

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA

BALANÇO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA NA SOJA E O
USO DE DADOS ESPECTRAIS, ORIUNDOS DE SENSORES REMOTOS, PARA
ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA LÍQUIDA

Laura Pigatto Schaparini
Engenheira Agrônoma/UFRGS

Dissertação apresentada como um dos requisitos
à obtenção do Grau de Mestre em Fitotecnia
Área de concentração Sistemas de Produção Vegetal

Porto Alegre (RS), Brasil
Setembro de 2021

CIP - Catalogação na Publicação

Schaparini, Laura Pigatto
BALANÇO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA NA
SOJA E O USO DE DADOS ESPECTRAIS, ORIUNDOS DE SENSORES
REMOTOS, PARA ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA
LÍQUIDA / Laura Pigatto Schaparini. -- 2021.
94 f.
Orientador: Denise Cybis Fontana.

Coorientador: Genei Antonio Dalmago.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia, Porto Alegre, BR-RS,
2021.

1. Radiação Fotossinteticamente Ativa. 2. Soja. 3.
On farm. 4. Sensoriamento remoto. 5. NDVI. I. Fontana,
Denise Cybis, orient. II. Dalmago, Genei Antonio,
coorient. III. Título.

LAURA FIGATTO SCHAPARINI
Engenheira Agrônoma - UFRGS

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

MESTRE EM FITOTECNIA

Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 30.07.2020
Pela Banca Examinadora
(Via videoconferência)

Homologado em: 18.10.2021
Por

DENISE CYBIS FONTANA
Orientador - PPG Fitotecnia
UFRGS

CARLA ANDRÉA DELATORRE
Coordenadora do Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia

CHRISTIAN BREDEMEIER
PPG Fitotecnia
UFRGS

RICARDO WANKE DE MELO
Departamento de Plantas
Forrageiras e Agrometeorologia
UFRGS

CLEUSA ADRIANE MENEGASSI BIANCHI
Departamento de Estudos Agrários
Unijuí

CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade de
Agronomia

AGRADECIMENTOS

Sou grata pela vida que tenho, por ser quem sou e por ter consciência de que dou o meu melhor para realizar as atividades que sou totalmente responsável. Obrigada Deus, por me oportunizar essa linda experiência: minha vida.

Minha família, minha base, a quem posso sempre recorrer. Obrigada por todo o apoio, ensinamentos, demonstrações de carinho e amor. Pai, mãe e mano, sem vocês eu não teria encontrado forças para dar continuidade e finalizar mais essa batalha.

Obrigada aos meus amigos, Suellen, Rafael, Carol e Priscila, por tornarem esses dois anos mais leves, os almoços no RU mais prazerosos e principalmente, pelas conversas, estudos e trocas. A amizade de vocês é um presente que levarei para o resto da vida no coração. Vocês são incríveis!

Obrigada a minha orientadora de mestrado que, inclusive, é minha orientadora desde 2013 na Iniciação Científica. Prof^a Dr^a Denise Cybis Fontana, tu és um exemplo de profissional, dedicação e comprometimento com a pesquisa.

Ao Genei Antonio Dalmago, pesquisador da Embrapa Trigo e meu co-orientador nesse trabalho. Obrigada por sempre estar disponível nos meus momentos de dúvidas, por todos os esclarecimentos e paciência.

A toda a equipe da Embrapa Trigo, pesquisadores, técnicos e funcionários, que trabalharam arduamente para que esse e muitos outros trabalhos de pesquisa acontecessem.

Ao Prof^o Ricardo Wanke de Melo, por sempre estar disponível para me escutar, trocar ideias e tomar chimarrão. Obrigada por sempre esclarecer minhas dúvidas e mostrar que certas coisas acontecem e não temos culpa, temos que enfrentar e aprender com elas.

Aos meus colegas e professores do Departamento de Agrometeorologia, em especial Dani e a Grazi pela parceria ao longo dos dias.

Um agradecimento muito especial a Amanda Heemann Junges e a Carolina Brenm por sempre estarem disponíveis para conversar e sempre dar aquela palavra de incentivo. Sei que posso sempre contar com vocês. Muito obrigada!

Não poderia esquecer dos meus amigos do *Crossfit*. O que seria de mim sem a atividade física e sem meus amigos para descontrair e fazer com que os momentos de treinos fossem os melhores momentos do dia.

