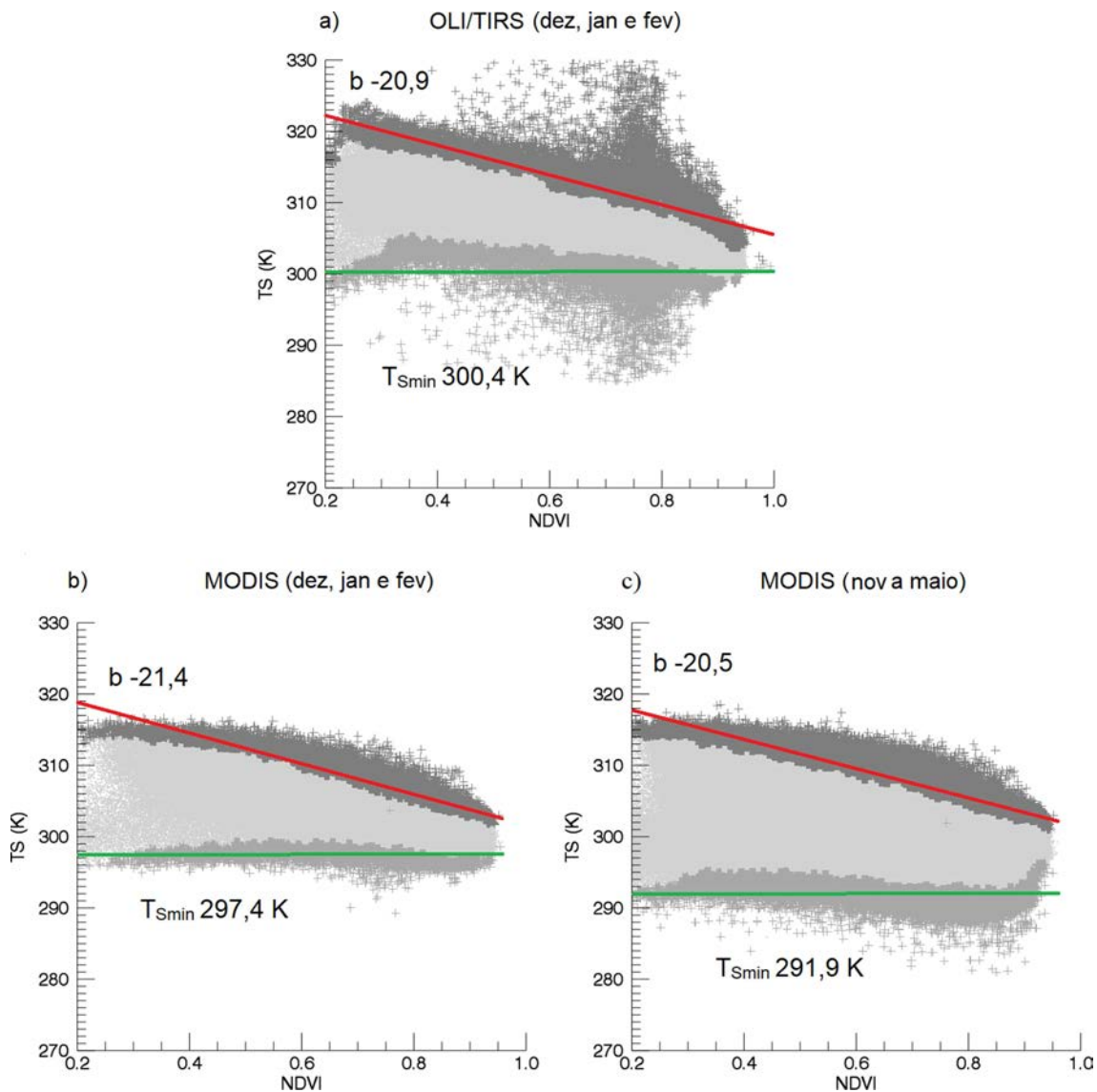
## 3. Resultados e Discussão

### 3.1. Comparação entre período de parametrizações

A Fig. 2 apresenta os triângulos evaporativos obtidos nas parametrizações para os dois sensores e períodos utilizados. Nestes, a temperatura mínima de superfície ( $T_{Smin}$ ) define o limite úmido e quanto mais o pixel estiver próximo a este limite, mais úmida está a superfície (Carlson *et al.* 1994; Sandholt *et al.* 2002, Zhang *et al.* 2014). O parâmetro 'b' representa a inclinação negativa da reta obtida da dispersão de  $T_S$ /NDVI, a qual define o limite seco e está associado à resistência dos estômatos da folha e da evapotranspiração (Nemani e Running 1989, Chen *et al.* 2015); quanto mais próximo deste limite o pixel estiver, mais seca é a condição da superfície (Sandholt *et al.* 2002; Mallick *et al.* 2009, Chen *et al.* 2015). Verifica-se que existe similaridade para as dispersões no triângulo evaporativo quando considerado o mesmo período da parametrização (dezembro-janeiro-fevereiro) para OLI/TIRS e MODIS. A diferença mais evidente entre sensores foi que o triângulo evaporativo OLI/TIRS se localizou em uma escala de  $T_S$  com valores um pouco superiores aos observados para o MODIS.

Os valores médios da  $T_{Smin}$  (Figs. 2a e 2b) foram, respectivamente 300,4 K e 297,4 K, para OLI/TIRS e MODIS. Para o limite seco, a inclinação negativa foi maior para o MODIS, de -21,4, o que indica uma maior variabilidade nas condições de umidade, quando comparado ao OLI/TIRS, que foi de -20,9.  $T_{Smin}$  menores e maior inclinação da reta observados nas imagens MODIS possivelmente decorreram da maior área utilizada na parametrização do TVDI, visto que neste caso foi usado todo o território do RS. Dada a resolução espacial do MODIS, a área de estudo é muito restrita para gerar a variabilidade necessária a parametrização do índice, além do que o maior interesse na utilização de imagens MODIS é implementar análises com abrangência regional. Por outro lado, as temperaturas observadas no limite seco superiores no OLI/TIRS em relação ao MODIS possivelmente sejam decorrência de uma menor mistura espectral dentro do pixel. Devido as imagens serem do período de verão, as diferenças entre sensores foram mais evidentes sobre o limite seco ( $T_S$  máximas) do que o úmido ( $T_S$  mínimas).

Foi, entretanto, na comparação entre períodos de parametrização feitas para MODIS, dezembro-janeiro-fevereiro (Fig. 2b) e novembro a maio (Fig. 2c), que se observou maior diferença no formato dos triângulos evaporativos. Observa-se uma maior amplitude de variação nas  $T_S$ , dada especialmente pela menor  $T_{Smin}$  (291,9 K), que é coerente com o período mais prolongado utilizado nesta parametrização do MODIS. Como o TVDI é um



**Figura 2** - Dispersão bidimensional entre a temperatura de superfície ( $T_s$ ) e o índice de vegetação (NDVI) para OLI/TIRS (a) e MODIS (b) no período de dezembro/janeiro/fevereiro, e MODIS novembro a maio (c).  $T_{Smin}$  em verde é o limite úmido; inclinação negativa 'b' em vermelho é o limite seco.

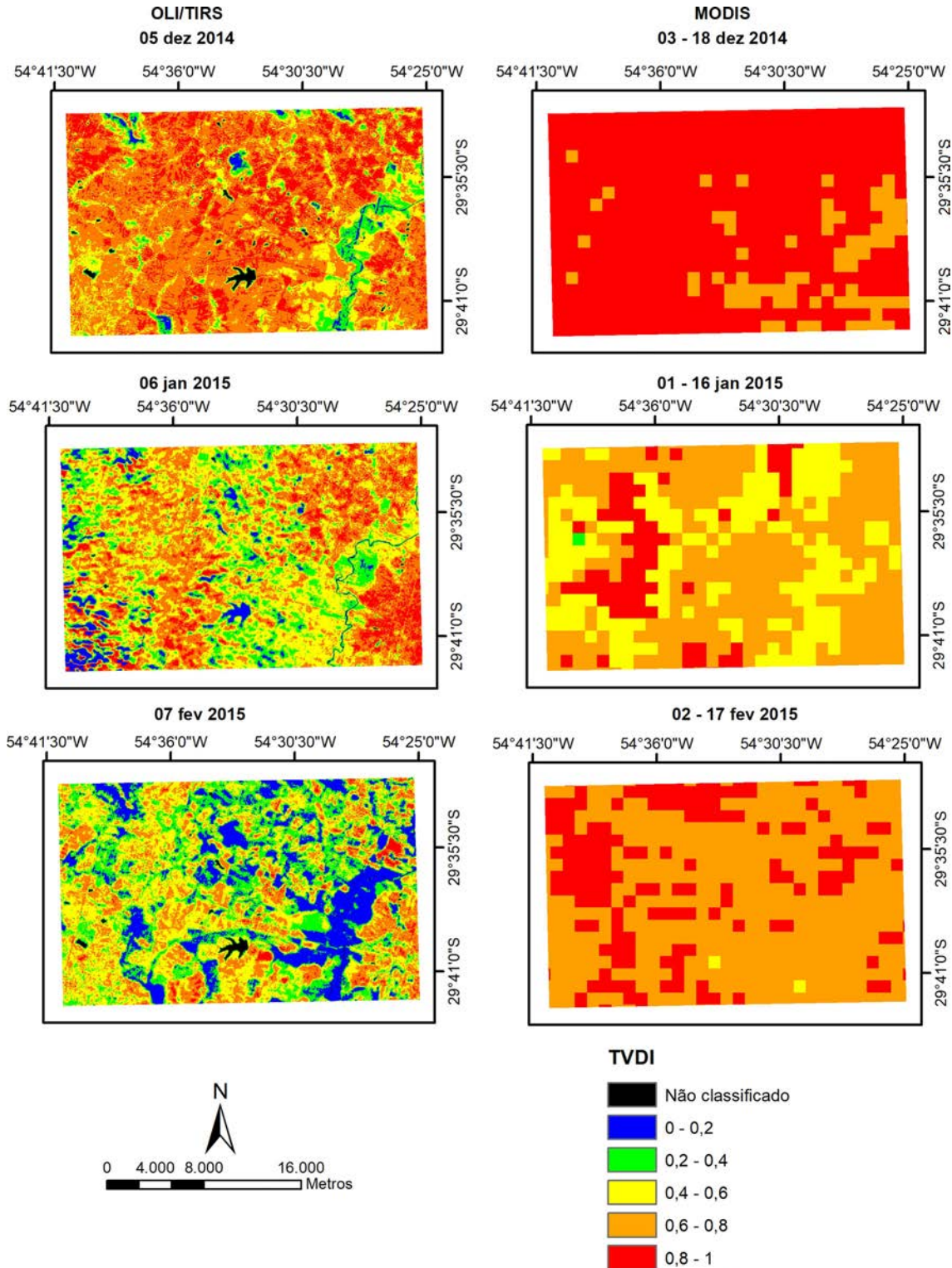
índice cujos valores são relativos aos limites secos e úmidos definidos na parametrização, ressalta-se a importância da definição do período a ser utilizado, o que já foi avaliado em estudos anteriores (Schirmbeck *et al.* 2018).

Neste trabalho, quando as comparações foram entre sensores, utilizou-se sempre o período coincidente na parametrização (dezembro, janeiro, fevereiro). Quando o objetivo foi analisar a dinâmica temporal, foi então utilizada a parametrização abrangendo toda a safra. Na parametrização de novembro-maio estão representadas as condições de hídricas ocorridas em toda a safra (12 imagens) tornando possível, além da caracterização da condição em cada data, também a comparação entre datas. Nesta análise se dá detalhe aos extremos que ocorreram no período, possibilitando um melhor entendimento da disponibilidade hídrica ao longo do ciclo. Como comentado

anteriormente, o TVDI é um índice relativo aos limites seco e úmido obtidos na parametrização. Portanto, sempre ocorrerão diferenças quando a parametrização é feita em períodos distintos. Apesar disso, o coeficiente de correlação entre o TVDI obtido nas parametrizações MODIS dezembro, janeiro e fevereiro e MODIS novembro a maio foi de 0,86, evidenciando certa similaridade.

### 3.2. Parametrização dezembro-janeiro-fevereiro - OLI/TIRS e MODIS

A variabilidade do TVDI na área de estudo pode ser observada na Fig. 3 para as imagens de dezembro, janeiro e fevereiro OLI/TIRS e MODIS. Apesar das diferenças entre os sensores, verifica-se que o TVDI-MODIS sempre foi superior ao TVDI-OLI/TIRS. É possível observar tam-



**Figura 3** - Mapas da distribuição espacial do TVDI obtido a partir de dados OLI/TIRS e MODIS nos meses de dezembro de 2014, janeiro e fevereiro de 2015 na área de estudo.

bém um padrão espacial até certo ponto similar entre as imagens, coincidindo em cada data as regiões com maior e menor índice na região de estudo. Em geral, os valores

mais baixos do TVDI (azul-verde) ocorrem nas áreas próximas às matas ciliares e áreas ocupadas pelas lavouras de arroz (Fig. 1), enquanto que nas áreas de campos natu-



rais e de soja, os valores foram mais altos, indicando restrição de umidade (laranja-vermelho).

A maior resolução espacial na imagem TVDI-OLI/TIRS determinou uma menor mistura espectral de alvos dentro do pixel e maior diferenciação entre pixels adjacentes nas imagens. Também, variações no índice possivelmente estiveram associadas às diferenças de resolução temporal, já que as imagens TVDI-OLI/TIRS são obtidas em um único dia, enquanto que as imagens TVDI-MODIS são obtidas a partir de produtos compostos de 16 dias, atenuando as diferenças.

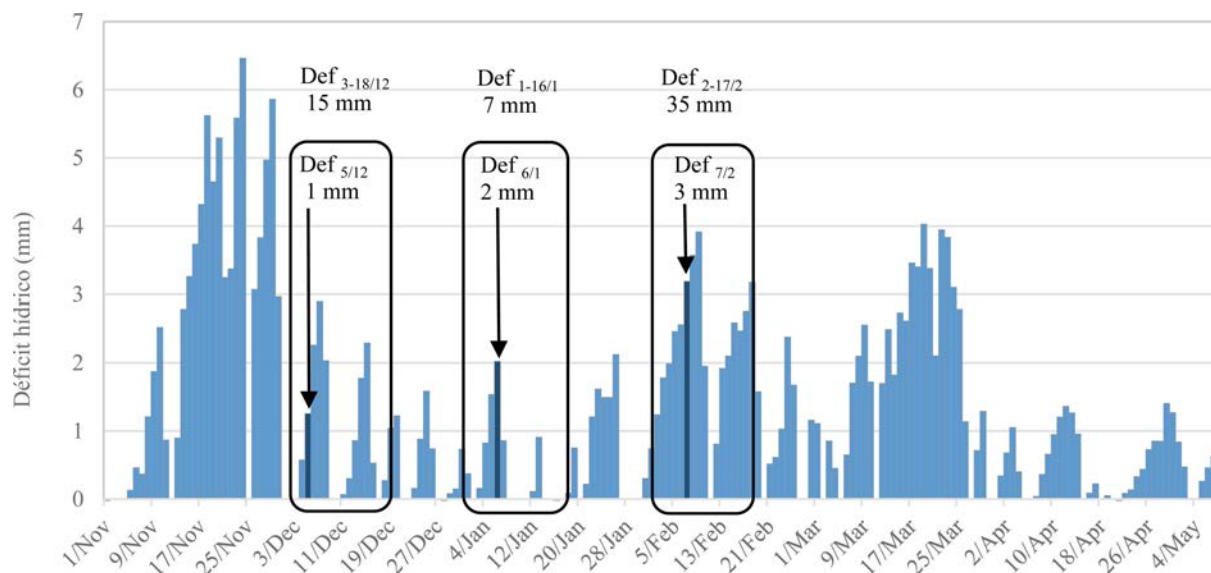
Os valores observados para o índice TVDI mostraram coerência com a dinâmica da cobertura vegetal, assim como da condição hídrica da região. Analisando o déficit hídrico ocorrido na estação meteorológica mais próxima (Fig. 4), verifica-se que em dezembro, no período de 3 a 18/12 (período de composição dos produtos MODIS), o déficit acumulado foi de 15 mm, intermediário quando comparado as demais datas das imagens analisadas. Apesar disso, nesta data foi quando se observou os maiores TVDI nos dois sensores. Essa aparente incoerência decorre da dinâmica da cobertura vegetal na área em estudo. Este é o período de implantação das culturas de primavera-verão, quando a maior presença de solo exposto (menor biomassa) coincide com o período de maior incidência de radiação solar (solstício de verão), determinando os altos valores da  $T_S$ , o que justifica os valores mais elevados de TVDI. Também, é importante considerar que o período anterior a este foi de acentuado déficit hídrico, o que pode ter comprometido o crescimento de biomassa.

Em contrapartida, janeiro foi o período que apresentou os menores déficits (7 mm no período de 1 a 16/01) entre as datas analisadas e, coerentemente, foram observa-

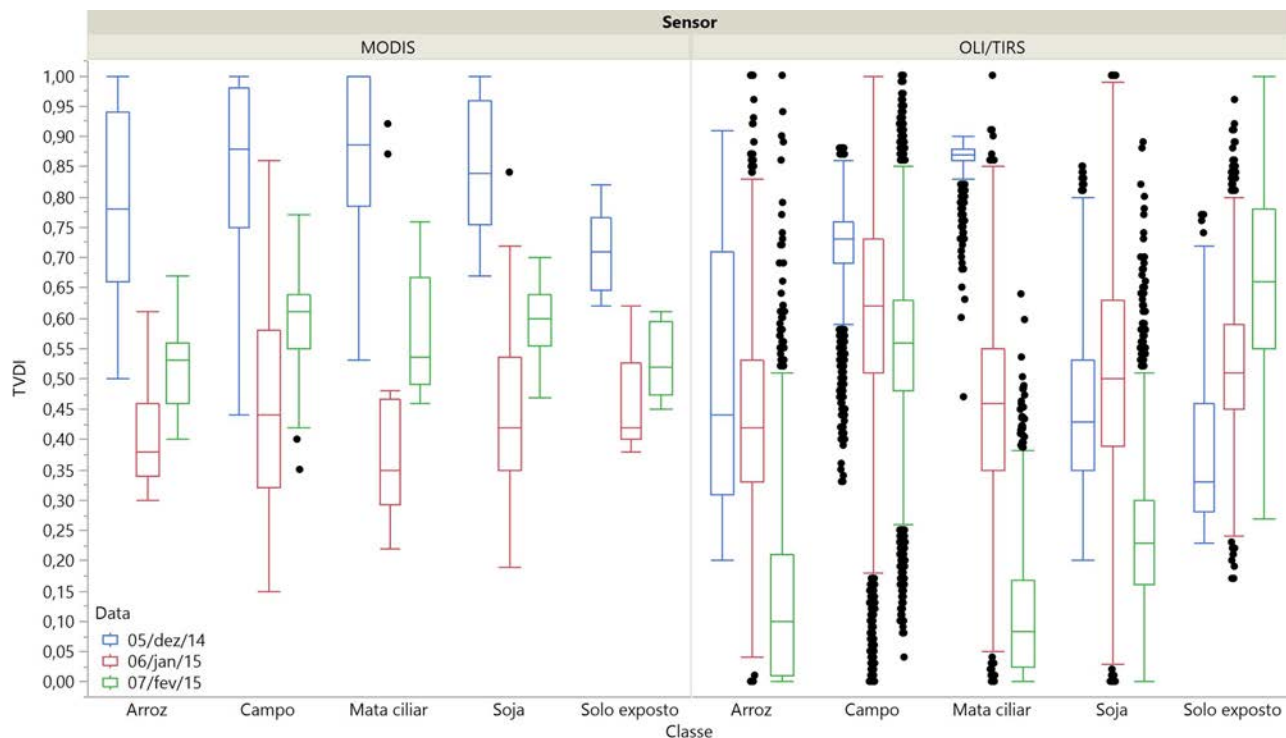
das reduções nos valores de TVDI mais claramente observado nas imagens MODIS.

O déficit hídrico em fevereiro teve acréscimo (Fig. 4), num período caracterizado por maior presença de biomassa verde para as culturas de primavera-verão, com alta densidade de biomassa verde. Este foi o período em que se observou a maior diferença entre os dois sensores, o que pode ser em parte atribuído à diferença de resolução temporal das imagens. A imagem composta de 16 dias MODIS (de 2 a 17/02) retratou o déficit acumulado no período que foi de 35 mm. Já a imagem OLI/TIRS foi adquirida no dia 7/02 ainda no início do período de déficit, logo após ao déficit zero do final de janeiro, estando, portanto, retratando condições hídricas mais favoráveis do que as representadas nas imagens TVDI-MODIS.

Também usando a parametrização no período dezembro-janeiro-fevereiro foram comparados os valores do TVDI OLI/TIRS e MODIS separadamente para as classes arroz, soja, campos naturais, mata ciliar e solo exposto nas três datas (Fig. 5). Coerente com o observado na Fig. 3, observa-se que a maior parte dos pixels das imagens MODIS em todas as classes apresentaram valores de TVDI maiores associados à imagem de dezembro, menores valores em janeiro e valores intermediários em fevereiro. Já para o sensor OLI/TIRS ocorreu uma maior dispersão dos valores observados do índice para todas as classes e datas, o que está associado ao número muito elevado de pixels utilizados na análise, e à menor mistura espectral em função do tamanho do pixel. Soma-se a isto as possíveis diferenças decorrentes da variabilidade dentro das classes, associadas a datas de semeadura, práticas de manejo, posição no terreno, entre outros. Evidencia-se mais uma vez que com o sensor OLI/TIRS os menores



**Figura 4** - Dados de déficit hídrico diário para Santa Maria no período de novembro a maio, safra 2014-2015. Os retângulos indicam o período de 16 dias utilizados na composição MODIS e a seta indica o dia da passagem OLI/TIRS, com os respectivos déficits.



**Figura 5** - Distribuição da dispersão dos dados de TVDI das classes de arroz, campo, mata ciliar, soja e solo exposto, para as datas de 5 de dezembro de 2014, 6 de janeiro de 2015 e 7 de fevereiro de 2015 para os sensores MODIS e OLI/TIRS na área de estudo.

TVDI ocorreram em fevereiro e não em janeiro conforme se observou nas imagens MODIS (box verdes e vermelhos, respectivamente na Fig. 5). Apenas para solo exposto se verifica os maiores TVDIs em fevereiro.

A análise estatística aplicada aos dados TVDI mostrou que houve efeito altamente significativo da interação tripla, evidenciando padrões de respostas distintas entre sensores, classes e datas. Na comparação entre as médias (Tabela 1), se verificou que para o sensor MODIS não houve efeito da interação classes\*datas ( $p > 0,05$ ), mas teve efeito significativo tanto para classes, como também para datas. Como seria esperado para um sensor com resolução espacial moderada (1 km), existe limites para que com uma única imagem se diferencie classes, porém é

possível caracterizar e diferenciar grandes padrões de umidade da superfície, assim como detectar as diferenças que ocorrem ao longo do tempo. Os valores de TVDI de dezembro foram maiores do que o de fevereiro e o de janeiro. As classes campos naturais e soja apresentaram índices superiores ao observado na classe arroz e solo exposto.

Por outro lado, para o sensor OLI/TIRS houve efeito significativo para a interação classes\*datas, ( $p < 0,05$ ). OLI/TIRS, com resolução de 30 m, possibilitou monitorar de forma mais detalhada os padrões de cada classe, inclusive diferenciando as mesmas dentro de uma mesma imagem. Analisando cada uma das datas em separado se observou que para 5 de dezembro de 2014 todas as classes foram dis-

**Tabela 1** - Valores médios de TVDI para os sensores, as classes e as datas das imagens analisadas. Período de dezembro/janeiro/fevereiro na área de estudo.

Classe	OLI/TIRS				MODIS			
	05/dez/14	06/jan/15	07/fev/15	Média ± DP	05/dez/14	06/jan/15	07/fev/15	Média ± DP
Arroz	0,50Ca	0,43Db	0,13Dc	0,35 ± 0,17	0,78	0,4	0,52	0,57 ± 0,10B
Campo	0,72Ba	0,61Ab	0,55Bc	0,63 ± 0,12	0,84	0,47	0,59	0,64 ± 0,14A
Mata ciliar	0,86Aa	0,44Db	0,11Ec	0,47 ± 0,12	0,86	0,42	0,57	0,61 ± 0,15AB
Soja	0,45Db	0,50Ca	0,24Cc	0,40 ± 0,14	0,85	0,45	0,6	0,63 ± 0,11A
Solo exposto	0,38Ec	0,52Bb	0,67Aa	0,52 ± 0,14	0,7	0,45	0,53	0,56 ± 0,08B
Média ± DP	0,66 ± 0,09	0,57 ± 0,17	0,45 ± 0,12		0,84 ± 0,13a	0,45 ± 0,17c	0,58 ± 0,07b	

Médias seguidas por distintas letras, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, diferem pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ).

tintas (Tabela 1). As maiores restrições de umidade estiveram associadas às classes de mata ciliar e campos naturais. Nas matas, talvez alguma oscilação de nível da lâmina de água nos córregos possa explicar esta incoerência, mas isto teria que ser investigado.

Em 6 jan 2015 o sensor não conseguiu diferenciar arroz de mata ciliar, com ambas classes apresentando os menores valores de TVDI, o que é coerente com a presença de água nas lavouras de arroz (sob inundação) e pela proximidade da mata ciliar aos cursos d’água. Já os maiores valores do índice estiveram associados às classes de campos naturais, solo exposto e soja (Tabela 1).

Em 7 fev 2015 novamente todas as classes se diferenciaram (Tabela 1). Os menores valores do índice ocorreram na mata ciliar e arroz e os maiores valores no solo exposto e campos naturais.

### 3.3. Parametrização MODIS novembro-maio

Usando a parametrização envolvendo toda a safra de primavera-verão foi possível caracterizar as variações no TVDI ao longo do tempo. O perfil TVDI-MODIS (Fig. 6) dos alvos analisados (arroz, soja, campo naturais, mata ciliar e solo exposto) apresentou um padrão temporal similar. Os valores foram mais altos em dezembro, quando os déficits hídricos (Fig. 4) coincidiram com a época de implantação das culturas, com os menores NDVI (Fig. 7a), maior presença de solo exposto, e maiores  $T_S$  (Fig. 7b). Em fevereiro, no período de maior desenvolvimento vegetativo das culturas de primavera-verão, com maior NDVI (Fig. 7a), a elevação do TVDI expressou a ocorrência de déficit hídrico no solo (Fig. 4), ocasionando o fechamento dos estômatos e a consequente elevação da  $T_S$  (Fig. 7b) (Allen et al. 2006). De março a abril os menores TVDI foram consequência da finalização do ciclo, com baixos

valores de NDVI (Fig. 7a), e das menores  $T_S$  características do início do outono (Fig. 7b). Observou-se ainda no dia 22 de março a ocorrência de uma queda bastante acentuada no TVDI, o que possivelmente tenha sido decorrência de uma queda da temperatura do ar, em torno de 5 °C, observada na estação meteorológica de Santa Maria.