BALANÇO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA NA SOJA E O USO DE DADOS ESPECTRAIS PARA ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA LÍQUIDA¹

Autor: Laura Pigatto Schaparini
Orientadora: Denise Cybis Fontana
Co-orientador: Genei Antonio Dalmago

RESUMO

Com o aumento da demanda na produção de alimentos, o uso de ferramentas que auxiliem no acompanhamento do desenvolvimento e qualidade da vegetação se fazem importantes. Dessa forma, objetivo principal desta pesquisa foi a busca de indicadores espectrais, oriundos de sensores remotos, que possam contribuir para obtenção de estimativas robustas da PPL em alvos agrícolas em grandes regiões de produção e com um adequado grau de detalhamento espacial. O experimento foi conduzido em formato *On Farm*, em uma área comercial localizada no Município de Carazinho-RS. As avaliações biofísicas e meteorológicas ocorreram durante três safras de cultivo de soja, 2015-16, 2016-17, 2017-18. Os dados meteorológicos foram obtidos através de uma estação micrometeorológica instalada no interior da lavoura. Para os dados espectrais, para as três safras utilizou-se dados obtidos pelo sensor orbital, Terra/MODIS e, além disso, para a safra 2017-18, obteve-se dados espectrais de superfície através de sensores de radiação incidente (SRS NDVI Hemisférico) e refletida (SRS NDVI com Limitador de Visão). Com os dados espectrais foram calculados índices de vegetação NDVI e EVI de forma a caracterizar a quantidade de biomassa e sua dinâmica ao longo de cada safra. As safras 2015-16 e 2016-17 apresentaram períodos de deficiência hídrica ao longo do ciclo da cultura acarretando oscilações no perfil temporal do NDVI e EVI ao longo do ciclo. A máxima eficiência de absorção de RFA ocorreu entre as fases de florescimento e enchimento de grãos para as três safras. Já o valor máximo de eficiência de absorção deu-se concomitante ao valor máximo de IAF, também para as três safras. Não foi constatada diferença na eficiência de uso da radiação entre as três safras, por essa razão, considerou-se um valor médio para os três períodos. Além disso, NDVI demonstrou grande capacidade ao ser utilizado na estimativa do IAF e eficiência de absorção da radiação e dessa forma, ser utilizado para a estimativa da PPL.

¹ Dissertação de Mestrado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (94f.) Setembro, 2021

BALANCE OF PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION IN SOY AND THE USE OF SPECIFIC DATA TO ESTIMATE LIQUID PRIMARY PRODUCTIVITY ¹

Author: Laura Pigatto Schaparini
Adviser: Denise Cybis Fontana
Co- adviser: Genei Antonio Dalmago

RESUMO

With the increase in demand in food production, the use of tools that assist in monitoring the development and quality of vegetation becomes important. Thus, the main objective of this research was the search for spectral indicators, coming from remote sensors, that can contribute to obtain robust estimates of PPL in agricultural targets in large production regions and with an adequate degree of spatial detail. The experiment was conducted in an On Farm format, in a commercial area located in the Municipality of Carazinho – RS. The biophysical and meteorological evaluations took place during three soybean crop seasons, 2015-16, 2016-17, 2017-18, The meteorological data were obtained through a micrometeorological station installed inside the crop. For the spectral data, for the three harvests data obtained by the orbital sensor, Terra / MODIS was used and, in addition, for the 2017-18 harvest, spectral surface data were obtained through incident radiation sensors (SRS NDVI Hemispheric) and reflected (SRS NDVI with Vision Limiter). With the spectral data, NDVI and EVI vegetation indices were calculated in order to characterize the amount of biomass and its dynamics throughout each harvest. The 2015-16 and 2016-17 harvests showed periods of water deficiency throughout the crop cycle, causing fluctuations in the temporal profile of NDVI and EVI throughout the cycle. The maximum efficiency of RFA absorption occurred between the flowering and grain filling phases for the three harvests. The maximum value of absorption efficiency was given concurrently with the maximum value of LAI, also for the three harvests. There was no difference in the efficiency of use of radiation between the three harvests, for this reason, it was considered an average value for the three periods. In addition, NDVI has demonstrated great ability to be used in the estimation of the LAI and efficiency of radiation absorption and thus, be used for the estimation of the PPL.

¹ Master Dissertation in Plant Science, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (94p.) September, 2021.

SUMÁRIO

	Página
1	INTRODUÇÃO 1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3
	2.1 Agricultura no Brasil e Rio Grande do Sul..... 3
	2.2 Produção e rendimento da soja..... 3
	2.2.1 Radiação Solar em dosséis vegetais..... 4
	2.2.2 Disponibilidade hídrica..... 7
	2.3 Produtividade Primária das culturas agrícolas 8
	2.4 Indicadores espectrais da produtividade primária líquida das plantas 10
	2.5 Área experimental..... 13
	2.5.1 Localização..... 13
	2.6 Tratos culturais..... 14
	2.7 Medições..... 15
	2.7.1 Dados meteorológicos 15
	2.7.2 Dados micrometeorológicos..... 15
	2.7.3 Dados espectrais..... 17
	2.8 Condições meteorológicas do período experimental..... 19
	2.9 Referências 21
3	CAPÍTULO 1 Análise comparativa entre índices de vegetação e sua relação com o balanço hídrico em soja..... 27
	3.1 Introdução 29
	3.2 Material e métodos 30
	3.3 Resultados e discussão 32
	3.4 Conclusão 33
	3.5 Referências 35
4	CAPÍTULO 2 Balanço radiação fotossinteticamente ativa (RFA): eficiência do uso pela cultura da soja (<i>Glycine max</i> L. Merrill) em diferentes safras..... 37
	4.1 Introdução 38
	4.2 Material e métodos 40
	4.3 Resultados e discussão 43
	4.3.1 Crescimento e desenvolvimento da soja 43
	4.3.2 Balanço de RFA 45
	4.4 Conclusão 53
	4.5 Referências bibliográficas..... 54

	Página
5	CAPÍTULO 3 NDVI como estimador da eficiência de absorção da radiação solar da cultura da soja visando a modelagem da produtividade primária líquida 58
	5.1 Introdução 59
	5.2 Material e métodos 61
	5.3 Resultados e discussão 66
	5.4 Conclusão 76
	5.5 Referências bibliográficas 77
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS 80

RELAÇÃO DE TABELA

	Página
CAPÍTULO 1	
1. Coeficiente de correlação de Pearson entre a Evapotranspiração da cultura (ETc) e os Índices de vegetação (IVs) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e Enhanced Vegetation Index (EVI) de todas as safras em conjunto (2015-2016, 2016-2017, 2017-2018) para o subperíodo vegetativo, subperíodo reprodutivo e ciclo completo da cultura. Carazinho – RS, 2019. Correlações com significância estatística (* $p > 0,05$; ** $p > 0,001$; ns = não significativo).....	33
CAPÍTULO 2	
1. Intervalo de confiança (IC) máximo (97,5%) e mínimo (2,5%) dos coeficientes (a, b e c) da regressão exponencial para a eficiência do uso da radiação (EUR) da soja nas safras 2015-16; 2016-17; 2017-18.....	46
2. Intervalo de confiança (IC) (95%) para os parâmetros (a e b) da regressão linear para a eficiência do uso da radiação (EUR) da canola nas safras 2-15-16; 2-16-17; 2017-18.....	49
3. Intervalo de confiança (IC) (95%) para os parâmetros (a e b) da regressão linear para a eficiência do uso da radiação (EUR) da soja para as fases (Vegetativa, florescimento, enchimento de grão e senescência) nas safras 2015-16; 2016-17; 2017-18.....	50
4. Intervalo de confiança (IC) (95%) para os parâmetros (a e b) da regressão linear para a eficiência do uso da radiação (EUR) da soja para as fases (Vegetativa, florescimento, enchimento de grão e senescência) nas safras 2015-16; 2016-17; 2017-18.....	52
CAPÍTULO 3	
1. Intervalo de confiança (IC) (95%) para os parâmetros (a e b) da regressão exponencial para a estimativa do IAF através do Índice NDVI nas safras 2015-16; 2016-17; 2017-18.....	69

CAPÍTULO 3

Página

2. Intervalo de confiança (IC) (95%) para os parâmetros (a e b) da regressão linear para a estimativa da eficiência de absorção através do Índice NDVI nas safras 2015-16; 2016-17;2017-18..... 70
3. Intervalo de confiança (IC) (95%) para os parâmetros (a e b) da regressão linear para a Produtividade Primária Líquida (PPL) da soja obtidas através dos métodos 1 e 2, nas safras 2-15-16; 2-16-17; 2017-18.-17; 2017-18..... 74

RELAÇÃO DE FIGURAS

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	Página
1. Reflectância (%) espectral característica da vegetação para diferentes cultivos agrícolas, para o intervalo de comprimento de onda (λ) entre 350 a 2350 nm (Fonte: Thenkabail et al., 2013).....	11
2. Mapa de localização da área experimental. Lavoura de soja localizada na Granja Capão Grande no município de Carazinho – RS.....	14
3. Barras de cilício amorfo (a); disposição das células de cilício amorfo nas canaletas (b); detalhe das células de cilício amorfo (c). Passo Fundo – RS.....	16
4. Disposição das barras de RFA na lavoura. Barra para RFAtrs (a). RFAabs (b) e RFA (c). A posição da linha vermelha em relação a linha preta ilustra a orientação da parte sensível da barra em relação ao dossel vegetativo Carazinho – RS.....	17
5. Sensores de radiação incidente (SRS NDVI Hemisférico) e refletida (SRS NDVI com Limitador de Visão) instalados na área experimental (a). Aproximação de talhada do sensor (b).....	18
6. Temperatura média do ar ocorrida nas safras 2015-16; 2016-17 e 2017/18 (Dados da estação micrometeorológica instalada na lavoura) e a normal climatológica para o município de Passo Fundo (1981-2010) (INMET, 2019). Carazinho, RS.....	19
7. Precipitação pluvial ocorrida nas safras 2015-16; 2016-17 e 2017/18 (Dados da estação micrometeorológica instalada na lavoura) e a normal climatológica para o município de Passo Fundo (1981-2010) (INMET, 2019). Carazinho, RS.....	20
8. Radiação Solar Global nas safras 2015-16; 2016-17 e 2017/18 (Dados da estação micro meteorológica instalada na lavoura) e a normal climatológica para o município de Passo Fundo (1981-2010) (INMET, 2019). Carazinho, RS.....	21