### 4. Conclusões

O índice TVDI pode ser obtido usando imagens dos sensores OLI/TIRS e MODIS, os quais apresentam um padrão similar de distribuição no espaço e ao longo do tempo, mas com magnitudes distintas. Na média de todas as datas e classes, o TVDI obtido das imagens MODIS foi superior em 0,128 unidades ao TVDI obtido com o sensor OLI/TIRS, mas com diferenças acentuadas entre estas. As maiores diferenças foram observadas para a classe soja e na primeira data de análise.

Quando utilizado OLI/TIRS é possível um maior detalhamento espacial das condições hídricas das culturas de primavera-verão, dada as diferenças de resolução espacial, na área de estudo nas imagens OLI/TIRS tem-se mais de 270 kpixels, enquanto que nas imagens MODIS, são apenas 265. Já utilizando o TVDI-MODIS é possível monitorar as condições hídricas em escala regional e com maior detalhamento temporal (dada as diferenças de resolução temporal obteve-se 12 imagens compostas no período estudado, enquanto que nas imagens OLI/TIRS foram apenas três imagens disponíveis sem nebulosidade no período).

Os perfis temporais de TVDI-MODIS, são capazes de descrever ao longo do período de análise a condição hídrica ocorrida nos alvos de interesse, portanto estas imagens podem contribuir em um sistema de monitoramento agrometeorológico da área de estudo, especialmente com

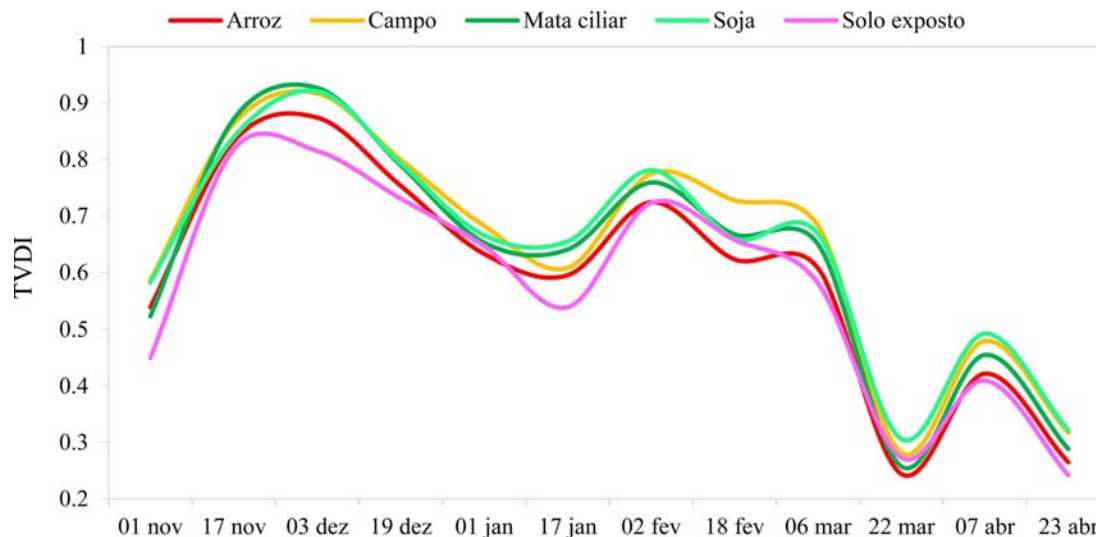
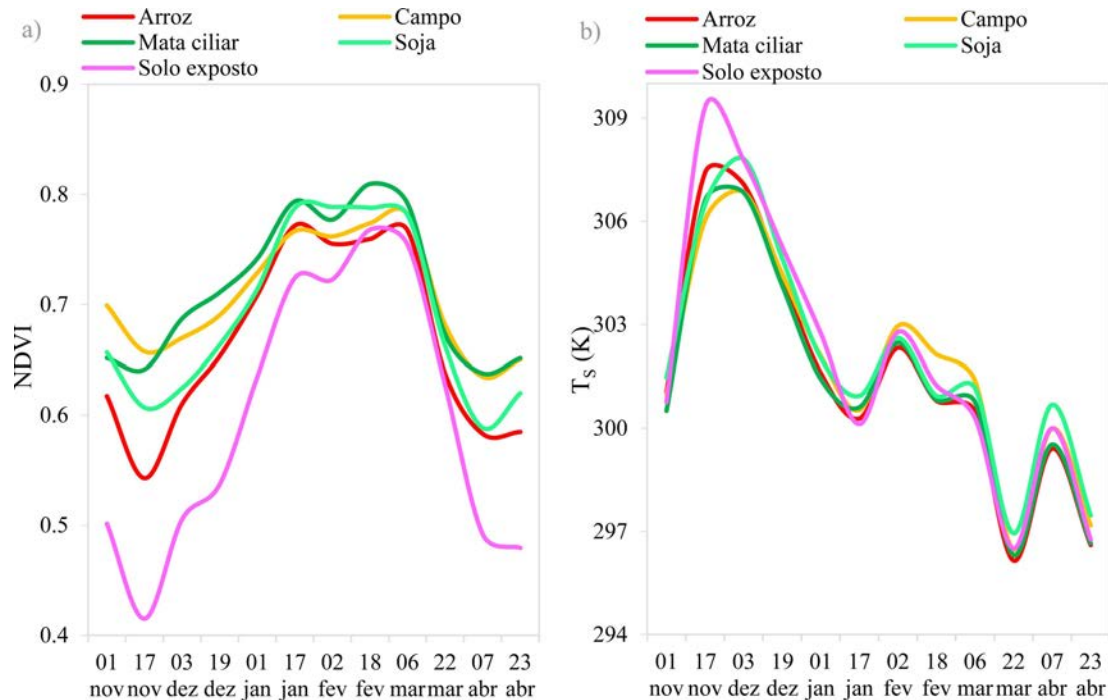


Figura 6 - Perfil médio de TVDI para MODIS nos meses de novembro de 2014 a abril de 2015 para os alvos de arroz, soja, campo, mata ciliar e solo exposto na área de estudo.



**Figura 7** - Perfil médio do NDVI para MODIS (a); perfil médio da temperatura de superfície ( $T_s$ ) para MODIS (b). Nos meses de novembro de 2014 a abril de 2015 para os alvos de arroz, soja, campo, mata ciliar e solo exposto na área de estudo.

o atributo temporal, desde que os tamanhos das parcelas sejam compatíveis com a resolução espacial do sensor.

Os resultados na área de estudo evidenciaram que ambos sensores podem, portanto, ser utilizados de forma conjunta, trazendo informações complementares sendo que OLI/TIRS e MODIS apresentam, respectivamente, vantagens em termos de detalhamento espacial e temporal.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## Referências

- 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. In: **FAO: Irrigation and Drainage Paper**, 56. Roma: FAO. 2006, 323 p.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- BERLATO, M.A.; CORDEIRO, A.P.A. Sinais de mudanças climáticas globais e regionais, projeções para o século XXI e as tendências observadas no Rio Grande do Sul: uma revisão. **Agrometeoros**, v. 25, n. 2, p. 273-302, 2017.
- CARLSON, T.N.; GILLIES, R.R.; PERRY, E.M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. **Remote Sensing Reviews**, v. 9, p. 161-173, 1994.
- CHEN, S.; WEN, Z.; JIANG, H.; ZHAO, Q.; ZHANG, X.; CHEN, Y. Temperature vegetation dryness index estimation of soil moisture under different tree species. **Sustainability**, v. 7, p. 11401-11417, 2015.
- EMATER - Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural. **Informativo Conjuntural**, 1493 15 de março de 2017. Disponível em: <http://www.emater.tche.br/site/servicos/informacoes-agropecuarias.php#conjuntural>. Acesso em: 21 mar. 2018.
- GUASSELLI, L.A.; SALDANHA, D.L.; SUERTEGARAY, D.M.A.; DUCATI, J.R.; FONTANA, D.C. Macrozoneamento do estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisas em Geociências**, v. 33, n. 1, p. 3-11, 2006.
- 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.
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.C.; SOBRINO, J.A.; SKOKOVIC, D.; MATTAR, C.; CRISTÓBAL, J. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 11, p. 1840-1843, 2014.
- MALLICK, K.; BHATTACHARYA, B.K.; PATEL, N.K. Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1327-1342, 2009.

- NEMANI, R.R.; RUNNING, S.W. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal IR AVHRR data. **Journal of Applied Meteorology**, v. 28, p. 276-284, 1989.
- NICLÓS, R.; CASELLES, V.; COLL, C.; VALOR, E. Determination of sea surface temperature at large observation angles using an angular and emissivity-dependent split-window equation. **Remote Sensing of Environment**, v. 111, p. 107-12, 2007.
- ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: **Third Symposium of ERTS**, Greenbelt: Maryland, v. 1, p. 309-317, 1973.
- SANDHOLT, I.; RASMUSEN, K.; ANDERSEN, J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. **Remote Sensing of Environment**, v. 79, p. 213-224, 2002.
- SAYAGO, S.; OVANDO, G.; BOCCO, M. Landsat images and crop model for evaluating water stress of rainfed soybean. **Remote Sensing of Environment**, v. 198, p. 30-39, 2017.
- 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. 95-172, 2018.
- SCHIRMBECK, L.W.; FONTANA, D.C.; SCHIRMBECK, J.; MENGUE, V.P. Uso do índice TVDI e modelo HAND para caracterização de condição hídrica. **Irriga**, v. 1, p. 76-84, 2017.
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The Water Balance. Publications in Climatology**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955, 104p.
- UNIYAL, B.; DIETRICH, J.; VASILAKOS, C.; TZORAKI, O. Evaluation of SWAT simulated soil moisture at catchment scale by field measurements and Landsat derived indices. **Agricultural Water Management**, v. 193, p. 55-70, 2017.
- WANG, C.Y.; QI, S.H.; NIU, Z.; WANG, J.B. Evaluating soil moisture status in China using the temperature-vegetation dryness index (TVDI). **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, p. 671-679, 2004.
- ZHANG, F.; ZHANG, L.; SHI, J.; HUANG, J. Soil moisture monitoring based on land surface temperature-vegetation index space derived from MODIS Data. **Pedosphere**, v. 24, n. 4, p. 450-460, 2014.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.

## **7.2 Artigo 2: Condições hídricas de lavoura de soja usando sensoriamento remoto terrestre**



# Condições hídricas de lavoura de soja usando sensoriamento remoto terrestre

Lucimara Wolfarth Schirmbeck<sup>1</sup>, Denise Cybis Fontana<sup>2(\*)</sup>, Genei Antonio Dalmago<sup>3</sup>, Juliano Schirmbeck<sup>4</sup>, Paulo Roberto Vargas<sup>5</sup> e José Maurício Cunha Fernandes<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Av. Bento Gonçalves, 9500, Campus do Vale, CEP 91501-970 Porto Alegre, RS. E-mail: lucimaraws@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia. Av. Bento Gonçalves, 7712, Agronomia, CEP 91540-000 Porto Alegre, RS. E-mail: dfontana@ufrgs.br

<sup>3</sup>Embrapa Trigo. Rodovia BR 285, km 294, CEP 99050-970 Passo Fundo, RS. E-mail: genei.dalmago@embrapa.br e mauricio.fernandes@embrapa.br.

<sup>4</sup>Universidade do Vale do Taquari, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Av. Avelino Talini, 171, CEP 95914-014 Lajeado, RS. E-mail: schirmbeck.j@gmail.com

<sup>5</sup>Responsável técnico pela Fazenda Capão Grande. Carazinho, RS. E-mail: paulovargas@annex.com.br

(\*) Autor para correspondência.

## INFORMAÇÕES

## RESUMO

### História do artigo:

Recebido em 18 de setembro de 2019

Aceito em 4 de março de 2020

### Termos para indexação:

TVDI

NDVI

temperatura de superfície

O objetivo deste 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 lavoura 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 do sistema solo/água/planta. 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 diário. 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 tem sensibilidade em representar a disponibilidade hídrica da cultura e permite acompanhar o desenvolvimento da soja durante a safra.

© 2020 SBAgro. Todos os direitos reservados.

## Introdução

No 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 le-

vantamento da CONAB (2018), a soja é uma das culturas que ocupa maior área e apresenta a maior 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 semeada de 5,692 milhões de hectares. Já no

cenário estadual a soja está se expandindo em áreas antes ocupadas pelo arroz 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 disponibilidade de 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). 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, em uma larga escala geográfica e com alto detalhamento, tanto espacial quanto 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 & 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: o índice de vegetação IV 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 de 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 (Sandholt et al. 2002; Mallick et al., 2009). 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 (Balzarolo et al., 2011) a tendência é minimizar os erros das estimativas, possibilitando uma compreensão mais realística das incertezas inerentes ao índice proposto.

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 diário, em experimento *On Farm* de soja no noroeste do estado do Rio Grande do Sul.

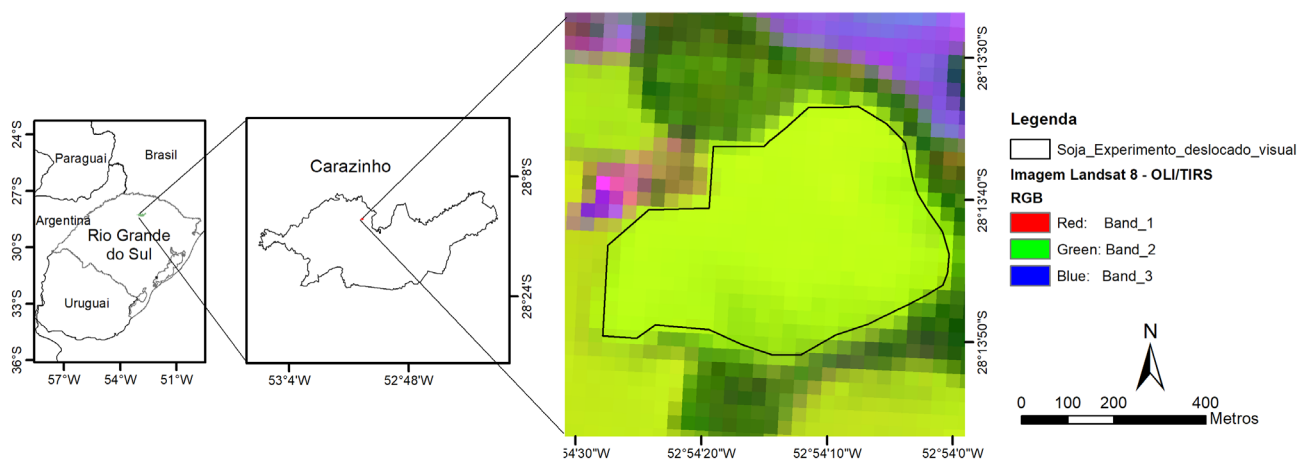
## Material e Métodos

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 local, 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. O solo da propriedade é um Latossolo Vermelho Aluminoférrico típico (Streck et al., 2008).

A lavoura avaliada ocupou uma área de 27,4 hectares dentro da área maior de 553,7 ha da Granja Capão Grande, que cultiva cerca de 455 ha de soja no verão. O experimento desenvolvido em formato *On Farm*, foi realizado em parceria entre a equipe de pesquisa em agrometeorologia da Faculdade de Agronomia da UFRGS e da Embrapa Trigo de Passo Fundo. A coleta de dados seguiu o método da amostragem (*Surveys*) simples em transectos localizados na parte central da área de estudo, cujo ponto central da mesma tinha, pelo menos, 100 metros de raio, em relação à borda da lavoura. Essa estratégia foi adotada, devido à coleta de dados micrometeorológicos, os quais necessitam desta condição de contorno para evitar a advecção de energia do meio externo à lavoura. 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<sup>-2</sup>. A adubação de base seguiu a análise de solo e correspondeu a 300 kg ha<sup>-1</sup> de NPK, da fórmula 4-28-08 na semeadura e aplicação 160 kg ha<sup>-1</sup> 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 (Reunião..., 2016), 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 foi determinado o rendimento de grãos, em quatro repetições de 9 m<sup>2</sup> cada uma. O rendimento de grãos foi corrigido para 13% de umidade e calculado para uma área de um hectare. A lavoura foi conduzida sem irri-



**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.



gação, sendo, portanto, a precipitação pluvial a única fonte de água para as plantas.

Os dados meteorológicos foram coletados através de estação meteorológica instalada na lavoura, com sensores a 1,5 m de altura do solo. Para a medição da temperatura e umidade relativa do ar foi utilizado um sensor conjugado, modelo HC2S3-L da Campbell Scientific, Inc. A radiação solar global incidente foi medida com um piranômetro modelo SP-110-L-10, da marca Apogee. O vento foi medido com um anemômetro sônico bidirecional, modelo WINDSONIC1-L34, marca GILL. A precipitação pluvial foi medida com o pluviômetro TB4-L da Campbell Scientific, Inc. Todos os sensores foram conectados a um datalogger modelo CR1000, da Campbell Scientific, Inc., e as leituras foram feitas a cada 30 segundos, com médias e/ou totalização, armazenadas a cada 15 minutos, conforme a variável.

Para a medição do NDVI foram instalados os sensores de índice de vegetação SRS - Decagon (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*) e de temperatura radiométrica da superfície ( $T_s$ ), modelo SI 421, da Apogee (Figura 2). Os sensores de NDVI são de dois tipos. O sensor de NDVI hemisférico mede a radiação eletromagnética incidente, e o sensor de NDVI incidente mede a radiação refletida pela superfície. Ambos sensores de NDVI medem nos espectros do vermelho e infravermelho próximo e o sensor de  $T_s$  mede a radiação emitida pela superfície no espectro do infravermelho termal. Os sensores são de monitoramento contínuo com registros a cada 15 minutos. Para registro dos dados foram utilizados dataloggers modelo CR 1000 da Campbell Scientific, Inc.. 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 do dossel da soja.

Para a estimativa do índice TVDI, no processo de parametrização, foram utilizados dados das imagens Landsat-8. A necessidade de uso das imagens se dá pelo fato de ser

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



necessário que na área em estudo ocorram condições hídricas extremas, em termos de umidade do solo, para os diferentes valores de IV, de forma a propiciar uma correta determinação dos limites secos e úmidos do triângulo evaporativo (Roerink et al., 2000; Kustas et al., 2004), o que não é possível somente com medidas de escala local. Foi utilizada a técnica de parametrização por múltiplas imagens, de acordo com Schirmbeck et al. (2018a). Após parametrizado o TVDI foi estimado a partir dos dados de NDVI e  $T_s$  medidos em escala local aplicando a equação proposta por Sandholt et al. (2002):

$$TVDI = \frac{(T_s - T_{smin})}{(a + b IV - T_{smin})} \quad (1)$$

sendo:  $T_s$  a temperatura radiativa do pixel (K);  $T_{smin}$  a temperatura mínima de superfície (K) correspondente ao limi-

te úmido na dispersão do triângulo evaporativo; IV o índice de vegetação no caso o NDVI; “a” e “b” os coeficientes linear e angular da reta que representam o limite seco do triângulo evaporativo.

A dispersão entre o NDVI e a  $T_s$  geralmente apresenta uma forma triangular que depende da biomassa existente sobre o solo e do teor de umidade do solo (Figura 3) (Price, 1990; Sandholt et al., 2002; Garcia et al., 2014). No limite úmido do triângulo, onde se concentram as  $T_s$  mínimas, o TVDI é zero e não há déficit hídrico. Já, no limite seco do triângulo, o TVDI é igual a 1 e ocorre déficit de umidade na superfície que está sendo imageada.

A partir dos dados de radiação solar global, precipitação pluvial, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar medidos na estação meteorológica instalada na lavoura foi estimada a evapotranspiração de referência pelo Método de Penman Monteith (FAO) (Allen et al., 2006) e após calculado o balanço hídrico meteorológico diário para obtenção dos dados de déficit e excesso hídrico. O balanço hídrico foi calculado usando a metodologia de Thornthwaite-Mather (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 houve interferência de nuvens ou sombras na hora da passagem do satélite Landsat. Como critério de seleção dos dias usou-se dados medidos de ra-

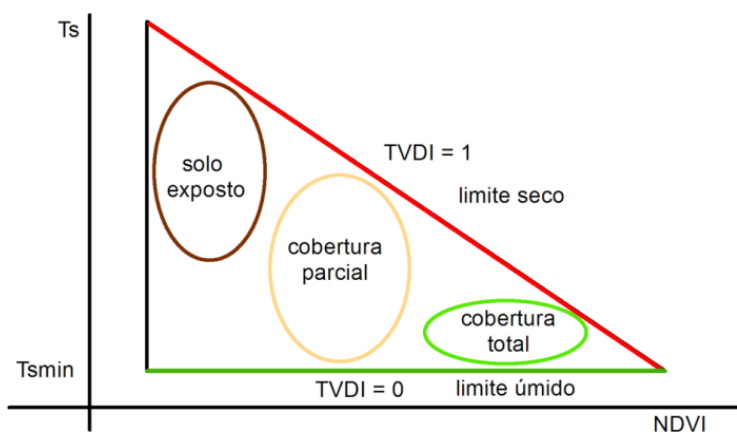
dição solar global na estação meteorológica instalada no local.

### Resultados e Discussão

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). As condições ambientais ocorridas durante o ciclo da soja, proporcionaram rendimento de grãos de 4.629 kg ha<sup>-1</sup> (dados não apresentados).

No ciclo da cultura da soja, verificou-se variações no armazenamento de água no solo em função dos déficits e excessos hídricos ocorridos (Figura 4). No período inicial, em que a soja se encontrava nos estádios vegetativos (até início de janeiro), observou-se maior ocorrência de déficits hídricos 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 hídrico 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 & Bergonci, 2017), que foi o que ocorreu na safra 2017-2018.

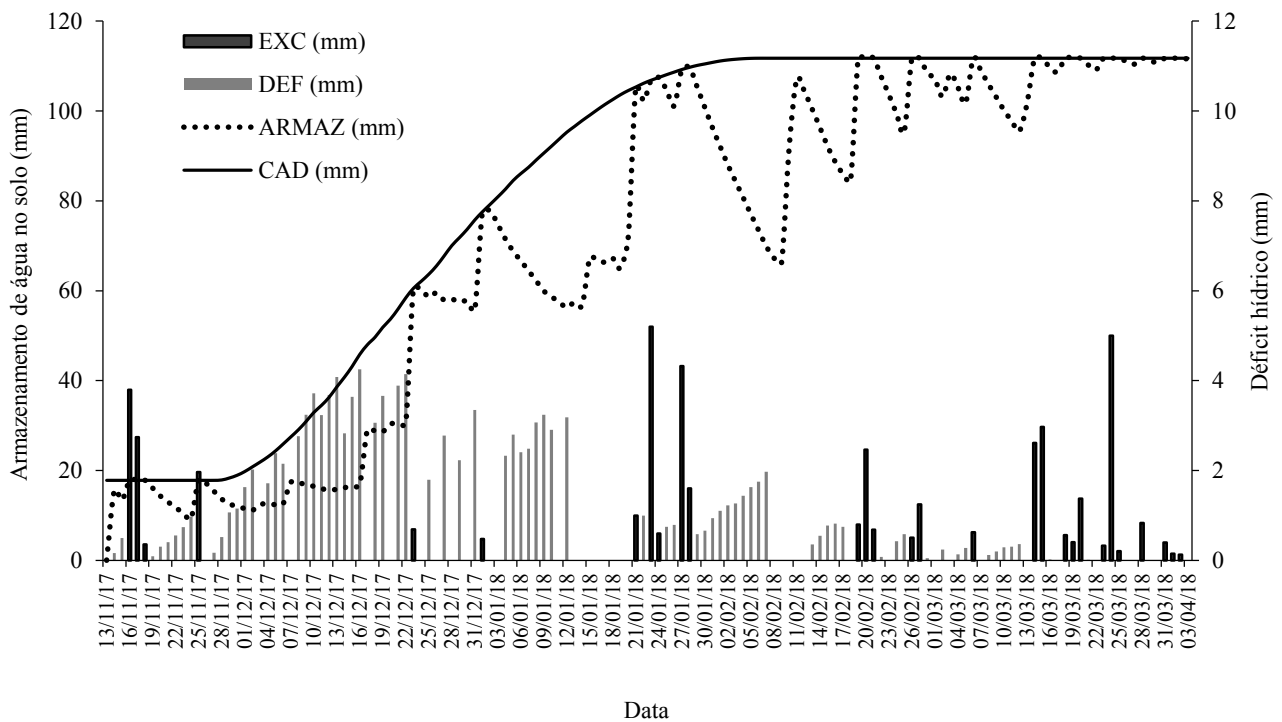
**Figura 3.** Dispersão entre o índice de vegetação NDVI e a temperatura de superfície ( $T_s$ ), configurando o triângulo evaporativo. A reta em vermelho, onde o TVDI é 1 indica deficiência hídrica. A reta em azul é onde se localiza a temperatura de superfície mínima média ( $T_{smin}$ ) do período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



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

Período	Meses do ano					
	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril
Safra 2017-2018	102,0	70,1	238,5	154,4	201,4	3,3
Normal Climatológica	155,2	166,2	158,7	146,5	135,3	133,5

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



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

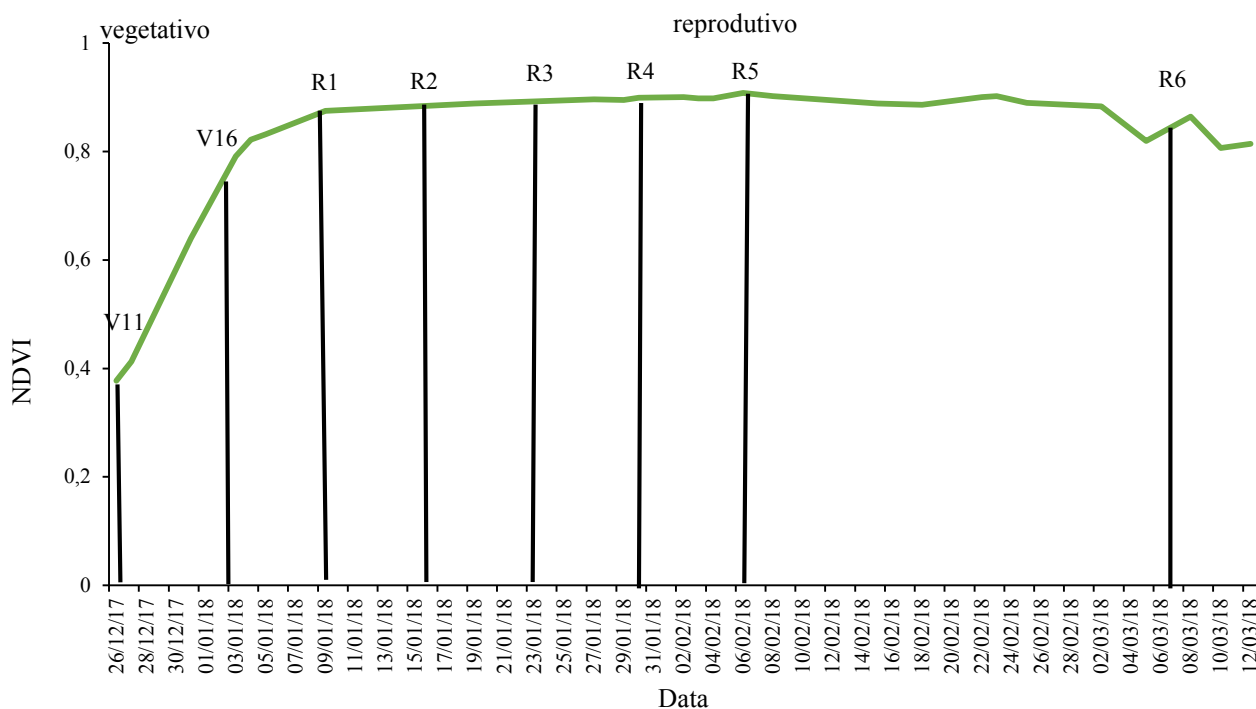
A variação do índice de vegetação NDVI, ao longo do período experimental (Figura 5), caracterizou o crescimento das plantas de soja, visto que este índice é um dos estimadores remotos de biomassa verde que mais frequentemente tem sido utilizado (Ponzoni & Shimabukuro, 2009). Observou-se no perfil de NDVI o padrão típico de lavouras anuais, com baixos valores de NDVI no início na implantação da cultura da soja, quando há presença de solo e restos de palha. Em seguida, ocorreu crescimento do índice, em decorrência do acúmulo de biomassa verde, até atingir um valor máximo, próximo a 0,9, no florescimento. De acordo com Fontana et al. (2015), em geral o valor máximo ocorre no mês de fevereiro, quando a soja atinge o máximo índice de área foliar. Após o pico máximo o NDVI se manteve constante, praticamente, até o final do ciclo. 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.