CAPÍTULO 1

Página

1. Perfil temporal dos índices de vegetação Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e Enhanced Vegetation Index (EVI) ao longo do crescimento e desenvolvimento das plantas de soja em três safras no período de 2015 a 2018 [NOV_1 (01/11 a 16/11/2017), NOV_2 (17/11 a 02/12/2017), DEZ_1 (02/12 a 18/12/2017), DEZ_2 (19/12/2017 a 03/01/2018), JAN_1 (04/01 a 19/01/2018), JAN_2 (20/01 a 04/02/2018), FEV_1 (05/02 a 20/02/2018), FEV_2 (21/02 a 08/03/2018), MAR_1 (09/03 a 24/03/2018) e MAR_2 (25/03 a 09/04/2018)]. Carazinho – RS.....	32
2. Componentes do balanço hídrico meteorológico durante as três safras analisadas. Excesso Hídrico, deficiência hídrica, evapotranspiração da cultura (ETc), precipitação pluvial. Índices de vegetação Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e Enhanced Vegetation Index (EVI) ao longo do crescimento e desenvolvimento das plantas de soja em três safras no período de 2015 a 2018 [NOV_1 (01/11 a 16/11/2017), NOV_2 (17/11 a 02/12/2017), DEZ_1 (02/12 a 18/12/2017), DEZ_2 (19/12/2017 a 03/01/2018), JAN_1 (04/01 a 19/01/2018), JAN_2 (20/01 a 04/02/2018), FEV_1 (05/02 a 20/02/2018), FEV_2 (21/02 a 08/03/2018), MAR_1 (09/03 a 24/03/2018) e MAR_2 (25/03 a 09/04/2018)]. Carazinho – RS.....	32
3. Relação entre a Evapotranspiração da cultura e os Índices de vegetação Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e Enhanced Vegetation Index (EVI) de todas as safras em conjunto (2015-2016, 2016-2017, 2017-2018) para o subperíodo vegetativo (a, b), subperíodo reprodutivo (c, d) e ciclo completo da cultura (e, f). Carazinho – RS, 2019.....	34
CAPÍTULO 2	
1. Índice de área foliar (IAF) (a) e matéria seca total (MST) (b) da soja, em função de dias após a emergência (DAE), cultivada nas safras de 2015-2016, 2016-2017 e 2017-2018 em Carazinho, RS.....	45
2. Densidade de fluxo de radiação solar global (rg), radiação fotossinteticamente ativa incidente (RFAinc), refletida (RFAref) e transmitida (RFAtrs). Carazinho - RS / Brasil, safra 2015-16, 2016-17 e 2017-18.....	46
3. RFA absorvida em razão da RFA interceptada safras 2015-2016, 2016-2017 e safra 2017-2018 (c). Carazinho – RS.....	48
4. Eficiência de absorção da radiação fotossinteticamente ativa (ϵ_{abs}) observada o em razão do índice de área foliar (IAF) para a safra 2015-2016, 2016-2017 e safra 2017-2018 (c). Carazinho – RS.....	49

CAPÍTULO 2	Página
5. Matéria Seca (MST) observada o em razão da radiação fotossinteticamente ativa acumulada para as safras 2015-2016, 2016-2017 e safra 2017-2018 (c). Carazinho – RS.....	50
6. Evolução da matéria seca aérea da soja em quatro subperíodos do ciclo da soja (1_Vegetativo; 2_Florescimento; 3_Enchimento de Grãos e 4_Senescencia) em função da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAabs) nas safras: (a) 2015-16; (b) 2016-17 e (3) 2017-18. Carazinho - RS / Brasil.....	52
CAPÍTULO 3	
1. Mapa de localização da área experimental. Carazinho – RS/ Brasil.....	62
2. Perfil temporal do IAF (a), e NDVI_Modis (b). Safras 2015-2016, 2016-2017 e 2017-2018, Carazinho-RS.....	67
3. Regressão linear entre dados de NDVI medidos a campo e dados de NDVI obtidos do sensor MODIS.....	68
4. Regressão exponencial entre dados de NDVI_Modis e dados de IAF para a safra 2015-2016; 2016-2017 e 2017-2018 (d). Carazinho/RS.....	69
5. Perfil temporal da Eficiência de Absorção Obtida com dados coletados a campo (Campo), através do enfoque 1 (Método_1) e enfoque 2 (Método_2). Para as safras 2015-16 (a), 2016-17 (b) e 2017-18 (c). Carazinho –RS.....	72
6. Perfil temporal de PPL, diâmetros distintos indicam diferentes tamanhos de IAF Safra 2015-16 (a), Safra 2016-17 (b) e Safra 2017-18 (c). Carazinho93-RS.....	74
7. Acumulado de PPL para cada fase dentro do ciclo da soja. Método 1 (a), método 2 (b). Safras 2015-2016, 2016-2017 e 2017-2018, Carazinho-RS.....	76

RELAÇÃO ABREVEATURAS E SIGLAS

EUR -	Eficiência do Uso da Radiação
EVI -	Do inglês <i>Enhanced Vegetation Index ndvi</i>
ϵ_{abs} -	Eficiência de Absorção
ϵ_{int} -	Eficiência de Interceptação
GPS -	Sistema de Posicionamento Global
IAF -	Índice de Área Foliar
INMET -	Instituto Nacional de Meteorologia
IV -	Índice de Vegetação
MST -	Matéria Seca Total
NDVI -	Do inglês <i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
PPB -	Produtividade Primária Bruta
PPL -	Produtividade Primária Líquida
RFA -	Radiação Fotossinteticamente Ativa
RFAabs -	Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida
RFAinc -	Radiação Fotossinteticamente Ativa Incidente
RFAint -	Radiação Fotossinteticamente Ativa Interceptada
RFArfl -	Radiação Fotossinteticamente Ativa Refletida
RFAtr -	Radiação Fotossinteticamente Ativa Transmitida
R_s -	Radiação Solar Global
SR -	Sensoriamento Remoto

1 INTRODUÇÃO

A Produtividade Primária Líquida (PPL) é toda a energia armazenada pelas plantas a partir do processo fotossintético (Produtividade Primária Bruta-PPB) menos o gasto na respiração. A PPL representa a taxa de produção de biomassa que está disponível para o consumo pelos organismos heterotróficos (bactérias, fungos e animais). Apesar do papel central que a PPL desempenha no ciclo do carbono, no fluxo de energia em diversos ecossistemas e na eficiência das culturas agrícolas para transformar energia em biomassa, no Brasil as informações são escassas, restringem-se apenas a trabalhos pontuais de pesquisa. As plantas produzem matéria seca através do processo fotossintético em que a clorofila presente nas folhas absorve e converte a radiação solar na faixa visível (400 a 700 nm) em biomassa. A radiação solar nesta faixa do espectro eletromagnético é, portanto, comumente chamada de RFA (Radiação Fotossinteticamente Ativa). Como a variação do rendimento de biomassa das diferentes espécies vegetais pode ser atribuída à diferença da capacidade de absorção da RFA em uma determinada condição ambiental, esta variável tem sido extensamente avaliada como dados de entrada em modelos de PPL.

A maior parte dos métodos disponíveis para a estimativa da PPL apresentam limitações relacionadas a uma adequada representação espacial da variabilidade no tempo e no espaço das estimativas para as diferentes regiões produtoras. Sendo assim, informações provenientes do Sensoriamento Remoto (SR), podem se constituir, fornecendo indicadores eficientes de parâmetros usados no cálculo da PPL e permitir o detalhamento espacial e temporal necessário ao acompanhamento do desenvolvimento das culturas anuais de importância agrícola em extensas áreas de produção.

Através de técnicas/medidas empregando SR é possível determinar a resposta espectral de alvos de interesse, sendo esta uma variável extremamente importante, pois nela estão inseridas diversas informações da cultura, como: nível nutricional, condição hídrica, incidência de doenças e pragas, entre outros. É possível, ainda, estimar a

biomassa de culturas através dos índices de vegetação, calculados usando os valores de reflectância da radiação solar em determinadas faixas do espectro eletromagnético (especialmente o vermelho e o infravermelho próximo). No caso da vegetação agrícola, já existe muita informação disponível na literatura demonstrando a eficácia da obtenção de parâmetros biofísicos das culturas usando dados oriundos dos mais diversos tipos de dados de SR. Isto leva a crer que os dados de sensores empregados na leitura da superfície podem contribuir também como dado de entrada em modelos de estimativa da PPL.

O Rio Grande do Sul possui grande relevância para a oferta nacional de alimentos, sendo que as lavouras temporárias ocupam mais de 9 milhões de hectares. Cerca de 90% dessa área são voltados à produção de grãos (cereais e oleaginosas), que se configura na principal atividade agrícola do Estado. Dada a importância das culturas anuais para a agricultura e economia do Estado, o objetivo principal desta pesquisa foi a busca de indicadores espectrais, oriundos de sensores remotos, que possam contribuir para obtenção de estimativas da PPL em alvos agrícolas em grandes regiões de produção e com um adequado grau de detalhamento espacial.

Objetivos específicos:

1) analisar o padrão temporal dos índices NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*) para três safras soja com condições hídricas distintas durante o ciclo, de forma a possibilitar a avaliação da relação entre IVs e as condições hídricas para a cultura.

2) analisar o balanço de Radiação Fotossinteticamente ativa, calcular as eficiências de interceptação, absorção e uso da RFA para as três safras.

3) avaliar a acurácia do NDVI como estimador da Eficiência de Absorção da Radiação para fins de modelagem da PPL em lavoura de soja.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Agricultura no Brasil e Rio Grande do Sul

A agricultura é umas das principais bases da economia do mundo, evoluindo das extensas monoculturas para diversificação da produção (Castanho; Teixeira, 2017). O processo de evolução da agricultura se deu em conjunto com a necessidade do homem em se estabelecer na terra e de desenvolver uma nova maneira de se obter alimentos, que não fossem apenas fornecidos pela natureza, mas sim, cultivados (Mazoyer; Roudart, 2010).