A variabilidade dos dados da Ts, que é apresentado na

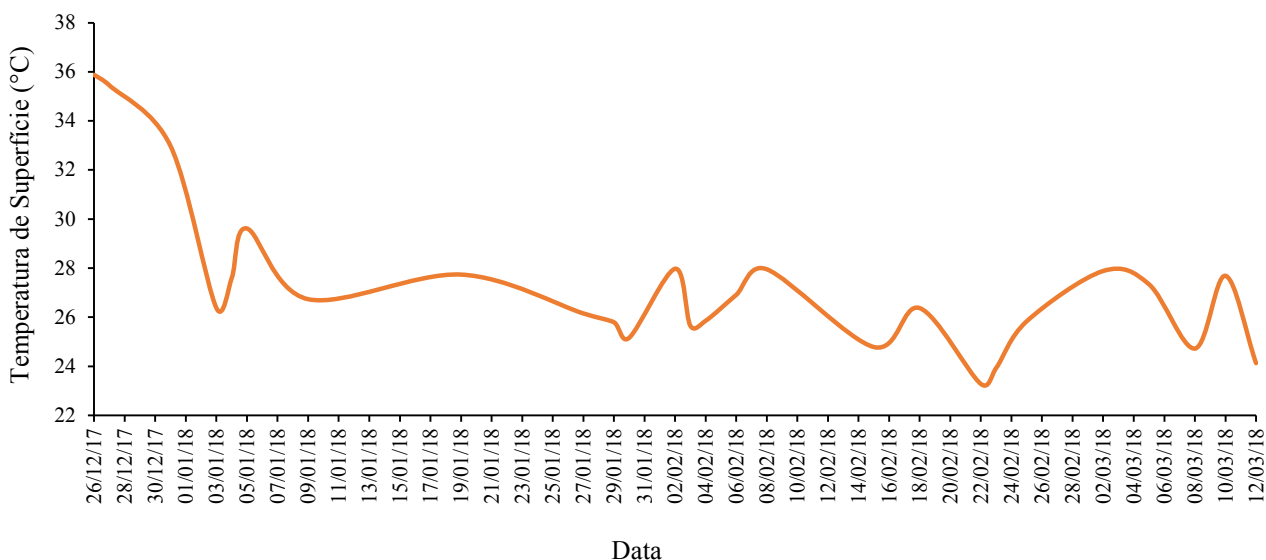
Figura 6, mostrou-se coerente com o esperado. No início da safra foram observadas as maiores Ts do solo, o que pode ser atribuído a duas causas principais. Primeiro, a maior disponibilidade de radiação solar global (próximo ao solstício de verão) e segundo a menor disponibilidade hídrica no solo, o que faz com que uma maior porção do saldo de radiação seja utilizada para o aquecimento do ar e do solo (Schirmbeck et al., 2018b). Portanto, 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, os fluxos de energia e 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).

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, foi quando ocorreram os maiores déficits hídricos. 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, coincidindo 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

**Figura 5.** Perfil temporal do índice de vegetação NDVI (em verde), de 26 de dezembro de 2017 a 12 de março de 2018, para cultura da soja na safra de 2017-2018, com identificação dos estádios fenológicos do subperíodo vegetativo (V11 e V16) e reprodutivos (R1, R2, R3, R4, R5 e R6). Carazinho, RS, 2018.



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



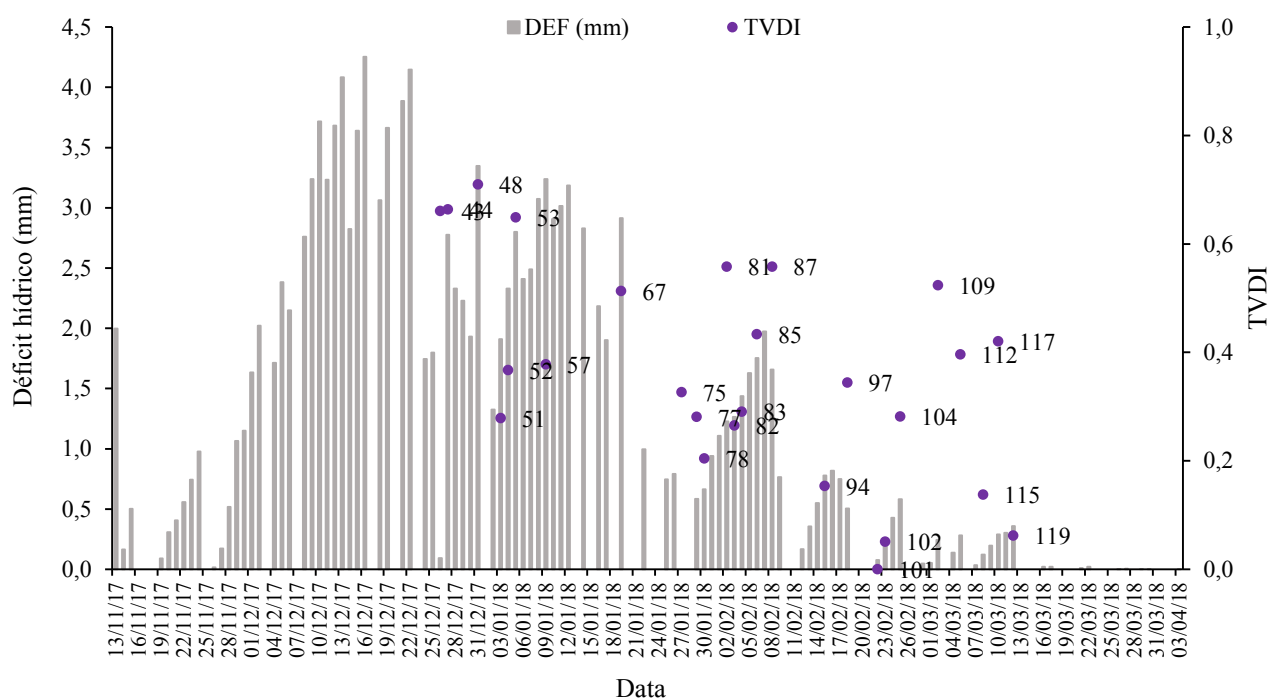
final também foram observados valores altos de TVDI, principalmente nos dias 109, 112, e 117 após a semeadura da soja, quando se observou menor nebulosidade e maior temperatura de superfície em relação aos demais dias do período, além de que a soja estava entrando em maturação fisiológica. Holzman et 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, mas em estudos futuros isto deverá ser avaliado.

### Conclusão

O TVDI estimado a partir de sensores de superfície mostra sensibilidade em representar a disponibilidade hídrica no sistema solo/água/planta e permite acompanhar a condição hídrica durante o desenvolvimento da safra.

No período de maior déficit hídrico, os valores de TVDI são maiores, indicando a restrição hídrica à cultura, o que também pode ser verificado avaliando o armazenamento de água no solo, assim como através dos dados de temperaturas da superfície.

**Figura 7.** Transcurso temporal do déficit hídrico do solo, obtido pelo cálculo do balanço hídrico diário e transcurso do índice TVDI (os marcadores em formato circular no interior da figura representam o número de dias após a semeadura) para cultura da soja na safra de 2017-2018. Carazinho, RS, 2018.



## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Embrapa Trigo, por meio do projeto SEG 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 Grande pela parceria no trabalho.

## Referências

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.

BALZAROLO, M.; ANDERSON, K.; NICHOL, C.; ROSSINI, M.; VESCOVO, L.; ARRIGA, N.; CALVET, J.-C.; CARRARA, A.; CERASOLI SALVATORI, S.; COGLIATI, S.; *et al.* Ground-based optical measurements at European flux sites: A review of methods, instruments and current controversies. *Sensors*, v. 11, p. 7954-7981. 2011.

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 Agricola*, 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.
- MALLICK, K.; BHATTACHARYA, B.K.; PATEL, N.K. Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1327-1342. 2009.
- 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.
- Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, safras 2016/2017 e 2017/2018**. [Organizadores] José Roberto Salvadori ... et al. - Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2016. 128p.
- 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 Environment**, 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.
- STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2 ed. Porto Alegre: Emater/RS, 2008. 222 p.
- 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.

## REFERENCIAÇÃO

- SCHIRMBECK, L. W.; FONTANA, D. C.; DALMAGO, G. A.; SCHIRMBECK, J.; VARGAS, P. R. V.; FERNANDES, J. M. C. Condições hídricas de lavoura de soja usando sensoriamento remoto terrestre. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.27, n.1, p.173-181, set 2019.

Declaração: os trabalhos estão sendo publicados nesse número de AGROMETEOROS (v.27, n.1, set 2019) conforme foram aceitos pelo XXI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, realizado de 12 a 16 de agosto de 2019, em Catalão, Goiás, sem revisão editorial adicional da revista.



# Water conditions of soybean crop using ground remote sensing

Lucimara Wolfarth Schirmbeck<sup>1</sup>, Denise Cybis Fontana<sup>2(\*)</sup>, Genei Antonio Dalmago<sup>3</sup>, Juliano Schirmbeck<sup>4</sup>, Paulo Roberto Vargas<sup>5</sup> and José Maurício Cunha Fernandes<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Av. Bento Gonçalves, 9500, Campus do Vale, CEP 91501-970 Porto Alegre, RS, Brazil. E-mail: lucimaraws@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia. Av. Bento Gonçalves, 7712, Agronomia, CEP 91540-000 Porto Alegre, RS, Brazil. E-mail: dfontana@ufrgs.br

<sup>3</sup>Embrapa Trigo. Rodovia BR 285, km 294, CEP 99050-970 Passo Fundo, RS, Brazil. E-mail: genei.dalmago@embrapa.br and mauricio.fernandes@embrapa.br

<sup>4</sup>Universidade do Vale do Taquari, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Av. Avelino Talini, 171, CEP 95914-014 Lajeado, RS, Brazil. E-mail: schirmbeck.j@gmail.com

<sup>5</sup>Responsável técnico pela Fazenda Capão Grande. Carazinho, RS, Brazil. E-mail: paulovargas@annex.com.br

(\*)Corresponding author.

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 18 September 2019

Accepted 4 March 2020

### Index terms:

TVDI

NDVI

surface temperature

## ABSTRACT

The objective of this work was to verify the performance of the Temperature-Vegetation Dryness Index (TVDI), obtained from surface spectral sensors, and to compare it with water deficit data determined by the meteorological water balance, in soybean crops in the northwest of Brazil. State of Rio Grande do Sul. The principle of operation of TVDI is anchored in the slope of the linear regression line between vegetation index and surface temperature, which represent the degree of soil / water / surface system moisture deficiency. For the study we used vegetation index surface sensors, in this case the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and radiometric surface temperature sensors, connected to dataloggers, recording measurements every 15 minutes. TVDI was compared against water deficit and excess data obtained by daily meteorological water balance. In the period of greatest deficit, TVDI showed the highest values, indicating water restriction, consistent with soil water storage. Surface temperatures were also high during this period. Estimated TVDI from surface sensors is sensitive to represent crop water availability and allows to monitor soybean development during the crop.

© 2020 SBAgro. All rights reserved.

## CITATION

SCHIRMBECK, L. W.; FONTANA, D. C.; DALMAGO, G. A.; SCHIRMBECK, J.; VARGAS, P. R. V.; FERNANDES, J. M. C. Condições hídricas de lavoura de soja usando sensoriamento remoto terrestre. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.27, n.1, p.173-181, set 2019.

### **7.3 Artigo 3: Water monitoring of soybean crops using TVDI obtained from surface radiometric sensors**



1 **Water monitoring of soybean crops using TVDI obtained from surface radiometric**  
2 **sensors**

3 Lucimara Wolfarth Schirmbeck<sup>1</sup> ([0000-0002-4400-3524](mailto:lucimara@ufrgs.br)),  
4 Denise Cybis Fontana<sup>2</sup> ([0000-0002-2635-6086](mailto:denise@ufrgs.br)),  
5 Juliano Schirmbeck<sup>3</sup> ([0000-0001-9342-5144](mailto:juliano@ufrgs.br)),  
6 Genei Antonio Dalmago<sup>4</sup> ([0000-0003-0102-3733](mailto:genei@embrapa.br)),  
7 José Maurício Cunha Fernandes<sup>4</sup> ([0000-0003-4965-2432](mailto:mauricio@embrapa.br)).  
8

9 <sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em  
10 Sensoriamento Remoto. Av. Bento Gonçalves, 9500, Campus do Vale, CEP 91501-970  
11 Porto Alegre, RS. E-mail: [lucimaraws@gmail.com](mailto:lucimaraws@gmail.com).

12 <sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia. Av. Bento  
13 Gonçalves, 7712, Agronomia, CEP 91540-000 Porto Alegre, RS. E-mail:  
14 [dfontana@ufrgs.br](mailto:dfontana@ufrgs.br).

15 <sup>3</sup>Universidade do Vale do Taquari, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Av.  
16 Avelino Talini, 171, CEP 95914-014 Lajeado, RS. E-mail: [schirmbeck.j@gmail.com](mailto:schirmbeck.j@gmail.com)

17 <sup>4</sup>Embrapa Trigo. Rodovia BR 285, km 294, CEP 99050-970 Passo Fundo, RS. E-mail:  
18 [genei.dalmago@embrapa.br](mailto:genei.dalmago@embrapa.br) e [mauricio.fernandes@embrapa.br](mailto:mauricio.fernandes@embrapa.br).

19  
20 **Abstract** – The objective of the study was to analyze the quality of the surface moisture  
21 data generated by the TVDI index (Temperature-Vegetation Dryness Index), when  
22 obtained using sensors positioned on the surface on the agricultural field of soybean in  
23 humid subtropical climate. A methodological proposal was defined to parameterize the  
24 TVDI of sensors on the surface and using technology analogous to orbital sensors. The  
25 dry and wet limits of the index were obtained using Landsat-8 images covering the region  
26 around the crop. To assess the quality and consistency of TVDI, a correlation analysis  
27 was carried out between TVDI, as well as the NDVI (Normalized Difference Vegetation  
28 Index) and TS (surface temperature), and variables that are usually used to express the  
29 surface moisture. TVDI shows significant correlation with soil moisture, water storage in  
30 the soil, water deficit, real evapotranspiration, real evapotranspiration/potential  
31 evapotranspiration ratio. The displacement of radiometric data measured on the surface  
32 (NDVI and TS), within the evaporative triangle adjusted with orbital data, shows a pattern  
33 that consistently describes the variability of water conditions during the analysis period,

34 constituting a tool to support decision-making in crop management, being possible to  
35 obtain it from sensors positioned on the surface and orbitals.

36 **Index Terms:** agriculture, landsat-8, NDVI, soil moisture, remote sensing, surface  
37 temperature.

38 **Monitoramento hídrico de lavoura de soja usando o TVDI obtido de sensores**  
39 **radiométricos de superfície**

40 **Resumo:** O objetivo do estudo foi analisar a qualidade dos dados de umidade da  
41 superfície gerados pelo índice TVDI (Temperature-Vegetation Dryness Index), obtido  
42 usando sensores posicionados na superfície em área agrícola de soja em clima subtropical  
43 úmido. Foi definida uma proposta metodológica para parametrização do TVDI de  
44 sensores na superfície e que utilizam tecnologia análoga aos sensores orbitais. A obtenção  
45 dos limites seco e úmido do índice, foi feita com o uso imagens Landsat-8 abrangendo a  
46 região em torno da lavoura. Para avaliar a qualidade e coerência do TVDI, foi realizada  
47 análise de correlação entre o TVDI, assim como do NDVI (Normalized Difference  
48 Vegetation Index) e da TS (temperatura da superfície), e variáveis usualmente utilizadas  
49 para expressar a umidade da superfície. TVDI mostrou correlação significativa com  
50 umidade do solo, armazenamento de água no solo, déficit hídrico, evapotranspiração real,  
51 relação evapotranspiração real/evapotranspiração potencial. O deslocamento dos dados  
52 radiométricos medidos na superfície (NDVI e TS), dentro do triângulo evaporativo  
53 ajustado com dados orbitais, evidenciam um padrão que descreve de forma consistente a  
54 variabilidade das condições hídricas do período constituindo numa ferramenta para apoio  
55 à tomada de decisões no manejo das culturas, sendo possível obtê-lo a partir sensores  
56 posicionados na superfície e orbitais.

57

58

59

## Introduction

60 Information generated from remote sensing data can serve as a basis for studies,  
61 at different spatial scales, both for the identification of yield gaps and for the management  
62 of risks in the agricultural sector. In Rio Grande do Sul the water condition is the main  
63 risk factor for soybean culture, which occupies the largest area of cultivation, around 5.8  
64 million ha in the 2020 harvest (IBGE PAM, 2021). The region's normal water condition  
65 restricts obtaining higher yields for soybean crops (Sentelhas et al. 2015; Zanon et al.  
66 2016), in addition to determining high interannual variability in grain production (Battisti  
67 et al. 2017; Matzenauer et al. 2020). Indexes that characterize the water condition in  
68 soybean crops in a precise and accurate way, despite having already been extensively  
69 studied, still need advances, especially with regard to the spatial detail of the information.

70

The surface-mounted radiometric stations in the field with sensors to capture  
71 information analogously to orbiting satellites are being used to follow the biophysical  
72 processes of local crops with more spatial and temporal details (Balzarolo et al. 2011).  
73 Field radiometric data can complement and assist the analysis of orbital data since, as  
74 well characterizr in greater detail differences which occur over the phenological  
75 development of vegetation, they can also complement measurements during periods  
76 without data due to the presence of clouds, or another factor that compromises the image  
77 quality (Eklundh et al. 2011). However, these sensors may be of limited use since usually  
78 only a few or very small areas are detected. Very often these data are used as a reference  
79 for verifying more complex models. Radiometric sensors can also be shipped in drones,  
80 which allows mapping with a high degree of detail of the variability within crops.

81

Field-installed radiometric sensors, measuring at different wavelength ranges, can  
82 provide information on different plant processes. Sensors that measure red and near-  
83 infrared radiance provide data for calculating the widely used and successful Normalized

84 Difference Vegetation Index (NDVI) for biophysical parameters, for estimating actual  
85 evapotranspiration, or even modeling grain yield estimates (Barbosa et al. 2019). On the  
86 other hand, sensors that provide measurements in the thermal spectrum, allow obtaining  
87 the surface temperature ( $T_s$ ), an indicator of plant water status (Wang et al. 2007).

88         The simultaneous  $T_s$  and NDVI data allow obtaining the surface moisture index,  
89 known as the Temperature-Vegetation Dryness Index (TVDI) (Sandholt et al., 2002),  
90 which is based on the evaporative triangle concept and used in various studies to monitor  
91 surface water status (Wang et al., 2007; Holzman et al. 2014). Despite being widely used,  
92 Although TVDI is widely used, most of the analyzes were carried out in dry conditions,  
93 with few applications in humid subtropical conditions (Schirmbeck et al. 2017a and  
94 2018). Futhemore, the TVDI responsiveness to variations in plant water status when  
95 obtained from orbital images introduces some uncertainties related to issues of temporal  
96 adequacy of data acquisition, such as satellite transit time or even the number of revisits.  
97 Radiometric issues can also introduce uncertainties, resulting from the spectral purity of  
98 the pixel, band position and width, sensor degradation, among others.

99         But when TVDI is obtained from radiometric sensors positioned on the surface,  
100 an important methodological issue arises related to how to determine the dry and wet  
101 limits of the evaporative triangle used to parameterize the TVDI index (Garcia et al. 2014;  
102 Schirmbeck et al. 2018). These limits define the possible conditions to occur in one of the  
103 region and period of the year, placing the TVDI values at each moment in relation to these  
104 limits. For parameterization, it is necessary to detect extreme water conditions, which is  
105 common to occur in large regions, but unlikely to occur when the area is small, as in a  
106 field crop.

107         The objective of the study was to analyze the quality of the surface moisture data  
108 generated by the TVDI index (Temperature-Vegetation Dryness Index), when obtained

109 using sensors positioned on the surface and in a soybean area cultivated in a humid  
110 subtropical agricultural environment.

### 111 **Material and methods**

112 Theon-farm experiment was conducted in Carazinho, Rio Grande do Sul state,  
113 Brazil (-28.228550° latitude and -52.905086° longitude, at 560 m) during the 2017/2018  
114 spring/summer harvest. The 27.4 ha crop area is located in a 553.7 ha total area, where  
115 450 ha of soybean are cultivated in the spring/summer period. The study was conducted  
116 as a partnership between the Embrapa Trigo and Universidade Federal do Rio Grande do  
117 Sul.

118 The crop is in an area of intense agricultural activity in the state and not irrigated.  
119 According to Köppen classification, the climate is subtropical humid, Cfa, with hot  
120 summers and regularly distributed rainfall throughout the year (Alvares et al. 2013).

121 The soybean cultivar DM 5958 RSF IPRO was sown on 11/13/2017 with 45 cm  
122 spacing between rows and 24 plants.m<sup>-2</sup> density. The plants emerged on 11/21/2017 and  
123 were harvested on 04/03/2018. The soil analysis determined the adopted base  
124 fertilization, 300 kg ha<sup>-1</sup> NPK (4:28:08) at sowing while 160 kg ha<sup>-1</sup> potassium chloride  
125 was hauled the day before sowing. The crop field was monitored constantly to control  
126 pests, weeds, diseases and when necessary, products indicated for the crop were used.

127 After the soybean plants emerged, phenology was monitored weekly throughout  
128 the cycle simultaneously with biometric data collection. At each evaluation time, the plant  
129 phenological stages were checked and determined following the scale of Ritchie et al.  
130 (1982), adapted by Yorinori (1996). Biophysical measurements consisted of collecting  
131 four plant samples (replications) from 1 m of the row segment, on also a weekly  
132 frequency. The data were collected by simple sampling (surveys) of transects located in  
133 the central area of the plots. The central point of transects was at least 100 m in radius

134 relative to the crop border, ensuring representativeness to the micrometeorological  
135 conditions of soybean fields.

136 Grain yield was determined at harvest maturity stage. Samples were collected  
137 from the area central portion, on previously determined transects with four repetitions of  
138 two 10-m rows collected in each repetition, totaling a 9 m<sup>2</sup> area. Grain yield was corrected  
139 to 13% moisture and calculated as 4.629 kg ha<sup>-1</sup> for this crop.

140 Three sets of Radiometric sensors mounted on separate masts were installed in the  
141 area to enable continuous monitoring of incident and reflected radiation in the red (0.6 to  
142 0.7 µm) and near-infrared (0.805 to 0.815 µm) spectra (sensor NDVI, SRS, of the Meter  
143 Group, Pullman, WA USA). The incident radiation was measured with the sensor facing  
144 upwards to provide the reference values, whereas the radiation reflected by the soybean  
145 crop was measured with the sensor facing downwards, restricting the field of view to 20°,  
146 to monitor plant growth and development. The canopy radiation emitted in the thermal  
147 spectrum (8 to 14 µm) was also measured using three sets of radiometric temperature  
148 sensors, T<sub>s</sub> (SI 421, Apogee, Logan, UT USA), with an 18° field of view. The NDVI and  
149 T<sub>s</sub> sensors were installed in pairs in a weather tower at approximately 1m above the  
150 canopy top, pointing at the same area at 90°. Both sensors monitored continuously,  
151 recording data every 15 minutes, using the Em50 series data logger of the Meter Group -  
152 Pullman, WA USA. for data collection and storage.

153 The NDVI and T<sub>s</sub> sensors have imaging technology analogous to the Operational  
154 Land Imager/Thermal Infrared Sensor (OLI/TIRS) onboard the Landsat-8 satellite, with  
155 30 m spatial resolution in the near-infrared and red spectrum and, 100 m resolution in the  
156 infrared thermal spectrum by the TIRS sensor. In this paper we proposed to use Landsat-  
157 8 OLI/TIRS data to determine the wet and dry limits/edges of the TVDI triangle, as  
158 suggested by Schirmbeck et al. (2017b).

159 The images used to define the TVDI limits/edges were from November 20, 2017,  
 160 January 7 and February 8 and 24, 2018, collected under clear skies with no clouds over  
 161 soybean crops (in a single evaporative triangle). The images were acquired from the  
 162 USGS (United States Geological Survey) database (<https://ers.cr.usgs.gov>)

163 After collecting the NDVI and  $T_s$  from both field and satellite data and defining  
 164 the dry and wet boundaries, the TVDI was then estimated using the equation proposed by  
 165 Sandholt et al. (2002):

$$166 \quad TVDI = \frac{(T_s - T_{Smin})}{(a + b V_i - T_{Smin})}$$

167 where:  $T_s$  is the surface radiative temperature (K);  $T_{Smin}$ , minimum surface temperature  
 168 (K) corresponding to the wet limit in the evaporative triangle dispersion;  $V_i$ , vegetation  
 169 index (NDVI); “a” and “b” are the linear and angular coefficients of the line representing  
 170 the dry limit obtained from the  $V_i$ , and  $T_s$  scatter plot, used for normalizing the TVDI  
 171 model.

172 The soil moisture was determined using a soil volume moisture sensor. The Time  
 173 Domain Reflectometry (TDR - Campbell Scientific, Logan, UT USA) was installed  
 174 vertically and measured the average moisture between 0 and 30 cm in the profile. The  
 175 analysis used the daily 9 a.m. moisture data, which are in thermodynamic equilibrium  
 176 with the previous day. Data were recorded using the datalogger (CR 1000 - Campbell  
 177 Scientific, Logan, UT USA)

178 A weather station was also installed in the center of the experimental area. The  
 179 temperature and relative humidity were measured using the sonde (HC2S3-L - Campbell  
 180 Scientific, Logan, UT, USA) incident global solar radiation by an pyranometer (SP-110-  
 181 L-10 Apogee, Logan, UT, USA); wind speed, using a bidirectional sonic anemometer,  
 182 (WINDSONIC1-L34 GILL Campbell Scientific, Logan, UT, USA), and finally, rainfall  
 183 using the Rainfall (TB4-L, Campbell Scientific, Logan, UT, USA) All the weather sensors

184 were installed at 1.5 m from the ground and connected to a datalogger (CR 1000 -  
185 Campbell Scientific, Logan, UT USA) the readings were taken every 30 seconds and  
186 averages and/or totals stored every 15 minutes depending on the variable.

187 The reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) was estimated following the Penman  
188 Monteith - FAO method (Allen et al. 2006) and the meteorological water balance was  
189 calculated using the Thornthwaite-Mather (1955) methodology on a daily scale (Pereira,  
190 2005). The soybean crop coefficient ( $K_c$  between 0.4 and 1.15) was used according to  
191 Allen et al. (2006) while SWSC (soil water storage capacity) was assumed to vary during  
192 the cycle as a function of plant and root growth over the period (Dourado Neto et al.  
193 1999). The thermal sum was used to calculate root growth and obtained according to Rosa  
194 et al. (2009), for a 10 °C base temperature.

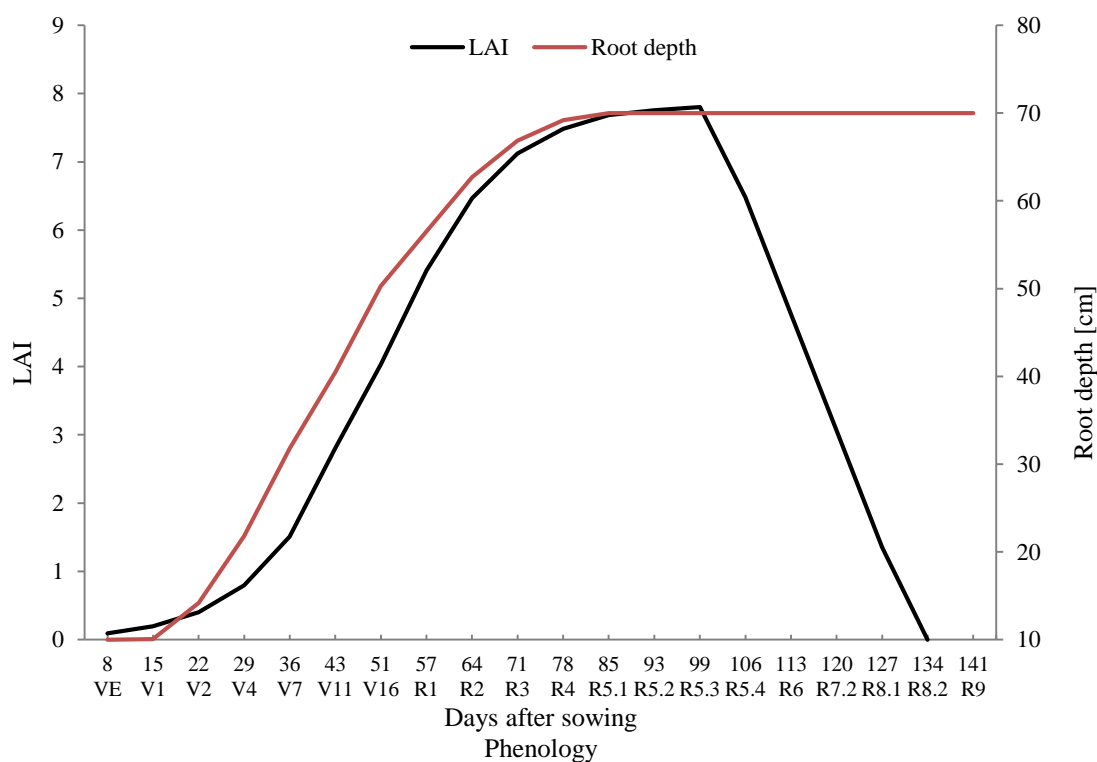
195 The data from 25 sunny days were chosen for data analysis. The selection criterion  
196 consisted of global solar radiation data measured in the period coincident with the passage  
197 of the Landsat-8 satellite (10:15 a.m. to 10:45 a.m.). For these days, graphs showing crop  
198 growth and development and surface water condition were plotted. Also, the TVDI and  
199 components were expressed as a function of time. Pearson correlation analysis was  
200 performed between TVDI, NDVI,  $T_s$  and the other variables that express the surface  
201 moisture: soil moisture, water storage in the soil, water deficit, real evapotranspiration,  
202 the real evapotranspiration/potential evapotranspiration ratio. Finally, the NDVI and  $T_s$   
203 measurements were plotted to evaluate their evolution along the cycle within the  
204 evaporative triangle constructed using the Landsat-8 images.

## 205 **Results and discussion**

206 During the growing season, both soybean aerial shoots and root system presented  
207 rapid growth while root depth stabilized in stage R3 (beginning of fruiting) at about 70  
208 cm and 71 DAS (Figure 1). The LAI increased exponentially until full flowering (R2) at



209 64 DAS and continued to increase at a lower rate until 99 DAS at the end of grain filling  
 210 (R5.3), when LAI reached values close to 8. Usually, the roots and leaf area stabilize  
 211 when flowering begins in R1. In this case, however, the plants continued to grow  
 212 following the indeterminate type of growth habit (Machado Júnior et al. 2017). After that,  
 213 as leaves turned yellow, LAI dropped sharply beginning the end-of-cycle decline. The  
 214 pattern of evolution over time of the biophysical variables showed, therefore, that there  
 215 were no environmental limitations significantly altering the growth and development of  
 216 the plants.

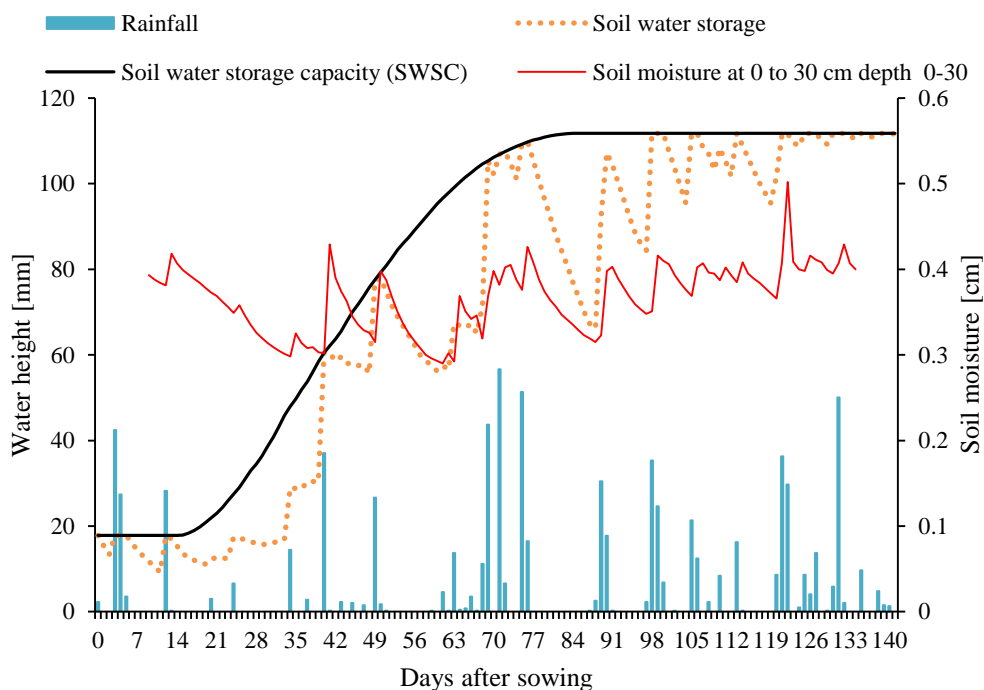


217

218 **Figure 1.** Leaf area index and estimated root depth of soybean throughout the crop cycle  
 219 for the data collected in the 2017/2018 soybean harvest.

220 Rainfall, the only water source available for the plants, was well distributed,  
 221 totaling 771.9 mm throughout the cycle (Figure 2). The water conditions, therefore, were  
 222 adequate for soybean crop development, since the total water required on average for  
 223 soybeans to reach maximum grain yield varies from 450 to 800 mm per cycle, depending  
 224 on climatic conditions, crop management and cycle length of the cultivar (Bergamaschi

225 & Bergonci, 2017). The soil moisture field data showed a variation pattern coincident  
 226 with the soil water storage estimated from the crop water balance for the crop cycle. As  
 227 expected, soil moisture varied according to changing soil water storage. The storage  
 228 values increased due to the use of the SWSC variable, estimated as a function of root  
 229 depth. Soil moisture and water storage variations were associated with rainfall periods,  
 230 which increased soon after rainfall and decreased days after rainfall had stopped. Water  
 231 restriction for the crop is observed between 50 and 60 DAS, coinciding with the end of  
 232 the growing season, and between 77 and 87 DAS, at the beginning of the grain filling, in  
 233 addition to other shorter periods of smaller water deficits. Although the total rainfall was  
 234 suitable for the crop, there was an alternation of periods with higher and lower humidity  
 235 present in the soil throughout the cycle, which is important for subsequent analyzes  
 236 related to the quality of TVDI in characterizing the water condition of the surface.

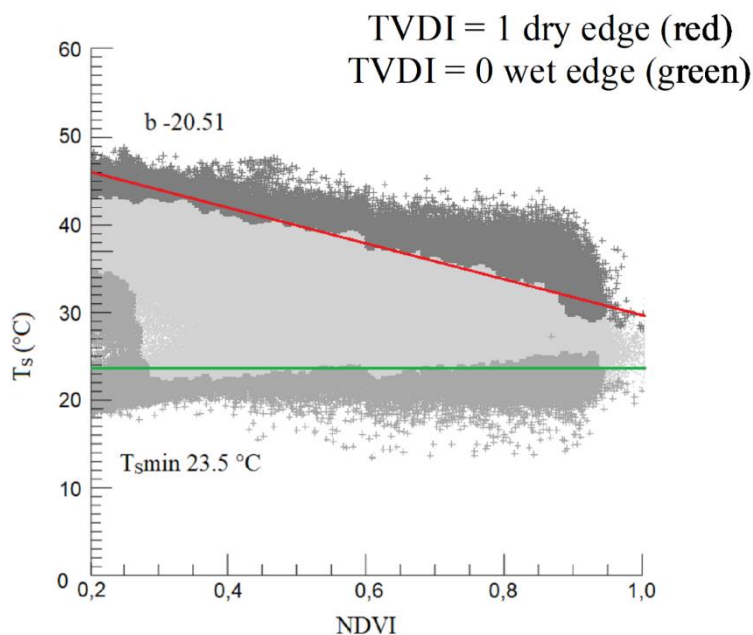


237

238 **Figure 2.** Soil water storage capacity, soil water storage, soil moisture at 0 to 30 cm depth,  
 239 and rainfall during soybean growth and development cycle in the 2017-2018 soybean  
 240 harvest.

241 It is important to note that the TVDI value on each date relates to the dry and wet  
 242 limits established in its parameterization (Garcia et al., 2014), which makes it relevant to  
 243 mention two fundamental aspects. First, the parameterization per crop was assumed, as  
 244 proposed by Schirmbeck et al. (2018), since the objective was the use of TVDI to monitor  
 245 moisture throughout the soybean cycle. In this case, it is imperative that these limits are  
 246 invariant in time. Second, sensors positioned on the surface do not generate the variability  
 247 of water conditions necessary to obtain the dry and wet limits of the evaporative triangle.  
 248 The alternative proposed in this work was to use orbital data. Thus, the evaporative  
 249 triangle obtained in the present work (Figure 3) was generated with Landsat TM-8 images  
 250 available throughout the cycle. The NDVI and TS data collected in the field were  
 251 positioned within this evaporative triangle.

### TVDI

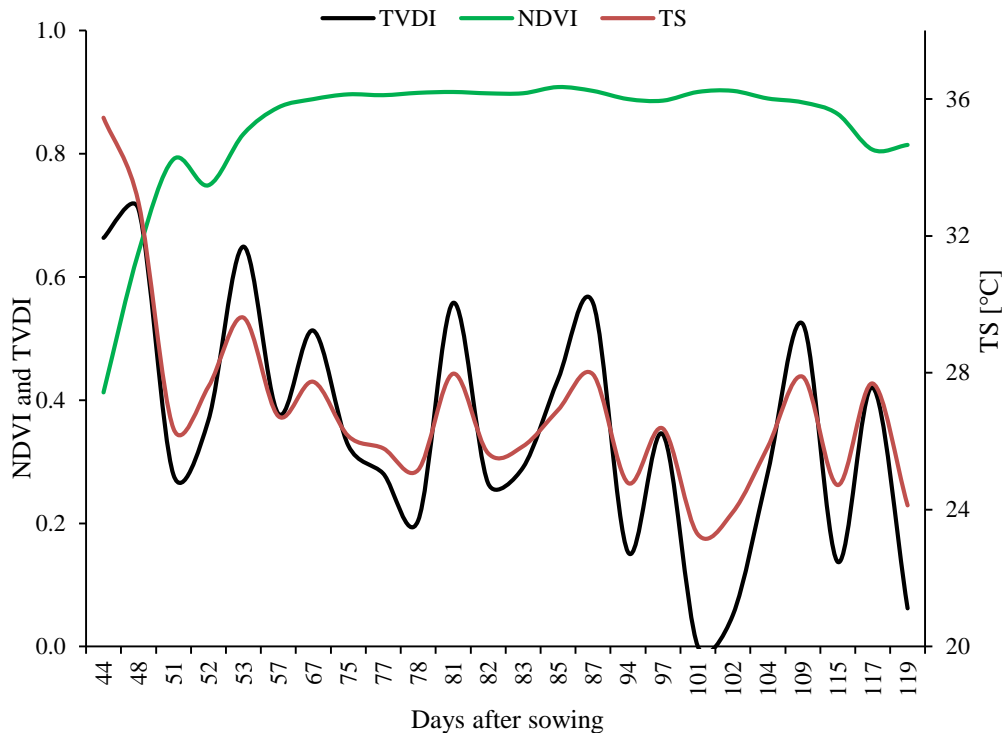


252  
 253 **Figure 3.** Evaporative triangle defined by the NDVI and surface temperature ( $T_s$ ) data  
 254 obtained by Landsat-8.

255

256

257           The TVDI behaved over time as expected (Figure 4). Furthermore, the initial low  
258 and increasing NDVI values observed at the beginning of the cycle, when the crop was  
259 not fully covered by soil and LAI was below 5, reached above 0.9 and remained stable  
260 throughout the crop, during flowering and grain filling when LAI reached between 6 and  
261 8. The stabilization at high values is a known NDVI characteristic, referred to as the  
262 saturation index. At saturation, the LAI increases or decreases do not correspond to NDVI  
263 variations; the index loses sensitivity and does not represent the LAI variations any  
264 longer. It can be inferred that from the moment the NDVI saturates, its contribution to the  
265 differentiation of water surface conditions using TVDI is reduced, which has already been  
266 pointed out by other authors (Zhang et al. 2014; Holzman et al. 2014; Schirmbeck et al.  
267 2017b)The highest surface temperatures ( $T_s$ ) occurred at the beginning of the cycle, when  
268 the greater available solar radiation coincided with exposed soil and, therefore, without  
269 the vegetation cover that help to control the surface temperature via the  
270 evapotranspiration process (Allen et al. 2006; Silva-Fuzzo & Rocha, 2016). The surface  
271 temperature also tended to gradually decrease as the cycle advanced and solar declination  
272 decreased. However, this trend is several times interrupted by the rise in surface  
273 temperature as occurred markedly at 53, 67, 81, 87, 97, 109, and 117 DAS. The elevation  
274 of the TS in these days possibly was due to either the higher amount of solar radiation or  
275 the reduction of the surface moisture, altering the partition of the energy balance (Garcia  
276 et al. 2014).



277

278 **Figure 4.** NDVI vegetation index;  $T_s$  surface temperature and TVDI surface moisture  
 279 index of sunny days for the 2017/2018 soybean harvest.

280

281 TVDI presented a significant correlation with the different variables measured or  
 282 estimated in the experiment (Table 1), which are usually used to indicate crop water  
 283 condition. The higher the soil moisture, the soil water storage, the  $ET_R/ET_0$  ratio and the  
 284  $ET_R$ , the lower the TVDI, evidencing the inversely proportional relationship. For the  
 285 water deficit, on the other hand, the relationship was directly proportional. The higher the  
 286 water deficit, the higher the TVDI. These correlations demonstrate that despite the  
 287 conceptual differences inherent in each of the surface moisture indicators used in the  
 288 correlation analysis, TVDI returned the expected result, showing the robustness of this  
 289 remotely obtained index (Garcia et al. 2014; Holzman et al. 2018). When TVDI is  
 290 calculated using orbital images, the surface moisture conditions are mapped to a detail  
 291 degree that is not possible using other forms of measurement or estimation.

292

293 **Table 1.** Pearson correlation coefficients for TVDI, NDVI, surface temperature ( $T_s$ ) and  
 294 variables that express surface moisture (Soil Moisture, Storage), Rainfall, Water deficit  
 295 and excess, Real Evapotranspiration ( $ET_R$ ), Potential Evapotranspiration ( $ET_o$ ) and the  
 296  $ET_R/ET_o$  ratio for the 2017/2018 soybean harvest.

	TVDI	NDVI	$T_s$	Moisture	Storage	Rainfall	Deficit	Excess	$ET_R$	$ET_o$	$ET_R/ET_o$
TVDI	1										
NDVI	-0.54**+	1									
$T_s$	0.87**+	-0.88**+	1								
Moisture	-0.49*	0.02	-0.29	1							
Storage	-0.72**+	0.55**+	-0.71**+	0.74**+	1						
Rainfall	-0.03	0.08	-0.05	0.08	0.28	1					
Deficit	0.57**+	-0.20	0.43*	-0.70**+	-0.83**+	-0.25	1				
Excess	-0.04	0.10	-0.07	0.08	0.29	1.00**+	-0.24	1			
$ET_R$	-0.50*	0.54**+	-0.57**+	0.49*	0.71**+	0.26	-0.68**+	0.25	1		
$ET_o$	0.36	0.13	0.13	-0.49*	-0.50*	-0.20	0.82**+	-0.18	-0.21	1	
$ET_R/ET_o$	-0.55**+	0.40*	-0.51**+	0.60**+	0.78**+	0.32	-0.87**+	0.31	0.93**+	-0.55**+	1

297 \* and + (significant at 5 and 1% probability, respectively)

298

299 It was also possible to quantify the association of TVDI with the two parameters  
 300 used in the NDVI and  $T_s$  calculations. There is a directly proportional and more intense  
 301 correlation with the  $T_s$  (0.87), which as previously mentioned is related to the surface  
 302 temperature control by the evapotranspiration process (Allen et al. 2006). When stomatal  
 303 closure occurs due to lack of water in the soil, the surface temperature of the vegetation  
 304 increases and TVDI also increases, whereas the relationship with NDVI is inverse and  
 305 less intense (-0.54) (Schirmbeck et al. 2017b).

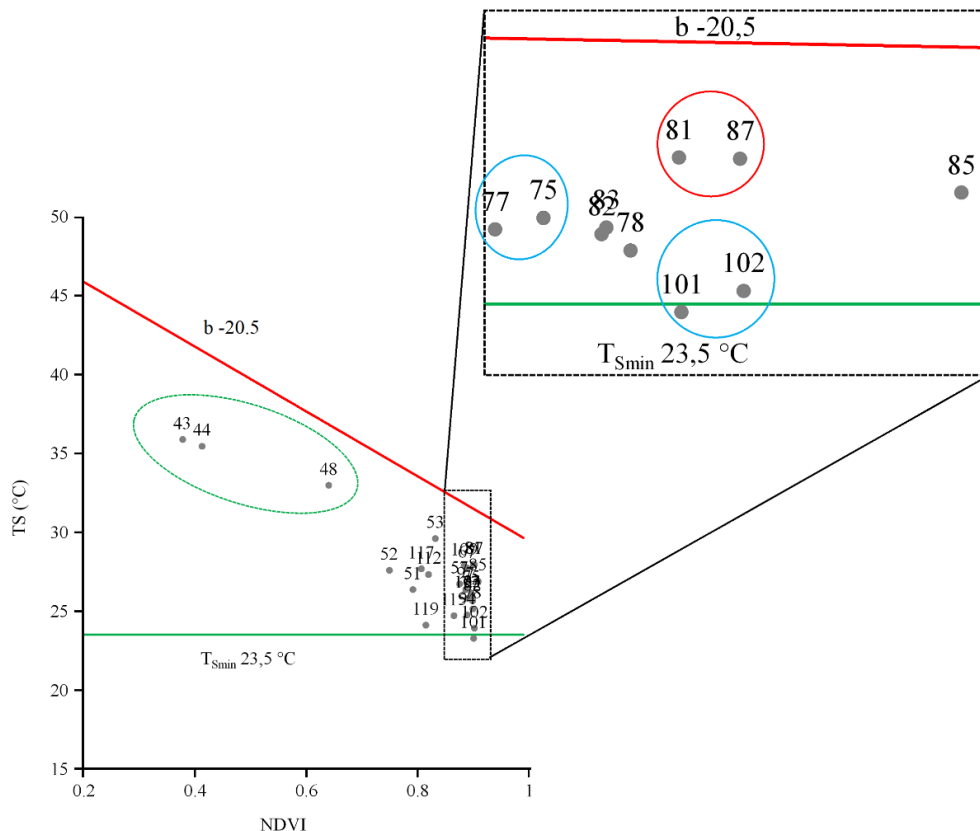
306 The TVDI index, estimated from the radiometric surface data, also allowed to  
 307 analyze the displacement pattern ( $NDVI \times T_s$ ) of the data within the evaporative triangle  
 308 (Figure 5), during the soybean cycle, migrating between the wet (green line) and dry (red  
 309 line) limits/edges, keeping in mind that the limits were obtained from the orbital data

310 (Figure 3). The data labels in the figure allowed identifying the days after sowing that  
311 correspond to each point, facilitating the coherence and consistency analyses of the TVDI  
312 values. At the beginning of the season (43, 44 and 48 DAS), the points migrated from left  
313 to right within the triangle (highlighted in the green circle), given by the NDVI increase,  
314 associated with the LAI increase from 1.9 to 2.8 in the period (Figure 1). On these three  
315 dates, the distance from the points to the dry boundary was similar, which may indicate  
316 an equally similar but restricted water condition. Figure 2 show low rainfall in these three  
317 dates, with reduced soil moisture, but soil water storage remained constant due to the  
318 increased SWSC, given the estimated increased depth of the root system. Throughout the  
319 cycle, the points within the evaporative triangle are all very close resulting from the NDVI  
320 values stabilizing at high values, between 0.7 and 0.9.

321         The zooming into the rightmost part of the triangle (black rectangle) highlights  
322 three situations that show coherence between TVDI and the surface water condition of  
323 the crop. At 77 and 75 DAS and also 101 and 102 (highlighted in the blue circle), the data  
324 approached the wet limit (Figure 5). The rainfall observed in both situations increased  
325 soil storage and moisture (Figure 2). On the contrary, the 81 and 87 DAS data were closer  
326 to the dry boundary (higher TVDI), indicating water restriction caused by the lack of  
327 rainfall and reduced soil storage and moisture.

328         The results obtained in this work are added to previous works (Garcia et al. 2014;  
329 Silva-Fuzzo & Rocha, 2016; Uniyal et al. 2017; Holzman et al. 2018) that have been  
330 demonstrating the quality of TVDI in characterizing the surface humidity. The  
331 contributions of the present work are mainly related to issues of spatial scale and climate.  
332 In terms of scale, it was demonstrated that it is possible to reconcile data obtained from  
333 sensors positioned on the surface and on orbital platforms. Orbital sensors are necessary  
334 to parameterize the TDVI. In relation to the surface sensors, there are many application

335 possibilities. In this work, the NDVI and TS sensors were positioned in towers, generating  
 336 data from a very restricted area, suitable for calibration studies. However, one can think  
 337 of shipping the radiometric sensors in drones or similar, which allows the formation of  
 338 TVDI images with the most convenient spatial resolution. This is a potential to be  
 339 explored by the precision farming community (Oliveira et al. 2021).



340

341 **Figure 5.** Evaporative triangle showing the wet and dry boundaries obtained from the  
 342 Landsat-8 satellite, in the 2017/2018 soybean harvest.

343 Regarding the climate issue, it should be noted that the TVDI was initially  
 344 proposed for use in arid regions. For the humid subtropical climate, which predominates  
 345 in Rio Grande do Sul, Schirmbeck et al. (2017c) had already demonstrated that it is  
 346 possible to use it by differentiating the surface moisture conditions in extensive regions  
 347 of production. The present work adds the information that even for a crop with small  
 348 water restrictions, in crops located in a production region with humid subtropical climate,



349 the TVDI showed sensitivity to differentiate the humidity condition over time.

350

351

### **Conclusions**

352 1. The TVDI shows precision and accuracy in determining the surface moisture  
353 conditions, attested by the significant correlations with indicators usually used  
354 for this purpose.

355 2. TVDI can be determined using surface-mounted sensors that capture  
356 information from radiometric measurements. But the dry and wet boundaries of  
357 the evaporative triangle need to be adjusted from orbital images of the region  
358 and study period, which makes it possible to detect variations in water  
359 conditions throughout the soybean cycle.

360 3. The displacement of radiometric data measured on the surface (NDVI and TS),  
361 within the evaporative triangle adjusted with the orbital data, shows a pattern  
362 that consistently describes the variability of water conditions during the analysis  
363 period, expressing the variability even in a humid climate and low water  
364 restriction.

365

### **Acknowledgments**

366 This work was partially supported by the Coordenação de Aperfeiçoamento de  
367 Pessoal de Nível Superior - Brazil (CAPES) - Financing Code 001 and Embrapa Trigo,  
368 via the SEG project No. 02.15.07.003.00.00. The team thanks Embrapa Trigo employees,  
369 Elisson S. Pauletti and Cristian M. Plentz, for helping to conduct the experiment and  
370 collecting data, and Granja Capão Alto for their working partnership.