O Brasil é um dos maiores produtores de grãos do mundo devido, principalmente, a sua grande extensão territorial, uso de tecnologias e climas favoráveis (Baroni; Benedeti; Seidel, 2017). Cerca de 33% (12,08 milhões de hectares) de toda a área plantada com soja no Brasil (CONAB, 2020) está situada na Região Sul. Já no Rio Grande do Sul (RS) as lavouras temporárias ocupam mais de 9 milhões de hectares, sendo que cerca de 90% dessa área são voltados à produção de grãos (cereais e oleaginosas), que se configura na principal atividade agrícola do Estado. A soja no RS se constitui na principal cultura, sendo que na safra 2018-2019 ocupou cerca de 5 milhões de hectares gerando uma produção por safra de aproximadamente 16,25 milhões de toneladas (EMBRAPA TRIGO, 2019).

2.2 Produção e rendimento da soja

A soja (*Glycine max* (L) Merrill) é uma planta herbácea. Possui folhas trifolioladas, exceto o primeiro par de folhas simples, no nó acima do nó cotiledonar. Desenvolvem vagens (legumes) levemente arqueadas que, à medida que amadurecem, mudam da cor verde para amarelo-pálido. Apresentam crescimento indeterminado, sem racemo terminal; determinado, com racemo terminal; ou semi-determinado, intermediário (Sediyama *et al.*, 1999). A soja pode ser considerada uma cultura agrícola

chave para a segurança alimentar mundial por se tratar de uma fonte de proteína e energia para a nutrição humana e animal, respondendo por 56% da produção das oleaginosas no mundo (USDA, 2017).

De todos os fatores que podem interferir na produtividade da soja, o clima um fator que não é possível controlar, exercendo ação limitante às máximas produtividades. Estresses abióticos, como a seca, o excesso de precipitação pluvial, as temperaturas extremas, a baixa luminosidade, entre outros, pode reduzir, significativamente, os rendimentos em lavouras (Monteiro, 2009).

As condições meteorológicas adversas são aquelas que com maior frequência determinam limitações do incremento de biomassa e, conseqüentemente, da produção agrícola. Segundo Hoogenboom (2000), dentre todas as variáveis meteorológicas, a radiação solar, a temperatura do ar e a precipitação pluvial são as que mais afetam o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas. A maior parte da soja cultivada no Estado é cultivada no método de sequeiro (Sentelhas *et al.*, 2015), desta forma a quantidade e distribuição da precipitação torna-se um dos principais fatores limitantes da produtividade de grãos no Rio Grande do Sul (Zanon *et al.*, 2016; Arsego *et al.*, 2019).

2.2.1 Radiação Solar em dosséis vegetais

A radiação solar é uma das principais fontes de energia utilizada nos processos físicos e biológicos de uma planta. Dentre os principais processos pode-se citar a fotossíntese, que transforma energia solar em biomassa (Campillo *et al.*, 2012). Em macroescala, ao longo de um ano, a quantidade de radiação incidente na Terra é determinada a partir da oscilação anual da declinação solar, o que se acentua com o aumento da latitude. No Rio Grande do Sul no inverno, a quantidade de radiação recebida é menor, e no verão, maior, diferenciando assim o fotoperíodo e definindo, respectivamente, os fotoperíodos mínimos máximos (Bergamaschi; Bergonci, 2017).

Em microescala, considerando um dossel vegetal, para uma mesma área foliar, o fluxo de radiação solar varia com a quantidade de energia incidente e com o ângulo de inclinação da folha. A distribuição da radiação solar no interior da vegetação pode ser regida pela Lei de Beer (Monsi & Saeki, 1953):

$$I = I_0 e^{(-kIAF)} \quad (1)$$

sendo, I é o fluxo de radiação em qualquer ponto do dossel vegetal; I_0 é o fluxo de radiação incidente sobre ele; k coeficiente de extinção do dossel; e IAF é o índice de área foliar dos estratos situados acima do ponto considerado.

Segundo Bergamaschi e Bergonci (2017), O IAF aumenta conforme o crescimento da planta e com o aumento do número e tamanho de folhas. O IAF é descrito como a área de folhas sobre uma área de solo, e depende da espécie vegetal, idade e das condições de crescimento como, suprimento de água e nutrientes, além do regime térmico. Se não houver períodos de estresse ou limitações hídricas e nutricionais, a planta alcança seu IAF ótimo quando, todas as folhas contribuem positivamente para a produção de biomassa (Souza *et al.*, 2018).

Já o coeficiente de extinção (k) determina o quanto de radiação atravessa o estrato vegetal sendo este, um fator exponencial negativo na Lei de Beer (Equação 1). Logo, vegetações com baixo coeficiente de extinção, espécies com folhas estreitas e eretas, interceptam pouca radiação solar por unidade de área foliar, e o inverso ocorre para espécies com maiores valores de k (Bergamaschi & Bergonci 2017).