371

### **References**

372 ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Evapotranspiración del  
373 cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.

- 374 Roma: FAO. 2006, 323p. (**FAO: Irrigation and Drainage Paper, 56**).
- 375 ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.;
- 376 SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische**
- 377 **Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- 378 BARBOSA, H. A.; LAKSHMI KUMAR, T.; Paredes, F.; ELLIOTT, S.; AYUGA,
- 379 J.G. Assessment of Caatinga response to drought using Meteosat-SEVIRI Normalized
- 380 Difference Vegetation Index (2008-2016). **ISPRS Journal of Photogrammetry and**
- 381 **Remote Sensing**, v.1, p.1-18, 2019. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.12.014
- 382 BATTISTI, R. SENTELHAS, P.C., BOOTE, K.J. CÂMARA, G.M.S. FARIAS,
- 383 J.R.B. BASSO, C.J. Assessment of soybean yield with altered water-related genetic
- 384 improvement traits under climate change in Southern Brazil. **European Journal of**
- 385 **Agronomy**, v.83, p.1-14, 2017. DOI: 10.1016/j.eja.2016.11.004.
- 386 BERGAMASCHI, H., BERGONCI, J. I. As Plantas e o Clima - Princípios e
- 387 Aplicações. Guaíba: Agrolivros, 2017. 352p.
- 388 DOURADO NETO, D.; GARCÍA, A. G.; FANCELLI, A. L.; FRIZZONE, J. A.;
- 389 REICHARDT, K. Balance hídrico cíclico y secuencial: estimación de
- 390 almacenamiento de agua em el suelo. **Scientia Agrícola**, v.56, p.537-546, 1999. DOI:
- 391 10.1590/S0103-90161999000300005
- 392 EKLUNDH, L.; JIN H.; SCHUBERT, P.; GUZINSKI, R.; HELIASZ, M. An Optical
- 393 Sensor Network for Vegetation Phenology Monitoring and Satellite Data Calibration.
- 394 **Sensors**, v.11, p.7678-7709, 2011. DOI: 10.3390/s110807678
- 395 GARCIA, M., FERNÁNDEZ N., VILLAGARCÍA, L., DOMINGO, F.,
- 396 PUIGDEFÁBREGAS, J., SANDHOLT, I. Accuracy of the Temperature-Vegetation
- 397 Dryness Index using MODIS under water-limited vs. energy-limited
- 398 evapotranspiration conditions. **Remote Sensing of Environment**, v.149, p.100-117,

- 399 2014. DOI: 10.1016/j.rse.2014.04.002
- 400 HOLZMAN, M.E., RIVAS, R., PICCOLO, M.C. Estimating soil moisture and the  
401 relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index.  
402 **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.28,  
403 p.181-192, 2014. DOI: 10.1016/j.jag.2013.12.006
- 404 HOLZMAN M.E., CARMONA F., RIVAS R., NICLÒS R. Early assessment of crop  
405 yield from remotely sensed water stress and solar radiation data. **ISPRS Journal of**  
406 **Photogrammetry and Remote Sensing**, v.145, p.297-308, 2018. DOI:  
407 10.1016/j.isprsjprs.2018.03.014
- 408 IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) PAM (Produção Agrícola  
409 Municipal), [Acesso em 2021 Março 04].  
410 <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>
- 411 MACHADO JÚNIOR, C.S. SILVA, C.R. SANCHES, M.C. HAMAWAKI, O.T.  
412 SOUSA, L.B. Physiologic parameters of soybean cultivars of determinate and  
413 indeterminate, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.52, p.419-425, 2017. DOI:  
414 10.1590/S0100-204X2017000600005
- 415 MATZENAUER, R., MALUF, J.R.T., RADIN, B. Regime de chuvas e produção de  
416 grãos no Rio Grande do Sul: impacto das estiagens e relação com o fenômeno El Niño  
417 Oscilação Sul. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 133 p. il. color. E-book. 2020.
- 418 OLIVEIRA, J.T. OLIVEIRA, R.A. FURTADO JUNIOR, M.R. Contribution of soil  
419 attributes and morphological variables to yield of irrigated garlic, **Engenharia**  
420 **Agrícola**, v.41, p.215-222, 2021. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n2p215-  
421 222/2021
- 422 PEREIRA, A. R. Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather.  
423 **Bragantia**, v.64, p.311-313, 2005. DOI: 10.1590/S0006-87052005000200019

- 424 RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; THOMPSON, H.E.; BENSON, G.O. How a  
425 soybean plant develops. Ames: Iowa State University of Science and Technology,  
426 1977. 20p. (Special Report, 53).
- 427 ROSA, H. T.; WALTER, L. C.; STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Thermal time  
428 methods and sowing dates in phyllochron determination in wheat cultivars. **Pesquisa**  
429 **Agropecuária Brasileira**, v.44, p.1374-1382, 2009. DOI: 10.1590/S0100-  
430 204X2009001100002
- 431 SANDHOLT, I., RASMUSEN, K., ANDERSEN, J. A simple interpretation of the  
432 surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status.  
433 **Remote Sensing of Enviromenmt**, v.79, p.213-224, 2002. DOI: 10.1016/S0034-  
434 4257(01)00274-7
- 435 SCHIRMBECK, L. W., FONTANA, D. C., SCHIRMBECK, J. TVDI spatiotemporal  
436 pattern of a soybean growing area in humid subtropical climate. **Bragantia**, v.76,  
437 p.447- 455, 2017a. DOI: 10.1590/1678-4499.193
- 438 SCHIRMBECK, L. W., FONTANA, D. C., SCHIRMBECK, J. MENGUE, V. P.  
439 Understanding TVDI as an index that expresses soil moisture. **Journal of**  
440 **Hyperspectral Remote Sensing**, v.7, p.82-90. 2017b. DOI: 10.29150/jhrs.v7.2.p82-  
441 90.
- 442 SCHIRMBECK, L. W.; FONTANA, D. C.; SCHIRMBECK, J. TVDI as an indicator  
443 of water status in spring-summer crops in Rio Grande do Sul State, Brazil.  
444 **Agrometeoros**, v.25, p.373-381, 2017c.
- 445 SCHIRMBECK, L. W., FONTANA, D. C., SCHIRMBECK, J. Two approaches to  
446 calculate the TVDI in the humid subtropical climate of southern Brazil. **Scientia**  
447 **Agricola**, v.75, p.95-172, 2018. DOI: 10.1590/1678-992x-2016-0315
- 448 SENTELHAS PC, BATTISTI R, CÂMARA GMS, FARIAS JRB, HAMPF A,

- 449 NENDEL C. The soybean yield gap in Brazil—magnitude, causes and possible  
450 solution. **The Journal of Agricultural Science**, v.153, p.1394–1411, 2015.  
451 DOI:10.1017/S0021859615000313
- 452 SILVA-FUZZO D.F., ROCHA, J.V. Simplified triangle method for estimating  
453 evaporative fraction over soybean crops, **J. Appl. Remote Sens.** v.10, p.046027,  
454 2016. DOI: 10.1117/1.JRS.10.046027.
- 455 THORNTHWAITTE, C. W., MATHER, J. R. **The water balance**. Publications in  
456 Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955, 104p.
- 457 UNIYAL B, DIETRICH J, VASILAKOS C, TZORAKI O. Evaluation of SWAT  
458 simulated soil moisture at catchment scale by field measurements and Landsat derived  
459 indices. **Agricultural Water Management**, v.193, p.55-70, 2017. DOI:  
460 10.1016/j.agwat.2017.08.002
- 461 WANG, X.; XIE, H.; GUAN, H. Different responses of MODIS-derived NDVI to  
462 root-zone soil moisture in semi-arid and humid regions. **Journal of Hydrology**,  
463 v.340, p.12–24, 2007. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.03.022
- 464 YORINORI, J.T. Cancro da haste: epidemiologia e controle. Londrina: **EMBRAPA-**  
465 **CNPSo**, (Embrapa Soja. Circular Técnica, 14). 1996.
- 466 ZANON, A. J., STRECK, N. A. GRASSINI, P. Climate and Management Factors  
467 Influence Soybean Yield Potential in a Subtropical Environment. **Agronomy**  
468 **Journal**, v.108, p.1447-1454, 2016. DOI:10.2134/agronj2015.0535.
- 469 ZHANG, F., ZHANG L., SHI, J. HUANG J. Soil Moisture Monitoring Based on Land  
470 Surface Temperature-Vegetation Index Space Derived from MODIS Data.  
471 **Pedosphere**, v.24, p.450–460, 2014.
- 472

#### **7.4 Artigo 4: Surface moisture index by local and orbital radiometric data**

## 1                   **Surface moisture index by radiometric measurements and orbital data**

2

3   **ABSTRACT:** As an indicator of surface moisture, TVDI has great potential for  
4 application in agriculture in different types of climates, but the best results have been  
5 obtained in arid climates, given the presence of areas with contrasting water conditions.  
6 Some studies under subtropical climate conditions have shown good results in the use of  
7 TVDI as an indicator of surface moisture but some uncertainties still need to be better  
8 understood. This study aimed to evaluate the coherence of temperature-vegetation  
9 dryness index (TVDI) values, obtained from sensors installed on the surface, compared  
10 to data obtained using orbital images in an agricultural area in southern Brazil under  
11 humid subtropical climate conditions. The analyses employed normalized difference  
12 vegetation index (NDVI) and surface temperature (TS) data obtained through sensors  
13 installed on the surface, with continuous monitoring, as well as Landsat OLI/TIRS  
14 images, covering the period of the soybean cycle. The TVDI values, obtained from NDVI  
15 and TS radiometric sensors installed in the field, indicated consistency of using Landsat-  
16 OLI/TIRS orbital images to map the surface moisture condition, representing the spatial  
17 and temporal variations of the water condition of soybean cultivations under subtropical  
18 climate conditions.

19   **KEYWORDS:** TVDI, ground-based NDVI system, *Glycine max L*, agriculture.

20

21

### **INTRODUCTION**

22           Vegetation plays an essential role in the energy exchange process on the Earth's  
23 surface, modulating energy inputs and outputs, whose flows can be quantified through  
24 energy balance (Ryu et al. 2019). Changes that may occur in the soil-water-vegetation  
25 system cause alterations in this balance and may lead to yield losses in agricultural areas,

26 being important to be quantified (Fontana et al. 2015; Matzenauer et al. 2020).

27 In this context, the use of remote sensing, through the application of indices to  
28 monitor vegetation in agricultural areas, becomes attractive. The normalized difference  
29 vegetation index (NDVI), is an index that expresses the quantity and status of green  
30 biomass. On the other hand, surface temperature ( $T_s$ ) can be obtained through the  
31 detection of the energy emitted in the thermal spectrum, assisting in agricultural  
32 monitoring, considering its relationship with the water status of vegetation.

33 The dispersion in the two-dimensional space between  $T_s$  and NDVI is usually  
34 triangular (Sandholt et al. 2002; Fuzzo & Rocha, 2018; Schirmbeck et al. 2018). The  
35 edges of this triangle define two limits (wet and dry), which are used to calculate an index  
36 that expresses the moisture on the surface, the temperature-vegetation dryness index  
37 (TVDI). Proposed based on empirical parameterization that considers the strong  
38 relationship between  $T_s$  and NDVI, TVDI is a simple method, with great potential for  
39 application, based on information obtained only from satellites. The index was proposed  
40 in a study that covered part of the semi-arid region of Senegal, West Africa, using 37  
41 images from NOAA-AVHRR (Sandholt et al., 2002), but later has been applied using  
42 different types of images (Chen et al. 2015; Bai et al. 2017; Uniyal et al. 2017; Sayago et  
43 al. 2017; Holzman et al. 2018; Liu & Yue, 2018, Wang et al. 2020).

44 As an indicator of surface moisture, TVDI has great potential for application in  
45 agriculture in different types of climates, but the best results have been obtained in arid  
46 climates, given the presence of areas with contrasting water conditions (Holzman et al.  
47 2018). Some studies under subtropical climate conditions have shown good results in the  
48 use of TVDI as an indicator of surface moisture (Schirmbeck et al. 2017b 2018), but some  
49 uncertainties still need to be better understood.

50 Sensors installed in towers on a local scale on the surface, continuously monitoring



51 vegetation and collecting surface data, with technology similar to that used in satellites,  
52 are sources of reference data for validating orbital data (Baghzouz et al. 2010; Balzarolo  
53 et al. 2011). These data can serve to better understand the functioning of the TVDI index  
54 and its limitations, especially under climate conditions other than those in which the index  
55 was proposed.

56 Based on the current need for agricultural modernization, this study aimed to  
57 evaluate the coherence of TVDI values, obtained from sensors installed on the surface,  
58 which use technology similar to that of satellites, compared to those obtained using orbital  
59 images in an agricultural area in southern Brazil under humid subtropical climate  
60 conditions.

61

62

## MATERIAL AND METHODS

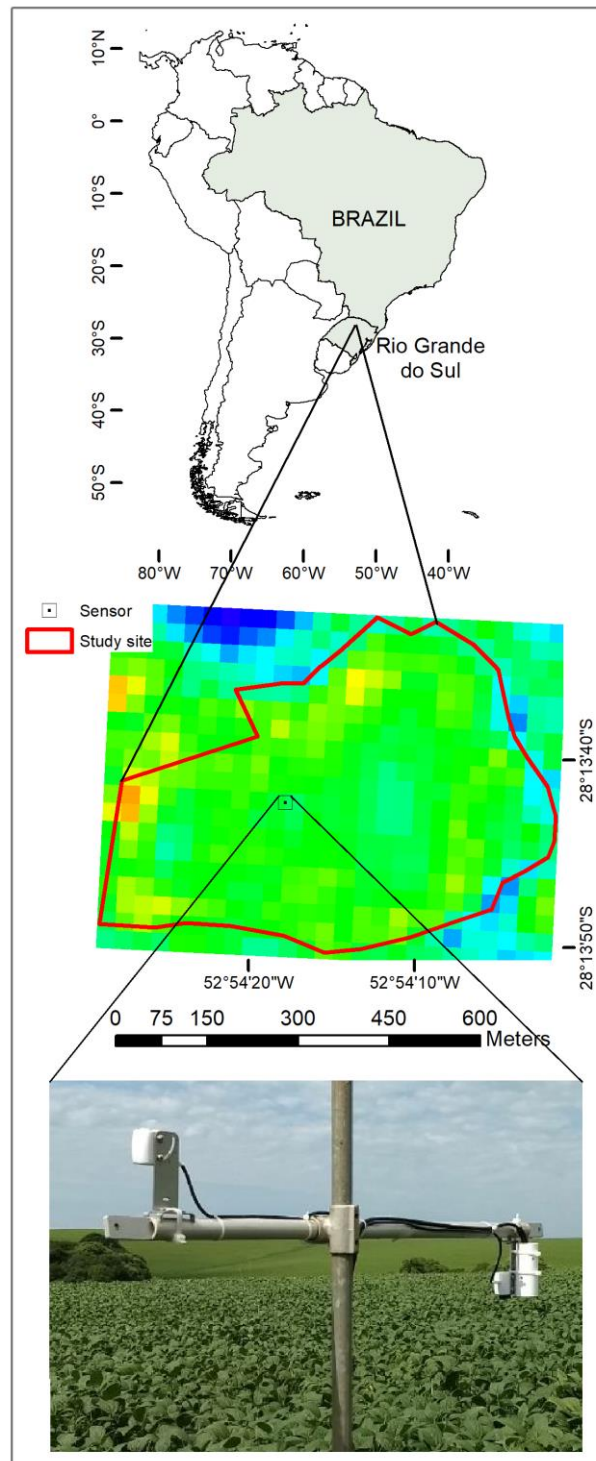
### 63 **Study area**

64 The study area is located in an agricultural region in southern Brazil, in the state of  
65 Rio Grande do Sul, in the Pampa biome, where most of the state's grain production is  
66 concentrated (Fig. 1). The experiment was conducted on-farm.

67 It is a region characterized mainly by agricultural areas of intensive summer and  
68 winter uses, with an altimetric variation from 700 to 1,389 m and climate classified as  
69 Cfa according to Köppen (Alvares et al. 2013).

70 The analyses covered the period from spring to summer of 2017-2018. The soybean  
71 crop, cultivar DM 5958 RSF IPRO, was sown in November, according to the agricultural  
72 calendar (11/13/2017) (Fontana et al. 2015) and the harvest occurred on 04/03/2018.

73



74

75 FIGURE 1. Location of the study area in southern Brazil in the state of Rio Grande do  
 76 Sul. Detail of the sensors installed in the experimental area in the soybean field.

77

## 78 **Surface measurements**

79 Surface measurements included biophysical and radiometric data observed in the

80 vegetation. The leaf area index (LAI) and phenological stages of soybean are among the  
81 biophysical data used to characterize the crop development.

82 The NDVI and  $T_s$  data were also obtained from continuous monitoring, with  
83 records every 15 minutes, using the Meter Group - Em50 series data logger. The  
84 radiometric sensors were mounted in pairs ( $T_s$ /NDVI) on the tower (Fig. 1), pointing in  
85 the same direction, with an angle of  $90^\circ$  at a height of approximately 1 m above the top  
86 of the canopy. The data from the field sensors were obtained at the time of the satellite  
87 passage (10:30 am), with an average of three measurements (10:15, 10:30, and 10:45 am)  
88 being extracted.

89 The NDVI sensor measured the incident and reflected radiation in the red spectrum  
90 (0.6 to 0.7  $\mu\text{m}$ ) and near-infrared (0.805 to 0.815  $\mu\text{m}$ ) (SRS-NDVI sensor- Meter Group).  
91 The hemispherical NDVI sensor was installed facing upwards to measure the incident  
92 radiation (Fig. 1), thus providing the reference values. The other NDVI sensor was  
93 installed facing downwards, with the field of view restricted to  $20^\circ$  to measure the  
94 reflected radiation from vegetation.

95 A  $T_s$  sensor also facing downwards was coupled next to this sensor to measure the  
96 radiation in the thermal spectrum (8 to 14  $\mu\text{m}$ ) emitted by the surface (SI 421 sensor -  
97 Apogee), with an  $18^\circ$  half-angle field of view.

98

## 99 **TVDI**

100 TVDI is obtained from the dispersion between  $T_s$  and NDVI (Equation 1), with  
101 dispersion in two-dimensional space usually triangular (Fig. 2) (Sandholt et al. 2002),  
102 establishing two limits that serve to normalize the model.

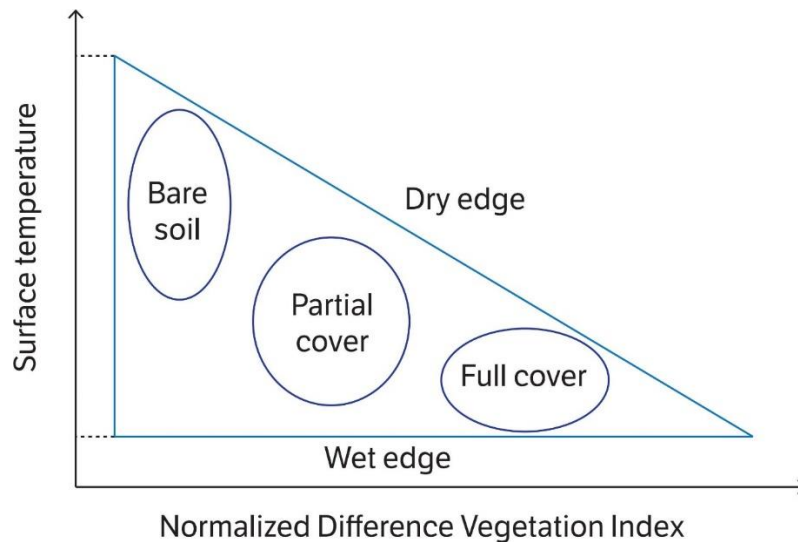
103 The wet limit is determined by the average  $T_{Smin}$ , being an indicator of the absence  
104 of water deficiency when  $TVDI = 0$ . The dry limit is an indicator of the existence of water

105 deficiency when TVDI = 1. The negative slope of the dry limit line of dispersion is related  
 106 to the surface evapotranspiration rate, being used to parameterize the model (Chen et al.  
 107 2015; Fuzzo & Rocha, 2018). The dry limit is obtained by the linear coefficient a and  
 108 angular coefficient b of the line obtained from the scatter plot between NDVI and  $T_s$ .

$$109 \quad TVDI = \frac{(T_s - T_{smin})}{(a + b \text{NDVI} - T_{smin})} \quad (1)$$

110 where  $T_s$  is the radiative temperature of the pixel (K),  $T_{smin}$  is the minimum surface  
 111 temperature (K), NDVI is the vegetation index, and a and b is the linear and angular  
 112 coefficients of the line, respectively.

113



114

115 FIGURE 2. Schematic representation of the evaporative triangle in two-dimensional  
 116 space between the surface temperature ( $T_s$ ) and the normalized difference vegetation  
 117 index (NDVI). Source: Schirmbeck et al. (2017).

118

### 119 **Meteorological water balance and evapotranspiration**

120 The response analysis of the TVDI index relative to the surface water conditions  
 121 was analyzed through the calculation of the meteorological water balance using the  
 122 methodology of Thornthwaite-Mather, (1955). The meteorological water balance was

123 calculated on a daily scale (Pereira, 2005), considering a  $K_c$  between 0.4 and 1.15 (Allen  
124 et al. 2006) and a variable available water capacity (AWC) during the cycle depending  
125 on the growth of plants and roots throughout the period (Dourado Neto et al. 1999). The  
126 reference evapotranspiration was estimated using the Penman-Monteith method (FAO)  
127 (Allen et al. 2006).

128 In this analysis, correlations were performed between the main water balance  
129 variables that are associated with soil water availability and the TVDI data measured in  
130 the field, using a total of 25 days. The T test ( $p < 0.05$ ) was applied to verify the  
131 consistency of the linear correlations.

132

### 133 **Landsat OLI/TIRS images**

134 The study area covers 309 pixels of Landsat images, which were used to construct  
135 the evaporative triangle. Four images without clouds or noise were obtained during the  
136 period of study. The wet and dry limits were defined using an area larger than that studied  
137 aiming to contain hot and cold pixels and, therefore, the  $a$ ,  $b$ , and  $T_{Smin}$  values, according  
138 to the methodology already used (Schirmbeck et al. 2018). The images were taken on  
139 November 20 (crop implantation), January 7 and February 8 (vegetative development),  
140 and February 24 (beginning of maturation).

141 The average values of NDVI,  $T_s$ , and TVDI of each image were extracted from a 3  
142  $\times$  3 window centered on the coordinates in which the sensors were installed. The image  
143 data were compared with the sensor measurements.

144

## 145 **RESULTS AND DISCUSSION**

146 The results showed consistency between the average data obtained from the crop,  
147 the sampling window, and the data measured by the sensors (Tab. 1). The mean absolute

148 errors showed values of 0.02 and 0.56 for NDVI and  $T_s$ , respectively.

149         The lowest NDVI values were observed at 55 days after sowing (DAS) (January 7).  
150 On this date, the soybean was at the beginning of flowering (R1 stage), with an LAI =  
151 4.4. Moreover,  $T_s$  was high, reaching values close to 28 °C, and TVDI presented  
152 intermediate values compared to the other dates.

153         The two images from February showed NDVI values higher than 0.9, a condition  
154 in which the saturation of the index is known to occur (Zhang et al., 2014; Fontana et al.  
155 2015; Mzid et al. 2020) when variations in green biomass do not lead to variations in the  
156 index. The period of highest vegetative development occurred in early February, when  
157 the crop was at the beginning of grain formation (R1), with an LAI higher than 8,  
158 coinciding with the occurrence of high surface temperatures. The high TVDI values  
159 expressed the occurrence of water deficiency in the soil-vegetation system in this period  
160 of the highest green biomass (TVDI higher than 0.6). In this situation, the leaves close  
161 the stomata, thus leading to an increase in the surface temperature (Allen et al. 2006; Chen  
162 et al. 2015; Holzman et al. 2018).

163

164

165

166

167

168

169

170

171

172

173 TABLE 1. Average values of the normalized difference vegetation index (NDVI), surface  
 174 temperature ( $T_s$ ), and temperature-vegetation dryness index (TVDI) obtained from  
 175 radiometric sensors and Landsat OLI/TIRS images for the entire crop and sampling  
 176 window on the measurement points (pixel) as a function of the days after sowing (DAS)  
 177 and phenological stage.

DAS	Image date	Stage	Type	NDVI	$T_s$	TVDI
			Window	0.88	28.31	0.57
55	Jan./07	R1	Crop	0.86	28.69	0.59
			Sensor	0.87	27.98	0.51
			Window	0.93	28.18	0.62
87	Feb./08	R5.1	Crop	0.92	28.73	0.69
			Sensor	0.90	29.09	0.70
			Window	0.92	26.76	0.42
103	Feb./24	R6	Crop	0.92	26.98	0.45
			Sensor	0.89	27.21	0.46

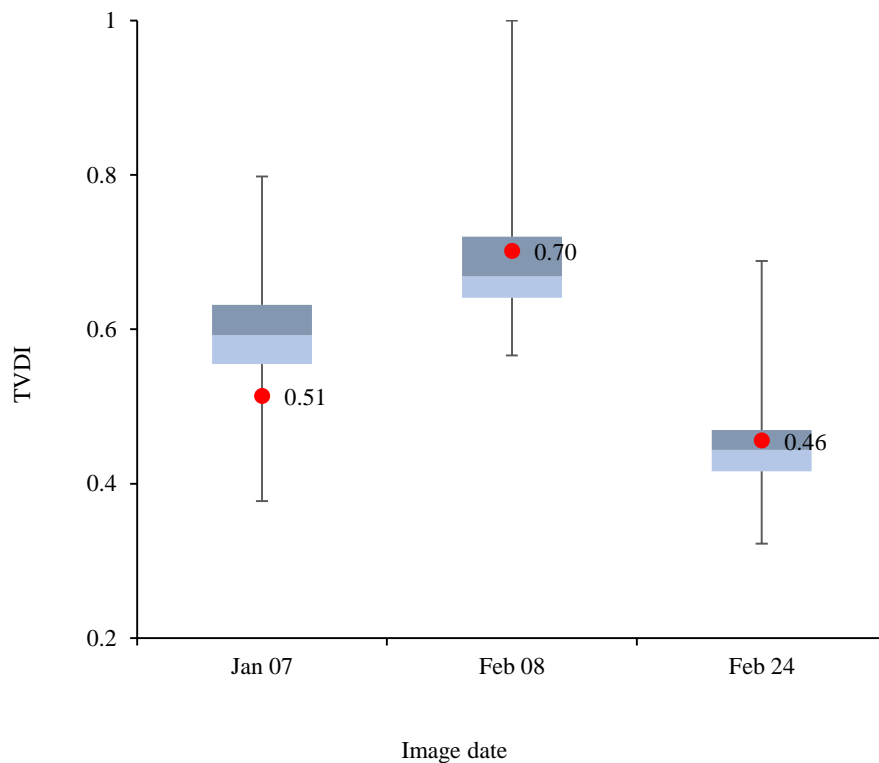
178

179 Also, the vegetation index is similar for the relationship between the TVDI index  
 180 and the surface temperature February 8 and February 24 (Schirmbeck et al. 2017b; Uniyal  
 181 et al. 2017), but the TDVI values reduced on the second date, reflecting the reduction in  
 182 temperature. Variations in NDVI are slow and continuous throughout the cycle of an  
 183 annual crop, and thermal variations can reveal variations in surface moisture, evidencing  
 184 the choice of the terms to compose TVDI (Holzman et al. 2018; Schirmbeck et al. 2018).

185 The precipitation observed at the end of February (70 mm from February 18 to 24)  
 186 was the only water input in the field and provided better water conditions and,  
 187 consequently, a reduction in TVDI values. Furthermore, the approach of the autumnal  
 188 equinox, with reduced energy available on the surface, led to a reduction in solar

189 radiation, decreased the evaporative demand of the atmosphere, and, therefore, the  
 190 surface temperature (Holzman et al. 2018; Schirmbeck et al. 2018).

191 Fig. 3 shows the coherence of the TVDI values measured by radiometric sensors  
 192 compared with the distribution of the values extracted from images for the 309 pixels that  
 193 cover the entire crop area. The value measured by the sensors on the two February dates  
 194 is shown in the central block of the boxplot, which represents 50% of the values observed  
 195 in the plot. Also, the central block of the boxplot had a small range of values for the three  
 196 dates, indicating the uniformity of water conditions in the field. Quartiles 0–25% and 75–  
 197 100% showed higher amplitudes, mainly the upper quartile of the image of February 8.  
 198 These results may indicate that the calibration of the data set generated by the sensors  
 199 onboard the Landsat satellite is adequate and generate consistent results when using these  
 200 data to calculate TVDI (Baghzouz et al. 2010; Balzarolo et al. 2011).



201

202 FIGURE 3. Box plot of TVDI data obtained from the pixels that make up the Landsat

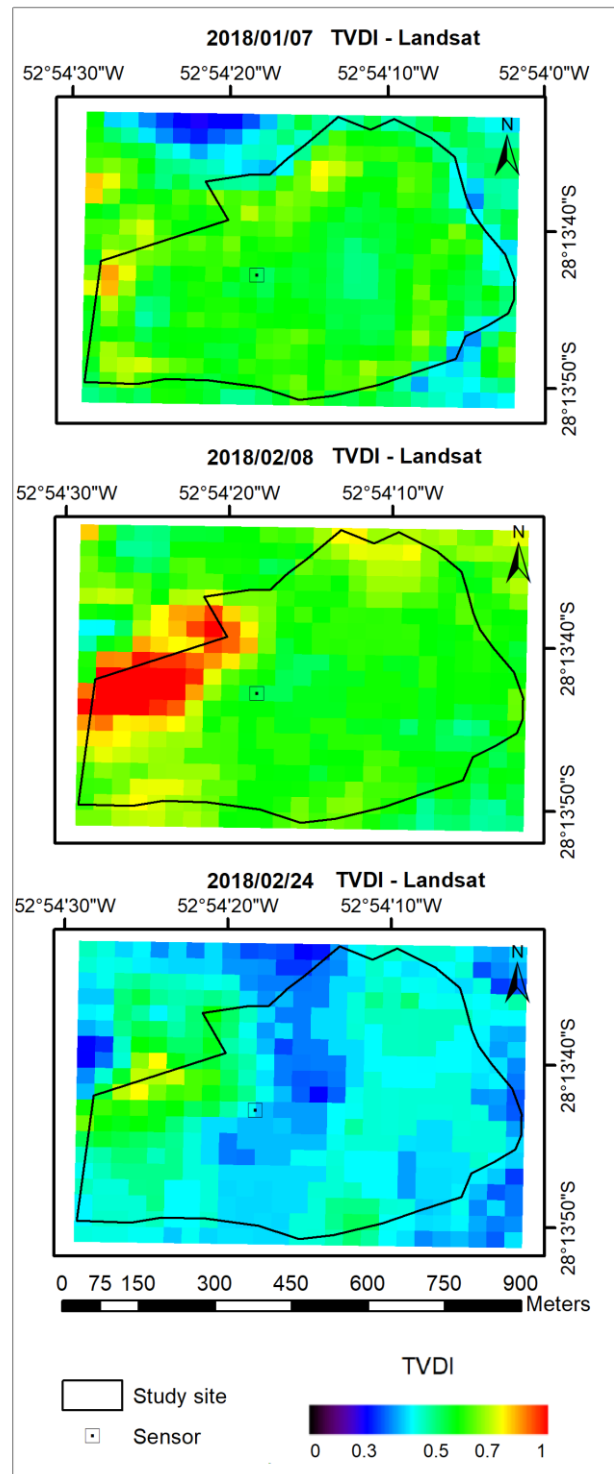
203 image. TVDI red dot obtained by field sensor measurements.



204 The spatial distribution of TVDI in the three dates is shown in Fig. 4. The range of  
205 colors varies from blue to red, and the closer to red, the higher the moisture deficiency on  
206 the surface (TVDI = 1). The images evidence the main advantage in using TVDI, that is,  
207 the spatialization of information and the possibility of analyzing the index variability in  
208 the space of interest. The image of February 8 shows the highest TDVI values in the upper  
209 left portion (in red) of the field, pixels that possibly caused the highest amplitude observed  
210 in the boxplot (Fig. 3). Low variability in water conditions is observed in the cultivation  
211 area, which is consistent with the average data (Tab. 1 and Fig. 3). The images of January  
212 7 and February 8 showed the highest TVDI values, mainly in February. The image of  
213 February 24 showed the lowest index values (blue predominates) when the crop was at  
214 the grain filling stage, a period that defines the final crop yield (Fontana et al. 2015).

215 The dispersions between TVDI and the main variables obtained from the  
216 meteorological water balance, which are associated with water availability, showed an  
217 association (Fig. 5). Positive linear correlations were found between TVDI and water  
218 deficit and negative correlations between TVDI and soil water storage, ETr, and the  
219 ETr/ET0 ratio, all significant according to the T test ( $p < 0.05$ ). Among the analyzed  
220 variables, soil water storage had the highest correlation coefficient ( $-0.72$ ), followed by  
221 soil water deficit ( $0.57$ ). Although the nature of these variables derived from water  
222 balance (moisture indicators) is different from the quantity expressed in TVDI, the result  
223 is encouraging, as it reveals coherence with what was expected. TVDI was obtained using  
224 an average of 309 pixels that cover the soybean crop, and the other variables were  
225 obtained using data from the weather station that characterizes the region.

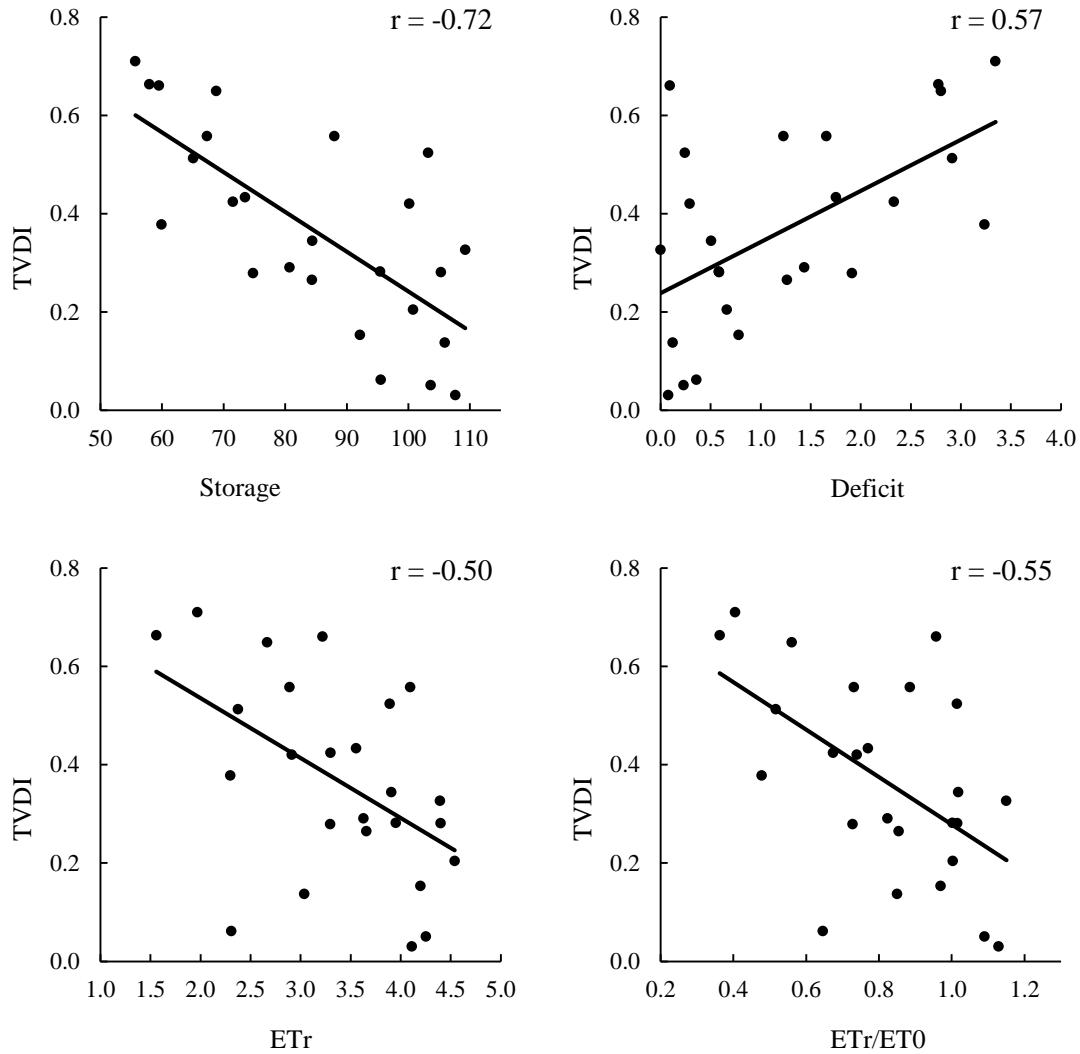
226



227

228 FIGURE 4. Spatial distribution of TVDI for the study area for Landsat OLI/TIRS images

229 of January and February. Detail for the location of the sensor installed on the surface.



230

231

232 FIGURE 5. Dispersions between TVDI and the main variables derived from the  
 233 meteorological water balance: Storage, Deficit, ETr, and ETr/ET0.

234

235

### CONCLUSIONS

236

237

238

The similarity of the NDVI and TS values obtained with surface sensors and those embedded in the Landsat-8 platform also defines similarity in the TVDI values derived from them.

239

240

241

Surface data are obtained with a high degree of measurement control and serve as a reference for the data obtained in the images. The images make it possible to represent the variability of surface moisture conditions within the crop or even within production

242 regions under the prevailing humid subtropical climate conditions in southern Brazil.

243 TVDI can therefore be recommended as an indicator of surface moisture and assist  
244 in agricultural monitoring systems, reducing risks associated with climatic variables and  
245 helping decision-making in the sector, becoming important in soybean production areas  
246 such as in the southern Brazil.

247

## 248 **REFERENCES**

249 Allen RG, Pereira LS, Raes, D, Smith, M. Evapotranspiración del Cultivo: Guías para  
250 la Determinación de los Requerimientos de Agua de los Cultivos. Roma: FAO. 2006,  
251 323p. (FAO: Irrigation and Drainage Paper, 56).

252 Alvares CA., Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G (2013). Köppen's  
253 climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22:711-728.

254 Dourado Neto D, García AG, Fancelli AL, Frizzone JA, Reichardt K (1999). Balance  
255 hídrico cíclico y secuencial: estimación de almacenamiento de agua em el suelo.  
256 *Scientia Agricola* 56(3):537-546.

257 Bai, J. Yu, Y. Di, L. (2017). Comparison between TVDI and CWSI for drought  
258 monitoring in the Guanzhong Plain, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 16:  
259 389–397.

260 Baghzouz M, Devitt D, Fenstermaker LF, Young MH (2010). Monitoring Vegetation  
261 Phenological Cycles in Two Different Semi-Arid Environmental Settings Using a  
262 Ground-Based NDVI System: A Potential Approach to Improve Satellite Data  
263 Interpretation. *Remote Sensing* 2:990-1013.

- 264 Balzarolo M, Anderson K, Nichol C, Rossini M, Vescovo L, Arriga N, Calvet JC,  
265 Carrara A, Cerasoli Salvatori S, Cogliati S (2011). Ground-based optical  
266 measurements at European flux sites: A review of methods, instruments and current  
267 controversies. *Sensors* 11:7954-7981.
- 268 Chen S, Wen Z, Jiang H, Zhao Q, Zhang X, Chen Y (2015). Temperature vegetation  
269 dryness index estimation of soil moisture under different tree species. *Sustainability*  
270 7:11401-11417.
- 271 Fontana DC, Pinto, DG, Junges AH, Bremm C (2015). Inferências sobre o calendário  
272 agrícola a partir de perfis temporais de NDVI/MODIS. *Bragantia* 74(3):350-358.
- 273 Fuzzo, D.F. da. S; Rocha, J.V. (2018). Simplify the triangle method for estimating  
274 evapotranspiration and its use in agrometeorological modeling. *Pesquisa Aplicada &*  
275 *Agrotecnologia*, 11:.07-15.
- 276 Holzman ME, Carmona F, Rivas R, Niclòs R (2018). Early assessment of crop yield  
277 from remotely sensed water stress and solar radiation data. *ISPRS Journal of*  
278 *Photogrammetry and Remote Sensing* 145:297-308.
- 279 Liu Y. Yue, H. (2018) The Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) Based on  
280 Bi-Parabolic NDVI-Ts Space and Gradient-Based Structural Similarity (GSSIM) for  
281 Long-Term Drought Assessment Across Shaanxi Province, China (2000–2016)  
282 *Remote Sensing*, 10, 959.
- 283 Matzenauer, R., Maluf, J.R.T., Radin, B. (2020). Regime de chuvas e produção de  
284 grãos no Rio Grande do Sul: impacto das estiagens e relação com o fenômeno El Niño  
285 Oscilação Sul. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 133 p. il. color. E-book.

- 286 Mzid, N. Cantore, V. Mastro, G. Albrizio, R. Sellami, MH. Todorovic, M. (2020).  
287 The Application of Ground-Based and Satellite Remote Sensing for Estimation of  
288 Bio-Physiological Parameters of Wheat Grown Under Different Water Regimes.  
289 12:2095.
- 290 Pereira, AR. (2005). Simplicando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather.  
291 *Bragantia* 64(2):311-313.
- 292 Ryu J, Han K. Lee Y. Park, N. Hong, S. Chung, C. Cho, J. (2019) Different  
293 Agricultural Responses to Extreme Drought Events in Neighboring Counties of South  
294 and North Korea. *Remote Sensing*, 11, 1773
- 295 Sandholt I, Rasmusen K, Andersen J. (2002). A simple interpretation of the surface  
296 temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote*  
297 *Sensing of Enviromenmt* 79:213-224.
- 298 Sayago S, Ovando G, Bocco M (2017). Landsat images and crop model for evaluating  
299 water stress of rained soybean. *Remote Sensing of Environment* 198:30-39.
- 300 Schirmbeck LW, Fontana DC, Schirmbeck J (2017)a TVDI spatiotemporal pattern of  
301 a soybean growing area in humid subtropical climate. *Bragantia* 76:447-455.
- 302 Schirmbeck LW, Fontana DC, Schirmbeck J, Mengue VP (2017)b Understanding  
303 TVDI as an index that expresses soil moisture. *Journal of Hyperspectral Remote*  
304 *Sensing* 7:82-90.
- 305 Schirmbeck LW, Fontana DC, Schirmbeck J (2018). Two approaches to calculate the  
306 TVDI in the humid subtropical climate of southern Brazil. *Scientia Agricola* 75:95-  
307 172.

- 308 Thornthwaite CW & Mather, JR (1955). The water balance. Publications in  
309 Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955, 104p.
- 310 Uniyal B, Dietrich J, Vasilakos C, Tzoraki O (2017). Evaluation of SWAT simulated  
311 soil moisture at catchment scale by field measurements and Landsat derived indices.  
312 *Agricultural Water Management* 193:55-70.
- 313 Wang, H.He, N. Zhao, R. Ma, X. (2020) Soil water content monitoring using joint  
314 application of PDI and TVDI drought indices. *Remote Sensing Letters*, 11:455-464.
- 315 Zhang, F., Zhang L., Shi, J. Huang J. (2014). Soil Moisture Monitoring Based on  
316 Land Surface Temperature-Vegetation Index Space Derived from MODIS Data.  
317 *Pedosphere*, 24:450–460.

**7.5 Artigo 5: MODIS e OLI/TIRS para estimar TVDI e a umidade da superfície em programas de monitoramento agrícola**



## **MODIS e OLI/TIRS para estimar TVDI e a umidade da superfície em programas de monitoramento agrícola**

**Resumo:** Um dos importantes desafios para a construção de sistemas eficazes de monitoramento da atividade agrícola é a definição de indicadores que representem de forma robusta a variabilidade espacial e temporal dos principais fatores de risco associados à produção. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi analisar como os padrões espaciais e temporais do TVDI (*Temperature-Vegetation Dryness Index*), obtido a partir dos sensores terrestres e orbitais em áreas de produção de soja no sul do Brasil, pode ser usado em sistemas operacionais de monitoramento agrícola. Para tanto, foram utilizadas imagens do sensor MODIS Terra e OLI/TIRS Landsat 8, assim como dados de sensores posicionados na superfície os quais serviram como referência. A área de estudo abrangeu uma lavoura de soja, onde foi conduzido o experimento ‘*On Farm*’, lavouras de soja mapeadas próximas ao experimento, e o município de Carazinho-RS, localizado no Bioma Pampa, no sul do Brasil. Na lavoura foi instalada uma estação radiométrica para medir na superfície os dados de NDVI e de Ts com a tecnologia similar a dos sensores colocados a bordo das plataformas orbitais. O período de análise foi a safra da soja de novembro de 2017 a abril de 2018. Dada a coerência do TVDI estimado pelos diferentes sensores, é possível o uso conjugado de sensores em uma proposta para um sistema de monitoramento de risco agrícola capaz de identificar os períodos de deficiências hídricas em relação as fases do desenvolvimento da cultura da soja, assim como seu detalhamento da distribuição espacial.

**Palavras chave:** agricultura, déficit hídrico, sensoriamento remoto, temperatura de superfície, NDVI.

**Abstract:** One of the important challenges for the construction of effective systems for monitoring agricultural activity is the definition of indicators that represent the robust spatial and temporal variability of the main risk factors associated with production. In this context, the objective of this study was to analyze how the spatial and temporal patterns of the TVDI (Index of Temperature of Dryness-Vegetation), from terrestrial and orbital sensors in soybean production areas in southern Brazil, can be used in systems agricultural monitoring operations. For this purpose, images from the MODIS Terra and OLI / TIRS Landsat 8 sensors were used, as well as data from sensors positioned on the servers' surface as a reference. The study area covered a soybean crop, where the 'On Farm' experiment was conducted, soybean crops mapped close to the experiment, in the municipality of Carazinho-RS, located in the Pampa Biome, in southern Brazil. In the field, a radiometric station was installed to measure NDVI and Ts data on the surface with a technology similar to that of sensors belonging to an edge of the orbital platforms. The analysis period was the soybean harvest from November 2017 to April 2018. Given the coherence of the TVDI estimated by the different sensors, it is possible to use sensors in conjunction in a proposal for an agricultural risk monitoring system capable of identifying the periods of water deficiencies in relation to the development phases of the soybean crop, as well as its details of the spatial distribution.

**Key words:** agriculture, water deficit, remote sensing, surface temperature, NDVI.

## Introdução

Um dos importantes desafios para a construção de sistemas eficazes de monitoramento da atividade agrícola é a definição de indicadores que representem de forma robusta a variabilidade espacial e temporal dos principais fatores de risco associados à produção (Fraisse et al., 2016; Radin & Matzenauer, 2016). No caso da

cultura da soja cultivada no sul do Brasil, o fator de risco de maior importância é a ocorrência de deficiência hídrica (Sentelhas et al. 2015, Zanon et al. 2016, Matzenauer et al. 2020).

A umidade da superfície, portanto, é uma variável chave neste cenário e pode ser, tanto medida por métodos diretos, como estimada por métodos indiretos. Avaliar a umidade da superfície de forma indireta pode ser muito eficaz e conveniente, na medida em que reduz o uso de mão de obra e de gastos e exige menos tempo, sendo especialmente útil em estudos que abrangem grandes áreas de produção agrícola (Uniyal et al. 2017). Uma das formas de obtê-la indiretamente e que vem ganhando cada vez mais espaço no contexto agropecuário é através do uso de técnicas de sensoriamento remoto. As imagens de satélites são consideradas uma das melhores tecnologias para coleta sistemática de dados no monitoramento das atividades agrícolas, podendo ser obtidos dados com uso de sensores portáteis, drones ou sensores orbitais (Tsukahara et al., 2016). Sabe-se que utilizar dados provenientes de diferentes sensores de forma complementar auxiliam no monitoramento, mas ainda há carência de estudos específicos para diferentes indicadores propostos.

Sandholt et al. (2002) propuseram estimar a umidade da superfície usando uma abordagem empírica que relaciona, num espaço bidimensional, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e a Temperatura de Superfície ( $T_s$ ) resultando no TVDI (*Temperature-Vegetation Dryness Index*). Estudos tem demonstrado que o TVDI é um robusto indicador da umidade da superfície tanto em climas secos (Sandholt et al. 2002,) como úmidos (Holzman et al 2014, Uniyal et al., 2017, Schirmbeck et al., 2018), o que é consequência do uso de informações sobre o estado da vegetação e suas variações de temperatura, ambos determinados pelo fator umidade (Sandholt et al., 2002, Chen et al., 2015, Wang et al., 2020). Schirmbeck et al. (2021) “no prelo” demonstraram que,

especificamente para as regiões de produção da cultura da soja no Rio Grande do Sul, o índice TDVI é robusto, apresentando correlação significativa com diversas variáveis (armazenamento, déficit, ETr, ETr/ET0 e umidade) associadas à condição hídrica do sistema solo – água – planta.

O TVDI pode ser calculado a partir de dados oriundos de diferentes plataformas, desde que tenham sensores capazes de fornecer dados de NDVI e de Ts, o que gera informações em diferentes escalas espaciais e temporais. O mais frequente são os estudos com o TVDI oriundos dos sensores TM e OLI, do Landsat (Gao et al., 2011, Chen et al., 2015, Li et al., 2016, Sayago et al., 2017, Wang et al., 2020) e também do sensor MODIS, do Terra (Chen et al., 2011, Son et al., 2012, Garcia et al. 2014, Sun et al., 2017).

O uso do TVDI no contexto de sistemas operacionais de monitoramento agrícola ainda carece de pesquisas que caracterizem as semelhanças e diferenças no TVDI oriundo de diferentes sensores e a viabilidade do uso do índice obtido de a partir de diferentes plataformas de forma conjunta e complementar, assim como estabelecer protocolos de uso.

Assim o objetivo deste estudo foi analisar como os padrões espaciais e temporais do TVDI, obtido em áreas de produção de soja no sul do Brasil, a partir dos sensores terrestres e orbitais (OLI/TIRS e MODIS), pode ser usado de forma eficiente em sistemas operacionais de monitoramento agrícola.

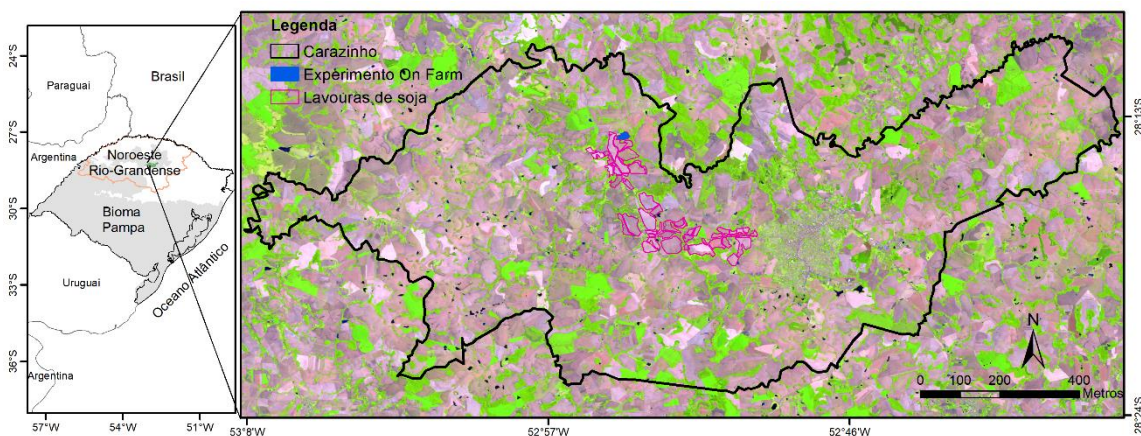
## **Material e Métodos**

### **Área de Estudo**

A área de estudo abrange o município de Carazinho-RS, localizado no Bioma Pampa, no sul do Brasil (Figura 1). Na Figura 1 estão em destaque o município de

Carazinho, a lavoura onde foi conduzido o experimento, em azul, e lavouras de soja (magenta) mapeadas próximas ao experimento. O município de Carazinho se destaca pela produção de soja no cenário agrícola do RS, onde, segundo dados do levantamento agrícola na safra de 2018, do total de 46,2 mil hectares de área plantada no município, 40,4 mil hectares são de lavouras de soja. A mesorregião noroeste, onde se localiza o município, corresponde a mais de 60 % da produção do RS (IBGE/SIDRA).

O experimento foi conduzido no formato ‘*On Farm*’ numa parceria entre a Embrapa Trigo de Passo Fundo, a Granja Capão Grande e a Faculdade de Agronomia da UFRGS. A área total da Granja é de 553,7 ha, sendo intenso o cultivo da soja, o qual ocupa 455 ha, tendo o experimento uma área de cerca de 27,4 hectares.



**Figura 1.** Localização da área de estudo no estado do Rio Grande do Sul, na mesorregião noroeste o município de Carazinho/RS. Imagem Landsat-8 de 20 de novembro de 2017, órbita/ponto (222/80).

O clima da área de estudo segundo Alvares et al., (2013), utilizando a metodologia da classificação de Köppen, é subtropical úmido, do tipo Cfa, com verões quentes e chuvas com distribuição regular ao longo do ano. Localizada no planalto meridional o cultivo predominante no verão é a soja (Guasseli et al., 2006), conduzida

majoritariamente sem irrigação, onde a única entrada de água é proveniente pela precipitação pluvial.