A fotossíntese utiliza a faixa de 400 a 700 nm, sendo esta faixa denominada radiação fotossinteticamente ativa (RFA), que em média corresponde a 48% da energia solar incidente na superfície (Bergamaschi & Bergonci 2017). A quantificação de fótons, correspondentes à faixa de RFA, é importante em estudos de ecofisiologia e fisiologia vegetal, mais particularmente, para estudos sobre fotossíntese e desenvolvimento de plantas. Além disso, é importante em aplicações relacionadas ao incremento de biomassa e modelos de crescimento de culturas (Alados *et al.*, 1996; Petter *et al.*, 2016). Na maioria dos casos, a RFA tem sido estimada como uma fração constante do espectro total do saldo de radiação (R_s), podendo variar entre 44 a 69% de R_s dependendo de fatores meteorológicos tais quais, pressão atmosférica, elevação solar, turbidez atmosférica, e precipitação pluvial (Cunha & Volpe, 2010).

O balanço de radiação pode ser determinado medindo-se a radiação incidente (RFA_{inc}); um sensor horizontal em posição inversa (voltado para a cultura) situado acima das folhas mais altas, medindo a radiação refletida pela planta e solo ao mesmo tempo (RFA_{refl}); um sensor no plano horizontal, no nível do solo, para medir a radiação transmitida (RFA_{tr}).

A radiação absorvida pela cultura (RFA_{abs}) é determinada entre as radiações recebidas e as radiações perdidas, segundo equação:

$$RFA_{abs} = RFA_{inc} - RFA_{rfl} - RFA_{tr} \quad (02)$$

onde: RFA_{inc} é a radiação que incide sobre o dossel. RFA_{rfl} é a radiação refletida pela planta e RFA_{tr} é a radiação transmitida pelo sistema solo mais planta.

França *et al.* (1997), utilizando o mesmo conceito, propuseram o cálculo da radiação interceptada, a qual pode ser determinada subtraindo a radiação incidente da transmitida:

$$RFA_{int} = RFA_{inc} - RFA_{tr} \quad (03)$$

Outros parâmetros importantes para se estabelecer a eficiência de uma determinada espécie em converter energia em biomassa, são as eficiências de interceptação e absorção. A eficiência de interceptação (ε_{int}) é o resultado da divisão entre a radiação interceptada pelo dossel e a radiação incidente:

$$\varepsilon_{int} = \frac{RFA_{int}}{RFA_{inc}} \quad (04)$$

Da mesma forma, a razão entre a radiação absorvida pelo dossel e a radiação incidente chama-se de eficiência de absorção (ε_{abs}):

$$\varepsilon_{abs} = \frac{RFA_{abs}}{RFA_{inc}} \quad (05)$$

A eficiência de conversão da energia solar em biomassa é conhecida como eficiência do uso da radiação (EUR) (Montheith, 1972), a qual pode ser definida pela quantidade de biomassa seca produzida por unidade de radiação interceptada ou absorvida pelo dossel. A EUR, quando medida a campo, normalmente é considerada como sendo a inclinação da reta de regressão linear entre o acúmulo de biomassa da cultura e a radiação fotossinteticamente absorvida pela cultura (Zhu *et al.*, 2010). A EUR

pode ser expressa como matéria seca produzida por unidade de energia absorvida, o qual depende muito da espécie e da fase do ciclo de desenvolvimento e mecanismo fotossintéticos C3 e C4.

Também ações de manejo alteram o EUR. Martorano (2007) constatou que a soja quando irrigada, apresentou maior EUR (1,57 g MJ⁻¹) de quando a soja não foi irrigada, apresentando um EUR de 1,03 g MJ⁻¹. Van Roekel e Purcell (2014), em um estudo com soja nos Estados Unidos, também verificou diferenças entre safras, encontrando valores de EUR que variaram de 1,01 a 1,89 g MJ⁻¹. Já Petter *et al.* (2016) encontrou valores bem maiores, tendo a EUR assumidos valores próximos a 4 g. MJ⁻¹. Além disso, outros fatores podem fazer com que haja a alteração dos valores de EUR como manejos (espaçamento entre plantas, cultivares).

2.2.2 Disponibilidade Hídrica

O conteúdo de água disponível para o desenvolvimento das espécies vegetais é de extrema importância. Os climas que predominam no sul do Brasil, segundo Alvares *et al.* (2013), são Cfa e Cfb, climas característicos, úmidos o ano inteiro, sem estação seca e temperaturas amenas. Apesar dessas características climáticas, o Rio Grande do Sul apresenta médias de rendimento de soja e milho, espécies anuais de estação quente, menores que os demais estados produtores destas culturas no Brasil. Isso por que a precipitação pluvial Normal para o Estado, nos meses críticos de desenvolvimento da soja (novembro-dezembro-janeiro), é inferior às observadas nos demais estados, demonstrando assim a importância da disponibilidade de água para as culturas anuais de verão no Sul no Brasil (Kulman *et al.*, 2014). Para Bergamaschi *et al.* (2003), a variação sazonal hídrica no Estado é causada principalmente pela maior demanda evaporativa da atmosfera no verão.