O período de estudo foi de novembro de 2017 a abril de 2018, a soja foi semeada em 13 de novembro de 2017, a emergência ocorreu em 21 de novembro de 2017 e a colheita foi realizada em 03/04/2018. O rendimento de grãos atingido foi de 4.629 kg ha<sup>-1</sup>. Mais detalhes da condução da lavoura estão descritos em Schirmbeck et al. (2019).

### **TVDI**

Conforme proposto por Sandholt et al., (2002), os dados de entrada para o cálculo do TVDI são a  $T_s$  e o NDVI (Equação 1), os quais foram obtidos com diferentes sensores.

$$TVDI = \frac{(T_s - T_{smin})}{(a + b \cdot NDVI - T_{smin})} \quad (1)$$

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; NDVI o índice de vegetação; “a” e “b” os coeficientes linear e angular da reta que representa o limite seco, obtidos a partir do gráfico de dispersão entre o NDVI e a  $T_s$  e são utilizados para normalização do modelo TVDI.

O triângulo evaporativo, obtido pela dispersão no espaço bidimensional entre a  $T_s$  e o NDVI, delimita os diferentes tipos de cobertura de solo que podem ser encontrados na superfície e a sua umidade. Para os pontos mais próximos ao limite seco, representado pela inclinação da reta  $T_s/NDVI$ , o TVDI é igual a 1 e indica ocorrência de deficiência de umidade. Quando o TVDI é igual a zero, os pontos estão localizados no limite úmido, dado pela temperatura de superfície mínima média do período analisado (Sandholt et al. 2002).

A delimitação dos limites úmido e seco e obtenção da dispersão no formato de triângulo é denominada parametrização do índice e, neste trabalho foi feita abrangendo todo o ciclo da soja, conforme proposto por Schirmbeck et al. (2018). Como o TVDI é um índice que fornece uma estimativa da umidade de forma relativa aos limites úmido e seco, a parametrização por safra, utilizando todas as imagens disponíveis durante o período de interesse, é necessária para permitir a avaliação das variações no TVDI entre datas ao longo da safra.

Visando o uso integrado e complementar do TVDI como indicador da umidade da superfície em sistemas de monitoramento da cultura, o índice foi determinado em diferentes escalas espaciais e temporais de aquisição de dados.

### **Sensores na superfície**

Foi instalada uma estação radiométrica no experimento '*On Farm*' para medir na superfície os dados de NDVI e de  $T_s$  com a tecnologia similar a dos sensores colocados a bordo das plataformas orbitais e, assim, servirem de referência para análise dos dados de TVDI obtidos de forma orbital. O NDVI foi medido com sensores SRS - Meter Group e para temperatura de superfície ( $T_s$ ) foi usado sensor modelo SI 421- Apogee. Para armazenamento dos dados se utilizou o datalogger EM50 - Meter Group com registros a cada 15 minutos.

Com os sensores de NDVI foi medido o fluxo de radiação incidente e refletida no espectro do vermelho (0,6 a 0,7  $\mu\text{m}$ ) e do infravermelho próximo (0,805 a 0,815  $\mu\text{m}$ ). Um dos sensores, o hemisférico, voltado para o céu, foi instalado 1 m acima do dossel da soja e mediu a radiação eletromagnética incidente; um segundo sensor, direcional, voltado para a superfície, mediu a radiação refletida pela superfície (soja/solo), que se restringiu ao campo de visão de 20°. O sensor de  $T_s$  mediu a radiação emitida pela superfície no

espectro do infravermelho termal (8 a 14  $\mu\text{m}$ ) com campo de visada de meio ângulo de 18°. Os sensores de  $T_s$  e NDVI direcional foram instalados em par, com ângulo de 90° apontando para a mesma área.

### **Imagens de satélite**

A determinação do TVDI a partir de imagens foi feita utilizando dados provenientes de dois sensores orbitais com características distintas, OLI/TIRS do Landsat-8 e o MODIS do Terra.

Para a parametrização do TVDI na safra em estudo foram utilizadas 4 imagens do sensor OLI/TIRS referentes às datas de 20/11/2017 e 7/01, 8/02 e 24/02/2018, para a órbita/ponto 222/80. Para tanto, foi utilizado o produto NDVI diário da base de dados da USGS – ESPA (*United States Geological Survey – Center Science Processing Architecture*), na resolução de 30 m nas bandas do vermelho (banda 4) e do infravermelho próximo (banda 5), e também, as bandas do termal, banda 10 e 11, com resolução de 100 m. A  $T_s$  foi estimada com o algoritmo *split-window* proposto por Jiménez-Muñoz et al. (2014) já testado pelos autores (Schirmbeck et al., 2017b, 2019). Para o cálculo do TVDI foram obtidos os triângulos evaporativos a partir de mais de 739k pixels presentes na área de estudo no município de Carazinho. Nas imagens OLI/TIRS foram aplicados os dados de qualidade, tirando assim os efeitos de nuvem e sombra, também foi aplicada máscara para a área urbana.

No caso das imagens do sensor MODIS, na parametrização para o período da safra da soja foram utilizadas imagens do período que se estendeu de 01/11/2017 a 23/04/2018 (total de 12 imagens), disponível na base de dados LP DAAC (*Land Processes database Distributed Active Archive Center*). As imagens foram dos quadrantes h13v11 e h13v12 e englobam todo o Estado do Rio Grande do Sul, o que é necessário, de forma a abranger



diferentes tipos de cobertura e umidade da superfície, em imagens com resolução espacial de 1 km. As imagens de NDVI foram do produto MOD13A2, na forma de composição de imagens de máximo valor em 16 dias. Para  $T_s$  foi utilizado o produto MOD11A2, na forma de composição corresponde aos primeiros 8 dias, obtido de imagens nos períodos do dia e da noite, com ausência de nuvens, utilizando o método *split-window* (Schirmbeck et al. 2018, 2019). Para o cálculo do TVDI foram obtidos os triângulos evaporativos a partir de mais de 309k pixels, que compreende toda a área do Estado do Rio Grande do Sul, isso devido ao menor detalhamento espacial do sensor.

### **Análise dos dados**

As análises foram organizadas em três etapas, visando abranger os principais aspectos relacionados ao uso do TVDI em sistemas operacionais de monitoramento.

Na primeira etapa foram construídos, conforme já descrito, e comparados os parâmetros de ajuste dos triângulos evaporativos obtidos com os sensores OLI/TIRS e MODIS e discutidos os procedimentos para o seu ajuste.

A segunda etapa avaliou a coerência dos dados de TVDI gerados com diferentes sensores. Se estimou os valores de TVDI, NDVI e  $T_s$  para o ponto de coleta de dados dos sensores, para a parcela na qual está implementada o experimento, para as lavouras de soja no entorno e para todo o município de Carazinho. Foram obtidas as estatísticas em janela 3 x 3 para ambos os satélites, abrangendo 90 x 90 m para OLI/TIRS e 3000 x 3000 m para MODIS, e estes valores foram analisados em conjunto com os dados obtidos em superfície na estação radiométrica. As análises foram o cálculo dos valores médios, a variabilidade e também construídos histogramas de distribuição de frequência. No perfil do município de Carazinho ( $TVDI_{OLI/TIRS-Mun}$ ) não foram apresentados os dados da imagem de 07/jan, pois a cobertura de nuvens, não possibilitou obter essa estatística a

nível de município, apenas para o  $TVDI_{OLI/TIRS-Lav}$ , das lavouras de soja no entorno do experimento.

Na última etapa foi explorada uma das possibilidades de uso do TVDI em sistemas operacionais de monitoramento agrícola integrando dados OLI/TIRS e MODIS. Na proposta foram apresentadas as imagens do índice em escala regional (todo o estado) e o perfil temporal do índice ao longo da safra da soja, ambos obtidos a partir do sensor MODIS, visando o entendimento regional e o padrão temporal. Também foi apresentado o detalhamento espacial do índice a nível de parcela agrícola, com o uso conjunto das imagens MODIS e OLI/TIRS, esse detalhamento foi temporalmente definido de acordo com período crítico da soja à restrição hídrica, período de maior risco de perdas.

## **Resultados e Discussão**

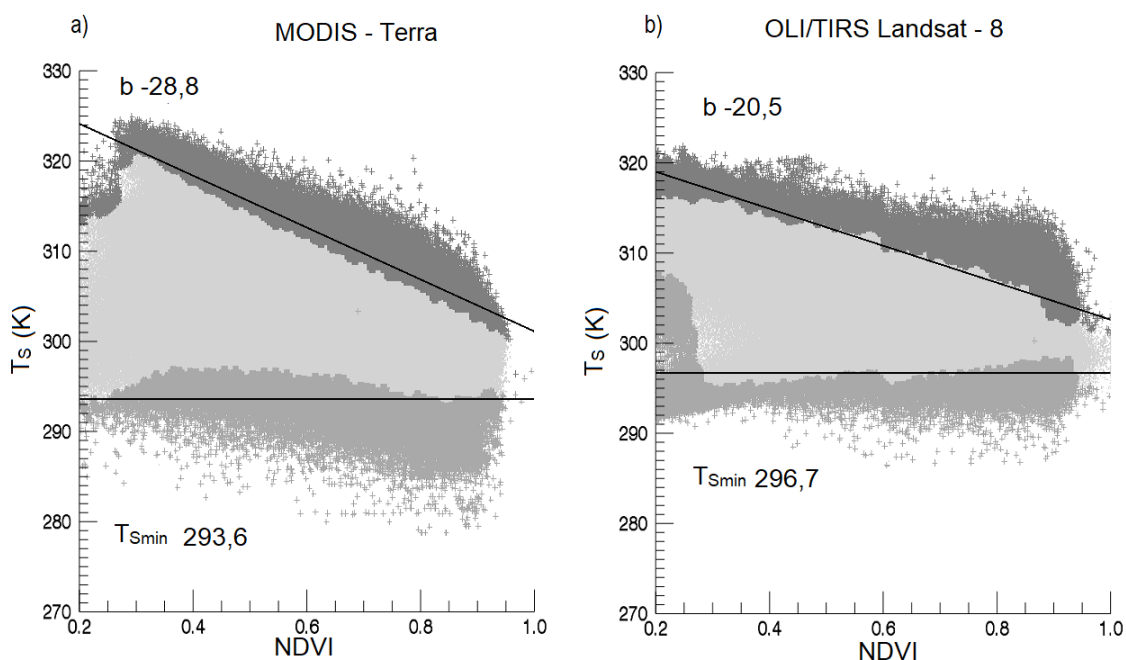
### **Ajuste do triângulo evaporativo**

As características inerentes aos sensores OLI/TIRS e MODIS definem que os triângulos evaporativos obtidos pela parametrização no período da safra da soja sejam semelhantes, mostrando coerência entre os sensores, porém com diferenças nos valores dos limites seco e úmido.

O triângulo MODIS (Figura 2a) apresentou, quando comparado ao OLI/TIRS, menores valores de  $T_{Smin}$  (293,6 K) e uma maior inclinação negativa da reta do limite seco (-28,8), que está associada à taxa de evapotranspiração da superfície (Chen et al., 2015; Silva-Fuzzo & Rocha, 2016). O triângulo OLI/TIRS teve  $T_{Smin}$  (296,7 K) mais elevada e uma menor inclinação negativa da reta (-20,5). Estas diferenças, nos limites seco e úmido podem ser explicadas por englobarem características de distintas datas e pelas diferentes resoluções espaciais e temporais distintas dos sensores orbitais. No caso do MODIS foram utilizadas na parametrização um número maior de imagens (de novembro e abril)

e uma área maior de abrangência espacial (RS) e, em consequência, apresentou maior inclinação negativa, indicando que as condições de umidade da superfície são mais contrastantes (Schirmbeck et al., 2019).

É importante enfatizar que em estudos que visem comparar as condições de umidade da superfície ao longo do ciclo de desenvolvimento de culturas anuais é imperativo o ajuste do triângulo evaporativo que abranja toda safra (Schirmbeck et al., 2018). Assim, na construção do triângulo estarão representadas as condições hídricas extremas de todo o período em análise, tornado os limites seco e úmido fixos, o que é fundamental para o estabelecimento de comparações ao longo do tempo, dado que o TVDI é um índice relativo a estes limites. Caso o ajuste seja feito em cada data separadamente, um mesmo valor de TVDI pode em diferentes datas estar representando condições hídricas distintas.



**Figura 2.** Triângulo evaporativo obtido do: a) sensor MODIS – Terra para o Rio Grande do Sul e b) sensor OLI/TIRS do Landsat-8, para o município de Carazinho, safra 2017/18.

### Coerência do TVDI entre sensores

Observa-se na Figura 3 que os TVDIs obtidos pelos diferentes sensores tiveram um padrão de variação no tempo semelhante, apresentando coerência na magnitude dos valores, apesar das sabidas diferenças de tamanho da área amostrada em cada conjunto de dados coletados. Nesta figura, entretanto, fica explicitada algumas das diferenças importantes entre os sensores, que tem consequência no tipo de utilidade do índice no caso de ser incorporado em sistemas de monitoramento agrícola.

Como esperado (Silva-Fuzzo & Rocha, 2016; Uniyal et al. 2017; Holzman et al. 2018), quanto maior o TVDI, maior é a deficiência hídrica o que se observa, por exemplo, no início da safra, no mês de novembro quando ocorrem os maiores valores do TVDI ( $TVDI_{OLI/TIRS}$  0,77 em 20 de novembro e  $TVDI_{MODIS}$  0,65 em 17 de novembro no acumulado de 16 dias).

Quando analisado o conjunto dos dados TVDI obtidos dos sensores instalados na lavoura, com a estação radiométrica ( $TVDI_{sup}$ ), se verifica a variabilidade associada ao padrão diário do índice. Dado que os valores de NDVI estão associados à biomassa verde (Junges et al., 2019; Prabhakara et al., 2015) e são bastante estáveis entre um dia e outro, esta alta variabilidade no TVDI entre os dias de medição decorre da alta sensibilidade do índice às variações de temperatura na superfície (Schirmbeck et al., 2017b), o que também está associado com a ocorrência ou não de eventos de precipitação.

Observa-se ainda que o TVDI obtido com o sensor OLI/TIRS ( $TVDI_{OLI/TIRS}$ ) apresentou valores em geral superiores aos obtidos com o MODIS ( $TVDI_{MODIS}$ ). Essa diferença pode ser atribuída principalmente porque o sensor OLI/TIRS está capturando a lavoura de soja (janela de 90 x 90 m), já o sensor MODIS apresenta um contexto mais amplo (janela de 3000 x 3000 m). Mas o padrão obtido com os dados dos dois sensores

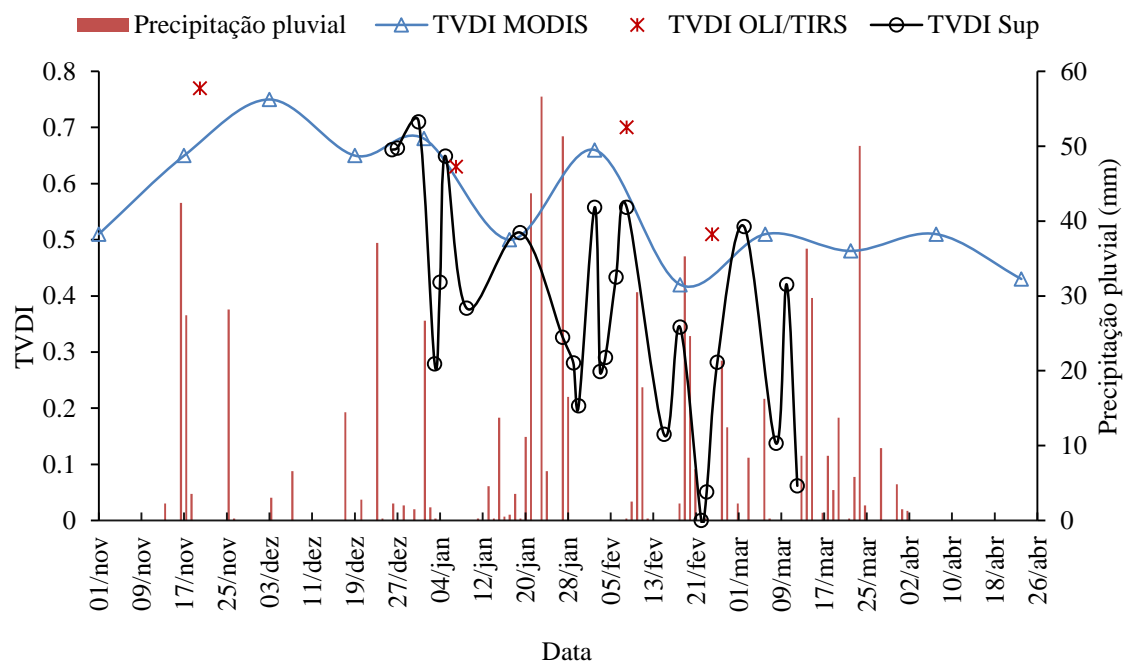
orbitais foi coerente. Altos valores ocorreram no início da safra, sendo o maior valor observado para o  $TVDI_{OLI/TIRS}$  em 20/11 e para o  $TVDI_{MODIS}$ , na sequência em 3/12. Nas imagens de 07/01 e de 19/01, respectivamente dos sensores OLI/TIRS e MODIS, se observou uma redução do índice, o que pode ser atribuído aos eventos de chuva que ocorreram nos dias 23/12 e 01/01 que totalizaram mais de 60 mm. Nas imagens de 02/02 e 08/02, respectivamente dos sensores MODIS e OLI/TIRS, o índice volta a crescer, isso devido a uma sequência de dias secos antes da captura destas imagens. No próximo par de imagens 18/02 e 24/02, respectivamente dos sensores MODIS e OLI/TIRS, apresentaram nova redução de valores, associada a 4 eventos significativos de precipitação que ocorreram nos 8 dias antes da captura destas imagens.

O  $TVDI_{sup}$  foi determinado a partir de dados obtidos no ponto de instalação dos sensores na lavoura e serviu neste estudo somente como referência para análise dos dados orbitais. Este dado tem como ponto positivo a alta frequência no tempo, porém com representação espacial restrita à área de visada do sensor (na instalação de 1m de altura tem diâmetro de 64cm). No contexto da agricultura de precisão, estes sensores, ou outros similares, poderiam ser embarcados em plataformas terrestres, ou mesmo em drones, e gerar mapas com a distribuição espacial detalhada do TVDI da lavoura.

A variabilidade dentro da lavoura pode ser vista nos dados  $TVDI_{OLI/TIRS}$ , com um nível de detalhamento compatível com a resolução espacial do sensor de temperatura, no caso 90 m. É um dado útil para detalhar grandes lavouras ou mesmo amplas regiões de produção, porém com um número restrito de imagens em função da revisita e da nebulosidade, que na safra avaliada foi de 4 imagens ao longo do ciclo.

Já o  $TVDI_{MODIS}$ , como usa uma composição de 16 dias (diferente de um dado instantâneo), apresenta como ponto positivo a representação contínua ao longo da safra identificando padrões temporais ao longo da mesma; no ciclo da soja em análise foram

12 imagens. Neste caso, a escala de obtenção da informação é de 1000 m, próprio para ser utilizado em monitoramento de grandes áreas, escala regional.

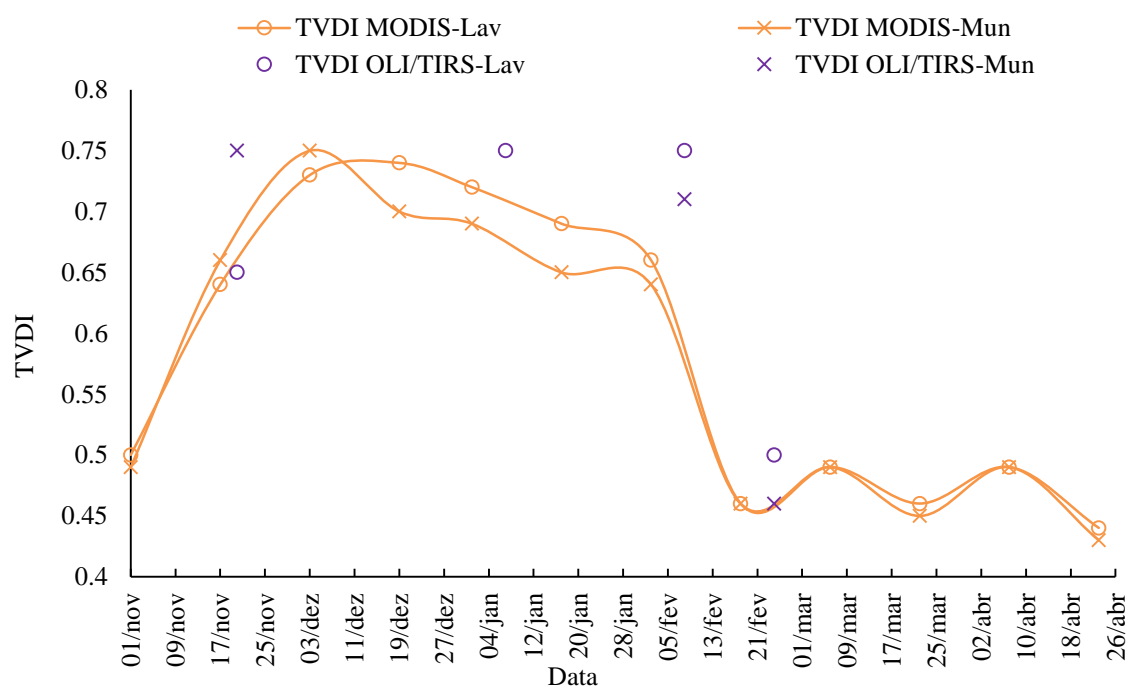


**Figura 3.** Perfil temporal do índice de umidade da superfície (TVDI) calculado usando sensores instalados na superfície ( $TVDI_{sup}$ ), para os pixels que compõem uma janela 3 x 3 obtidos pelo sensor MODIS ( $TVDI_{Modis}$ ) e pelo sensor OLI/TIRS ( $TVDI_{OLI/TIRS}$ ) e dados diários de precipitação pluviométrica ao longo da safra de soja 2017/18. Carazinho-RS

### Uso do TVDI em sistemas de monitoramento

Ao ampliar a escala do estudo e considerar também o município de Carazinho como um todo, se observa coerência na tendência ao longo da safra nos valores de TVDI obtidos pelos sensores orbitais OLI/TIRS e MODIS (Figura 4). Os valores do  $TVDI_{OLI/TIRS}$ , da mesma forma que observado na parcela do experimento (Figura 3), apresentaram valores um pouco acima dos observados com o  $TVDI_{MODIS}$ . Mesmo assim, a tendência do perfil  $TVDI_{MODIS}$  também é observada nos dados  $TVDI_{OLI/TIRS}$ . Importante salientar que o  $TVDI_{OLI/TIRS}$  descreve o a condição ocorrida em um dia específico,

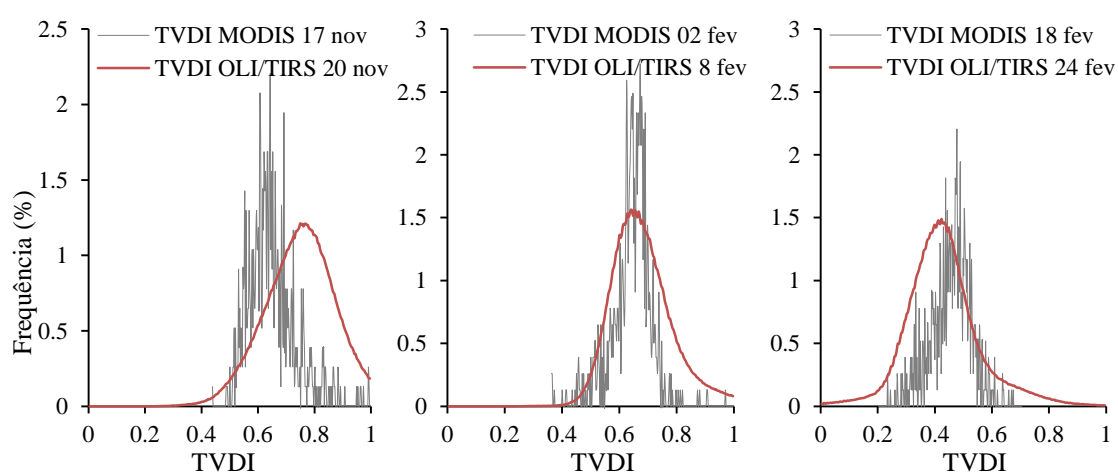
enquanto que  $TVDI_{MODIS}$  reflete a condição ocorrida em um período de 16 dias do produto NDVI, carregando, portanto, informações de certa forma, distintas e que podem explicar parte das diferenças de magnitude nos dados. Também se observa que o valor médio do TVDI em cada data, com ambos sensores, para as lavouras selecionadas do entorno da área experimental e as lavouras de todo o município de Carazinho foram similares. Isto decorre do fato do cultivo de soja ocupar cerca de 60% da área do município (IBGE, SIDRA 2021) e possivelmente da adoção pelos agricultores da região de práticas de manejo da cultura também semelhantes, o que acaba por impactar de forma similar os valores de NDVI e Ts e, portanto do TVDI, nas lavouras e em todo o município. Estas características conferem a esta região de produção facilidades em termos de monitoramento e integração de informações provenientes de diferentes sensores.



**Figura 4.** Perfil temporal do índice de umidade da superfície obtido com o OLI/TIRS ( $TVDI_{OLI/TIRS}$ ) e MODIS ( $TVDI_{MODIS}$ ) obtidos para lavouras (Lav) selecionadas e para o município (Mun) de Carazinho.

A partir da análise do conjunto de dados provenientes das imagens orbitais é possível avaliar a variabilidade em relação aos valores médios (Figura 5 e Tabela 1). A região como um todo apresentou deficiência no início do ciclo, até meados de fevereiro. Após, a condição hídrica foi adequada com redução dos valores do índice em praticamente toda a região. Nos pares de imagens 17 nov e 20 nov, assim como de 02 fev e 08 fev observa-se maiores TVDI médios, maior variabilidade com a ocorrência de valores próximos de 1, o que indica a situação hídrica pode ser preocupante no período. Já no par de imagens de 18 fev e 24 fev observa-se menor valor médio e menor variabilidade, valores mais distantes do 1, indicando situação hídrica satisfatória.

Dentre os histogramas analisados, as imagens do mês de novembro são as que os dois sensores apresentaram maiores diferenças (nos histogramas, Figura 5 e valores médios, Tabela 1). Isto pode ser atribuído a uma maior mistura espectral do solo e da vegetação no início do ciclo detectada de forma distinta pelos sensores MODIS e OLI/TIRS. Ainda, nos histogramas das imagens MODIS observamos a ocorrência de picos e depressões nas frequências, o que se atribui a resolução espacial destas imagens.



**Figura 5.** Histogramas de frequência de ocorrência dos valores de TVDI obtidos para as lavouras de soja no município de Carazinho pelo sensor OLI/TIRS ( $TVDI_{OLI/TIRS}$ ), em



laranja e pelo sensor MODIS ( $TVDI_{MODIS}$ ), em cinza, nos períodos de novembro/2017 e fevereiro/2018.

**Tabela 1.** Valores médios e desvio padrão do TVDI obtidos para o município de Carazinho pelo sensor OLI/TIRS ( $TVDI_{OLI/TIRS}$ ) do satélite Landsat-8 e pelo sensor MODIS ( $TVDI_{MODIS}$ ) do satélite Terra.

TVDI	20/nov	17/nov	08/fev	02/fev	24/fev	18/fev
	$TVDI_{OLI/TIRS}$	$TVDI_{MODIS}$	$TVDI_{OLI/TIRS}$	$TVDI_{MODIS}$	$TVDI_{OLI/TIRS}$	$TVDI_{MODIS}$
Médio	0,732	0,655	0,660	0,644	0,414	0,458
Desvio Padrão	0,194	0,093	0,172	0,072	0,156	0,072

A coerência entre os resultados apresentados por ambos os sensores indicou esta possibilidade do uso conjugado dos mesmos para fins de monitoramento agrícola. A partir da obtenção do perfil temporal do índice ao longo da safra, usando o produto  $TVDI_{MODIS}$ , é possível caracterizar a condição hídrica no período. Esta é um resultado importante, visto que a busca por índices robustos que permitam visualizar de forma clara a ocorrência e variabilidade das informações é essencial a sistemas de monitoramento (Fraisse et al., 2016; Ravelo et al., 2016).

Numa análise subsequente, pode-se usar os dados do índice  $TVDI_{OLI/TIRS}$  para detalhar a distribuição espacial da informação nas áreas de risco, levando a um melhor entendimento dos impactos que a variabilidade das condições meteorológicas pode vir a provocar quando ocorre nas fases fenológicas críticas das culturas, ajudando nas tomadas de decisões e minimizando os riscos (Fraisse et al., 2016). Com esta concepção, a Figura 6 exemplifica uma possibilidade de uso do TVDI como indicador da condição hídrica da superfície em um sistema de monitoramento, focando especialmente no detalhamento e mapeamento das áreas de risco, que são fundamentais de serem feitos especialmente durante o período crítico da cultura à restrição hídrica. Esta informação é útil à tomada

de decisão, aumentando a eficiência do uso de recursos, e garantindo a estabilidade da produção agrícola (Fraisse et al., 2016; Romani et al., 2016).

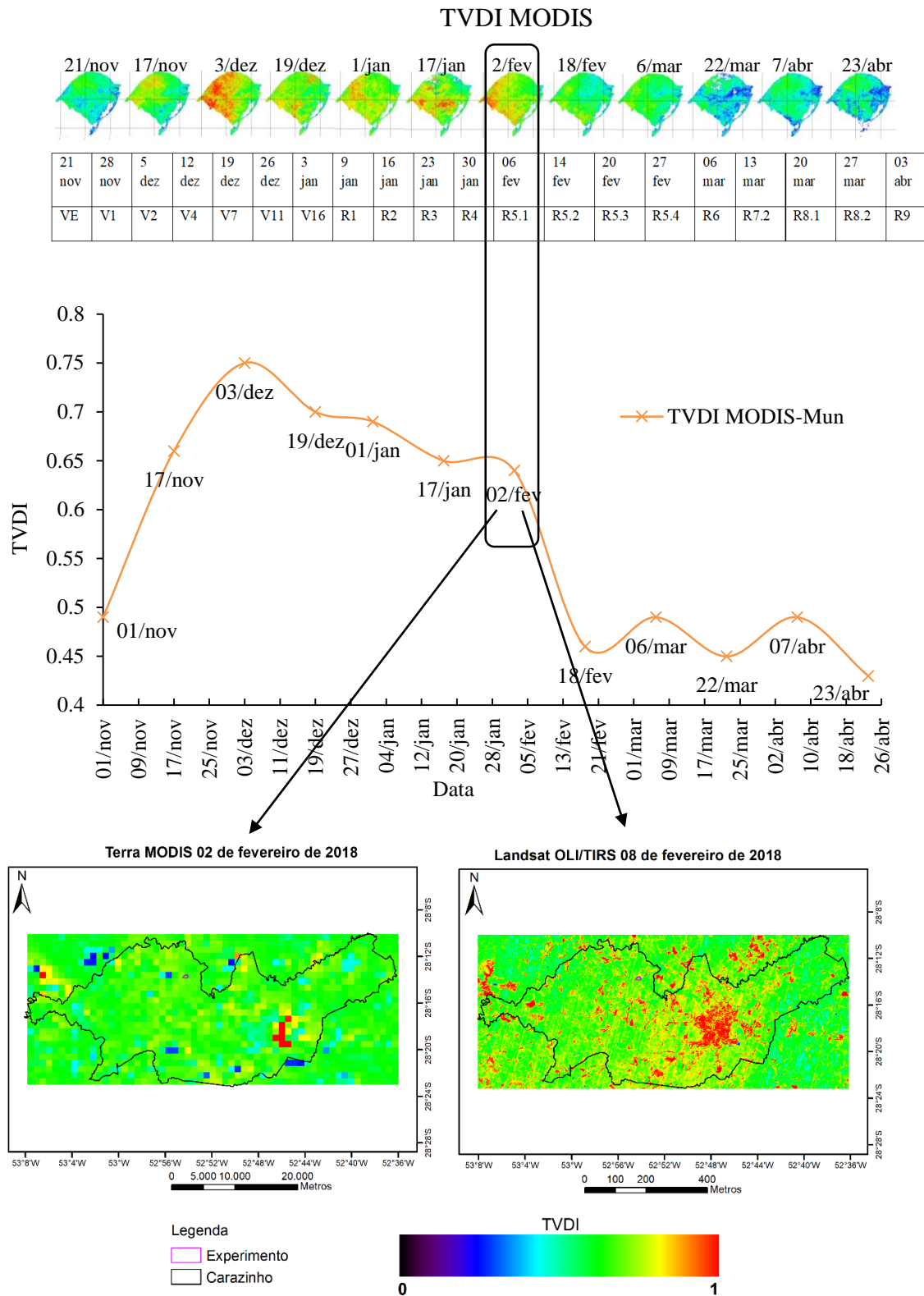
A primeira componente do sistema de monitoramento seria usando em grande escala o produto TVDI<sub>MODIS</sub> e gerando as imagens para todo o RS de forma contínua a cada 16 dias para todo o período do ciclo da soja. Destas imagens poderia ser extraído os valores médios de TVDI para diferentes municípios gerando um perfil com o transcurso temporal do índice. Para a safra em análise, verifica-se que houve grande variabilidade no índice ao longo do tempo e também entre regiões do RS em algumas datas. As imagens de TVDI<sub>MODIS</sub> com maior presença de áreas em vermelho ocorreram no início do ciclo, especialmente em 3 dez. Ao extrair dados do município de Carazinho verifica-se que nesta data ocorreu o maior valor no perfil; na sequência (imagens de 19 dez a 2 fev) observa-se a predominância de tons de amarelo e verde, coerente com os valores altos do perfil; ao final do ciclo, de 18 de fev a 23 de abr, observa-se a predominância de cores em tons de azul, coincidentes com os baixos valores do TVDI<sub>MODIS</sub> no perfil.

Inserir a informação de fenologia da cultura como uma segunda componente do sistema de monitoramento é fundamental para poder inferir sobre os impactos da restrição de umidade sobre o rendimento de grãos (Romani et al., 2016). Quando a deficiência hídrica coincide com o período crítico da soja, ocorrem as maiores perdas, visto que os efeitos dos déficits hídricos agem diretamente sobre a formação dos componentes do rendimento (Matzenauer et al., 2020). Na safra em estudo foi utilizada a fenologia observada na lavoura em que se conduziu o experimento e apontou que em janeiro e fevereiro a cultura se encontrava em florescimento e enchimento de grãos. Para esta componente poderiam ser utilizados dados coletados pela EMATER-RS ([http://www.emater.tche.br/site/info-agro/informativo\\_conjuntural.php#.YFXvLK9Kg2w](http://www.emater.tche.br/site/info-agro/informativo_conjuntural.php#.YFXvLK9Kg2w)) e disponibilizados no Informativo

Conjuntural, no qual é feito acompanhamento a cada 8 dias da evolução das safras para as diferentes regionais do RS, sendo possível identificar o período crítico.

A terceira componente do sistema é, no período crítico da cultura à deficiência hídrica, fazer um detalhamento espacial, usando o produto  $TVDI_{OLI/TIRS}$ . Na safra em análise a data crítica foi 2 de fev, quando houve a coincidência de ocorrer altos valores de TVDI, a cultura estar no estágio R5.2 e ter disponibilidade de imagem OLI/TIRS. Ao ampliar o município de Carazinho nesta data pode-se observar a importância do uso conjugado dos sensores. No produto  $TVDI_{MODIS-Mun}$  observamos uma homogeneização dos valores (predominância de tons verde e alguns pontos amarelos), o que é decorrente da resolução espacial. Já no produto  $TVDI_{OLI/TIRS}$  pode-se observar uma distribuição espacial do índice, com maior distinção entre parcelas, possibilitando localizar as parcelas que apresentaram maiores deficiências hídricas (em vermelho).

A proposta inicial do sistema de monitoramento ainda carece de estudos e análises no sentido de identificar limiares do índice TVDI que possam identificar situações críticas da condição hídrica e momentos críticos para a cultura da soja, definir metodologia de localização e classificação das áreas de risco. Outro aspecto a ser pensado é que nestes sistemas operacionais o ajuste do triângulo evaporativo poderia ser feito usando diversas safras com condições hídricas extremas, tanto ótimas como péssimas. Com isso, poderíamos obter um triângulo evaporativo característico da região de produção e, assim, este poderá ser aplicado a qualquer safra e em tempo real. Esta característica é fundamental nos sistemas operacionais de monitoramento agrícola, visto que, conforme salientado por Massignam et al. (2016) e Sivakumar, (2016), os produtos destes sistemas, quando específicos e apropriados à caracterização dos fatores limitantes para uma dada cultura, geram informações tanto para planejamento assim como monitoramento agrometeorológico em tempo real, esta é o caso do TVDI para soja no RS.



**Figura 5.** Esquema de funcionamento de um sistema de monitoramento: imagens TVDI<sub>Modis</sub> para o RS, escala fenológica da cultura e perfil do TVDI<sub>Modis</sub> –Mun para

Carazinho. Detalhe da imagem TVDI<sub>Modis</sub>-Mun do dia 02 de fev e TVDI<sub>OLI/TIRS</sub>-Mun de 08 de fev.

### **Conclusões**

O ajuste do triângulo evaporativo para os sensores OLI/TIRS e MODIS apresenta similaridade, com as diferenças associadas as características de resolução dos sensores.

Os dados do índice TVDI obtidos na superfície e a partir de sensores orbitais apresentam coerência e demonstram a complementariedade de informações espaciais e temporais entre eles.

O uso conjugado dos diferentes sensores possibilita a construção de uma proposta para um sistema de monitoramento agrícola auxiliando na identificação dos períodos de deficiências hídricas em relação as fases do desenvolvimento da cultura e o detalhamento da distribuição espacial a nível de parcela agrícola.

### **Agradecimentos**

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 Capão Alto pela parceria no trabalho.

## Referências

Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; Gonçalves, J.L.M.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

Chen, J., Wang, C., Jiang, H., Mao, L., Yu, Z. Estimating soil moisture using Temperature–Vegetation Dryness Index (TVDI) in the Huang-huai-hai (HHH) plain, **International Journal of Remote Sensing**, 32:4, 1165-1177, 2011. DOI: 10.1080/01431160903527421

Chen, S., Wen, Z., Jiang, H., Zhao, Q., Zhang, X., Chen, Y. Temperature Vegetation Dryness Index Estimation of Soil Moisture under Different Tree Species. **Sustainability**, 7, 11401-11417. 2015. doi:10.3390/su70911401

EMATER-RS\_Ascar Informativo Conjuntural Porto Alegre, Março de 2021.  
[http://www.emater.tche.br/site/info-agro/informativo\\_conjuntural.php#.YFXvLK9Kg2w](http://www.emater.tche.br/site/info-agro/informativo_conjuntural.php#.YFXvLK9Kg2w)

Fraisse, C.; Andreis, J.; Borba, T.; Cerbaro, V.; Gelcer, E.; Pavan, W.; Pequeno, D.; Perondi, D.; Shen, X.; Staub, C.; Uryasev, O.; Wagner, A. P. AgroClimate - Tools for managing climate risk agriculture. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.24, n.1, p.121-129, 2016.

Gao, Z.; Gao, W.; Chang, N. Integrating temperature vegetation dryness index (TVDI) and regional water stress index (RWSI) for drought assessment with the aid of LANDSAT TM/ETM+ images. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation** 13: 495-503. 2011

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**, v. 149, p. 100-117, 2014.

Guasselli, L.A.; Saldanha, D.L.; Suertegaray, D.M.A.; Ducati, J.R.; Fontana, D.C. Macrozoneamento do estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisas em Geociências**, v. 33, n. 1, p. 3-11, 2006.

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.

Holzman M.E.; Carmona F.; Rivas R.; Niclòs R. Early assessment of crop yield from remotely sensed water stress and solar radiation data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.145, p.297-308. 2018

IBGE/SIDRA disponível em <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/1612> Acesso em 12/05/2020.

Jiménez-Muñoz, J.C.; Sobrino, J.A.; Skokovic, D.; Mattar, C.; Cristóbal, J. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 11, p. 1840-1843, 2014.

Junges, A.H. Fontana, D.C. Lampugnani, C.S. Relationship between the normalized difference vegetation index and leaf area in vineyards. **Bragantia**, v.78, p.297-305, 2019. doi: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2018168>

Li, B., Chaopu, T., Yongqiang, Z., Xiaoyuan, Y. Estimating Soil Moisture with Landsat Data and Its Application in Extracting the Spatial Distribution of Winter Flooded Paddies.

**Remote Sensing**, 8, 38; 2016. doi:10.3390/rs8010038

Massignam, A. M.; Pandolfo, C.; Ricce, W. S.; Vieira, H. J.; Braga, H. J. A agrometeorologia operacional em Santa Catarina. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.24, n.1, p.55-63, 2016.

Matzenauer, R., Maluf, J.R.T., Radin, B. **Regime de chuvas e produção de grãos no Rio Grande do Sul: impacto das estiagens e relação com o fenômeno El Niño Oscilação Sul**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2020. 133 p. il. Color. E-book.

Nemani, R.R.; Running, S.W. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal IR AVHRR data. **Journal of Applied Meteorology**, v. 28, p. 276-284, 1989.

Prabhakara, K. Hively, W.D. McCarty, G.W. Evaluating the relationship between biomass, percent groundcover and remote sensing indices across six winter cover crop fields in Maryland, United States. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.39, p.88–102. 2015. doi: 10.1016/j.jag.2015.03.002

Radin, B.; Matzenauer, R. Uso das informações meteorológicas na agricultura do Rio Grande do Sul. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.24, n.1, p.41-54, 2016.

Ravelo, A. C.; Planchuelo, A. M.; Zanvettor, R. E.; Boletta, P. E. C. Drought monitoring and assessment system for Argentina. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.24, n.1, p.113-120, 2016.



Romani, L.A.S.; Banbini, M.D.; Coltri, P.P.; Luchiari Jr., A.; Koenigkan, L.V.; Otavian, A.F.; Evangelsita, S.R.M. Zullo Jr., H.; Pinto, H.S.; Assad. E.D. Sistema de Monitoramento Agrometeorológico - Agritempo: inovação em rede apoiando políticas públicas e a tomada de decisão agrícola. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.24, n.1, p.29-40, 2016.

Sandholt, I., Rasmussen, K. Andersen, J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. **Remote Sensing of Environment**, 79, 213-224. 2002.

Sayago, S.; Ovando, G.; Bocco, M. Landsat images and crop model for evaluating water stress of rainfed soybean. **Remote Sensing of Environment**, v. 198, p. 30-39, 2017

Schirmbeck, L. W., Fontana, D. C., and Schirmbeck, J. (2017)a. TVDI spatiotemporal pattern of a soybean growing area in humid subtropical climate. **Bragantia**, 76, 447-455.

Schirmbeck, L. W., Fontana, D. C., Schirmbeck, J., Mengue, V. P. (2017)b. Understanding TVDI as an index that expresses soil moisture. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing** v.7, n.2, 82-90.

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. 2018.

Schirmbeck, L.W., Fontana, D.C., Schirmbeck, J., Bremm, C. TVDI Obtido de Imagens OLI/TIRS e MODIS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, p. 573-583, 2019.

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*, v. 153, p. 1-18. 2015.

Silva-Fuzzo, D.F., Rocha, J.V. Simplified triangle method for estimating evaporative fraction over soybean crops. **Journal of Applied Remote Sensing**, 10(4), 046027. 2016, doi: 10.1117/1.JRS.10.046027.

Sivakumar, M.V.K. Agrometeorological Strategies for Reducing Impacts of Natural Disasters in Agriculture. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.24, n.1, p.1-13, 2016.

Son, N.T., Chen, C.F., Chen C.R., Chang, L.Y., Minh V.Q. Monitoring agricultural drought in the Lower Mekong Basin using MODIS NDVI and land surface temperature data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation** 18, 417–427. 2012

Sun, L., Chen, Z., Gao, F., Anderson, M., Song, L., Wang, L., Hu, B., Yang, Y. Reconstructing daily clear-sky land surface temperature for cloudy regions from MODIS data. **Computers & Geosciences**. 105, 10–20. 2017.

Tsukahara, R. Y.; Oliveira, A. N.; Oliveira Júnior, J. I.; Kochinski, E. G.; Prestes Neto, J.; Carneiro, A. S.; Fischer, P. H.; Rosa, M. B.; Rosa, G.B.; Silva, A. P.; Mainardes, S. G.; Santos, A. C. Pesquisa e divulgação técnica de informações agrometeorológicas aos associados das Cooperativas ABC. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.24, n.1, p.71-85, 2016.

Uniyal, B.; Dietrich, J.; Vasilakos, C.; Tzoraki, O. Evaluation of SWAT simulated soil moisture at catchment scale by field measurements and Landsat derived indices. **Agricultural Water Management**, v. 193, p. 55-70, 2017.

Wang, H., He, N., Zhao, R., Ma, X. Soil water content monitoring using joint application of PDI and TVDI drought indices. **Remote Sensing Letters**, 11, n.5, 455–464. 2020. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2020.1730469>

Zanon, A. J., Streck, N. A. Grassini, P. Climate and Management Factors Influence Soybean Yield Potential in a Subtropical Environment. *Agronomy Journal*, v. 108, p. 1447-1454. 2016. <http://dx.doi:10.2134/agronj2015.0535>.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 8.1 Introdução

No contexto agrícola atual, um dos principais desafios do setor é produzir maior quantidade de alimentos para atender a demanda crescente. Parte deste desafio pode ser atendido por ações de planejamento agrícola e pelo conhecimento dos fatores de risco, os quais permitem minimizar perdas. Uma das principais culturas do agronegócio do Estado do RS, assim como nacional, é a soja, com uma área significativa de cultivo. Para esta cultura, o principal fator de risco está relacionado ao atendimento das exigências hídricas. Como a cultura é majoritariamente cultivada em condições não irrigadas, é extremamente relevante conhecer em diferentes escalas espaciais e temporais o regime da precipitação pluvial, que acaba promovendo variações no armazenamento hídrico do solo e no crescimento e desenvolvimento das plantas.

Neste contexto, o sensoriamento remoto tem contribuição significativa. O monitoramento da biomassa pode ser obtido através do NDVI e quando é utilizado em conjunto com a  $T_s$ , pode-se obter um indicador da umidade da superfície, a qual, disponibiliza informações da condição hídrica da vegetação ao longo do tempo e do espaço, o TVDI. Este índice tem sido utilizado por diversos especialistas para estimar a umidade da superfície, tendo potencial para se tornar uma importante ferramenta para o monitoramento de áreas agrícolas.

Devido à importância econômica das atividades agrícolas para o RS e a existência de lacunas de conhecimento, relacionadas à informação espacialmente detalhada da adequação das condições hídricas das regiões produtoras do Estado, principalmente no período de primavera-verão e especialmente para a cultura da soja se esboçou a hipótese deste trabalho de que a análise dos padrões espaciais e temporais do TVDI, pode aportar

dados robustos e complementares sobre a disponibilidade hídrica, com foco no déficit hídrico, o que gera subsídios para o planejamento do setor agrícola do RS em programas de monitoramento.

Neste trabalho foram feitas diversas análises usando dados medidos na superfície e dados oriundos de imagens orbitais para a determinação do índice TVDI, num contexto de entender as vantagens e limitações deste índice e sua aplicabilidade em um sistema de monitoramento agrícola.

## **8.2 Principais descobertas**

- ✓ O TVDI pode ser obtido a partir do uso conjugado de diferentes sensores, com distintas resoluções radiométricas, espectrais, temporais e espaciais, os quais podem fornecer informações complementares sobre a umidade da superfície.
- ✓ Os sensores para obtenção do TVDI podem ser tanto posicionados em plataformas orbitais como de superfície, sendo que a seleção decorre do objetivo da aplicação.
- ✓ TVDI obtido com sensor de superfície necessita de um sensor orbital que abranja uma área que permita obter condições de umidade extremas para definir as retas dos limites seco e úmido do triângulo evaporativo.
- ✓ O TDVI se constitui em um robusto indicador da umidade da superfície, capaz de caracterizar a condição hídrica do sistema solo-planta-atmosfera.
- ✓ O TVDI fornece informações compatíveis de serem utilizadas em um sistema de monitoramento agrícola.

### 8.3 Principais resultados

O TVDI é obtido a partir de parâmetros oriundos do ajuste de um triângulo evaporativo, que estabelece dois limites seco e úmido. Como o valor do índice é relativo a estes limites, para acompanhar as condições de umidade da superfície ao longo de uma safra ou mesmo entre diferentes safras, é necessário que o ajuste considere condições hídricas extremas, características da época do ano e da região de produção.

Diferentes sensores, em função das características de resolução radiométrica, espectral, espacial e temporal, geram triângulos distintos para um mesmo período e região. Para a região de estudo, a comparação dos triângulos obtidos usando imagens dos sensores OLI/TIRS e MODIS, mostrou um padrão similar de distribuição no espaço e ao longo do tempo, mas com magnitudes distintas.

Para obter o TVDI a partir de sensores de superfície é necessário a geração dos limites seco e úmido usando dados orbitais da região e período. Neste trabalho, foi usado o triângulo ajustado com dados OLI/TIRS e verificou-se que os dados TVDI obtido das medições na superfície mostram sensibilidade em representar a disponibilidade hídrica e permitem acompanhar a condição hídrica durante o desenvolvimento da soja, com tecnologia análoga às imagens de satélite. O TDVI se mostrou robusto, apresentando correlação significativa com diversas variáveis (armazenamento, déficit,  $E_{Tr}$ ,  $E_{Tr}/ET_0$  e umidade), usualmente utilizadas para caracterizar a condição hídrica do sistema solo – água – planta.

Considerando que o TVDI mostrou coerência entre os dados obtidos pelos diferentes sensores testados, foi proposto o uso conjugado destes para a construção de um sistema de monitoramento agrícola auxiliando na identificação dos períodos de deficiências hídricas em relação as fases da cultura, assim como o detalhamento da

distribuição espacial. Neste caso, o TVDI obtido com as imagens MODIS fornece informações com alta taxa de revisita (16 dias), mas com baixa resolução espacial, enquanto o OLI/TIRS fornece a possibilidade de detalhar espacialmente a informação, mas com limites temporais em função do intervalo de revista e da nebulosidade, gerando informações relevantes e complementares.

#### **8.4 Trabalhos futuros com sistema de monitoramento agrícola**

A proposta inicial do sistema de monitoramento apresentado neste trabalho ainda carece de estudos e análises, os quais podem indicar algumas das possibilidades para o seguimento nos estudos envolvendo o TVDI. São elas:

- ✓ Identificação de limiares do índice TVDI que identifiquem situações desfavoráveis da condição hídrica em momentos críticos para a cultura da soja, definindo assim uma metodologia de localização e classificação das áreas de risco.

- ✓ Obtenção de um triângulo evaporativo característico da região de produção para que o TVDI possa ser aplicado a qualquer safra e em tempo real, o que é fundamental nos sistemas operacionais de monitoramento agrícola. Nestes sistemas operacionais, o ajuste do triângulo evaporativo poderia ser feito usando diversas safras com condições hídricas extremas, tanto ótimas como péssimas.

- ✓ Maior detalhamento da variabilidade do TVDI dentro das diversas regiões de produção poderia ser obtido a partir de uma análise de agrupamento de áreas homogêneas quanto ao TVDI para geração de um triângulo específico para cada uma destas áreas.

Além do uso em sistemas de monitoramento, a geração de uma série contínua de TVDI com vários anos de informação, permitiria também uma análise estatística do risco relacionado ao fator umidade. Apesar de outros índices que têm sido utilizados para este

fim, como por exemplo o ISNA (Índice de Satisfação das Necessidades de Água), a vantagem do TVDI é a geração do dado de risco com alto detalhamento espacial, inviável de ser obtido com dados oriundos de estações meteorológicas.

## **8.5 Conclusões**

O presente trabalho foi desenvolvido ao longo de 5 anos, durante o período do doutorado desenvolvido no PPGSR/UFRGS, envolvendo uma equipe de pesquisadores, técnicos e alunos. Para tanto, foram utilizados recursos públicos da UFRGS, da EMBRAPA e do CNPq que permitiram a compra e instalação do experimento de campo, o qual contou com a parceria de um produtor rural que cedeu sua lavoura.

Ao longo do período do experimento, além da formação de recursos humanos (treinamento de 1 doutoranda e de 2 mestrandas, entre outros), gerou conhecimento que foi divulgado através de publicações científicas. Contabilizando somente os trabalhos como primeira autora, foram 7 artigos científicos publicados em revistas científicas e 6 trabalhos apresentados em simpósios e congressos.

Nestas publicações ficou evidenciado o avanço no conhecimento, mostrando que o TVDI pode ser aplicado em um sistema de monitoramento agrícola. Este índice permite um melhor entendimento dos impactos que a condição hídrica exerce sobre o resultado da agricultura, especialmente quando ocorre nas fases fenológicas críticas das culturas, evitando assim riscos e auxiliando na tomada de decisão, no gerenciamento do uso dos recursos hídricos e, em última instância, garantindo maiores rendimentos.



## **9 FINANCIAMENTO**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.