O déficit hídrico se desenvolve quando a absorção de água é menor que a transpiração. A primeira resposta das plantas a deficiência hídrica é a redução do crescimento e desenvolvimento da parte aérea e raízes ao longo do ciclo da cultura (Gava *et al.*, 2015). O déficit hídrico afeta praticamente todos os aspectos relacionados ao desenvolvimento das plantas, reduzindo a área foliar, diminuindo a fotossíntese e afetando vários outros processos, além de alterar o ambiente físico das culturas, por modificar o balanço de energia do sistema. Além disso, ocorre aumento da resistência

estomática reduzindo a fotossíntese e consequentemente o crescimento e produtividade da planta.

Para soja, estresses provocados por deficiência hídrica representam um dos principais fatores responsáveis pela instabilidade na produção de grãos ao longo dos anos. Dependendo do nível de estresse hídrico e do estágio fisiológico em que se encontram as plantas de soja, diferentes processos podem ser afetados, afetando o rendimento da cultura e qualidade do grão (Arias *et al.*, 2015).

2.3 Produtividade Primária das culturas agrícolas

A Produtividade Primária Líquida (PPL ou NPP da sigla em inglês *Net Primary Productivity*) é toda a energia armazenada pelas plantas a partir da fotossíntese (Produtividade Primária Bruta) menos o que é consumido na respiração, representando a taxa de produção de biomassa das culturas. A PPL é o principal indicador de “saúde” de uma cultura, sendo de grande importância para o equilíbrio ecológico, em que 90 a 95% da matéria seca total produzida pela planta são construídas por carbonos derivados da fotossíntese. Segundo Rosa e Sano (2013), a importância em conhecer a PPL tem sido muito reconhecida, visto o papel central que desempenha no ciclo do carbono e fluxo de energia em diversos ecossistemas.

A capacidade fotossintética das plantas está diretamente relacionada à sua habilidade em utilizar a água, luz e nutrientes. Diversos fatores, entretanto, influenciam a produtividade primária, dentre os quais podemos destacar: radiação solar global, disponibilidade de CO₂, temperatura do ar, disponibilidade de água e nutrientes. Apesar da importância, no Brasil as informações sobre a produtividade primária líquida da vegetação são escassas, restringem-se apenas a trabalhos pontuais de pesquisa.

A biomassa vegetal é produzida a partir da fixação do dióxido de carbono (CO₂) atmosférico, utilizando a radiação solar como fonte de energia, mais especificamente, a Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) que pode ser utilizada pelos órgãos clorofilados das plantas. PPL pode ser estimado pela Equação 6

$$PPL = RFA_{inc} \times \epsilon_{abs} \times EUR \quad (06)$$

sendo, RFA_{inc} a radiação fotossinteticamente ativa, ϵ_{abs} é a eficiência de absorção e EUR é a eficiência do uso da radiação.

Existem formas alternativas propostas na literatura para obtenção dos termos que compõem da equação da PPL. Ahl *et al.* (2005) propôs calcular a RFA_{abs} considerando uma relação exponencial com o Índice de Área Foliar (Equação 7):

$$RFA_{abs} = 1 - e^{((-kIAF))} \quad (7)$$

onde, k o coeficiente de extinção, o qual descreve a fração da radiação interceptada por uma folha ou copa, dada a distribuição foliar e o ângulo do sol.

Segundo Bao *et al.* (2016), a produtividade deve considerar fatores climáticos, visto que, seu excesso ou falta, podem causar situações de estresse para a planta. Neste caso, os autores propuseram calcular a EUR da equação 8, considerando fatores de estresse:

$$EUR = EUR_{max} \times T_{\varepsilon 1} \times T_{\varepsilon 2} \times W_{\varepsilon} \quad (08)$$

sendo EUR_{max} a eficiência do uso da radiação máxima para um determinado bioma ou cultura numa condição ideal. Na literatura existem valores estabelecidos para alguns biomas e tipos de vegetação: florestas mistas (0,74); pastagens (0,68); cultivos agrícolas (0,73) (Yu *et al.*, 2009); $T_{\varepsilon 1}$ é a temperatura média (°C) mensal do local, $T_{\varepsilon 2}$ é a temperatura ideal (°C) para o crescimento da planta, e W_{ε} a umidade do solo.

Para estimar $T_{\varepsilon 1}$ (Equação 09):

$$T_{\varepsilon 1} = 0,8 + 0,02 \times T_{opt} - 0,0005 \times (T_{opt})^2 \quad (09)$$

sendo, T_{opt} a temperatura (°C) ótima para a determinada espécie vegetal.

Para estimar $T_{\varepsilon 2}$ (Equação 10)

$$T_{\varepsilon 2} = C \times \frac{1}{\{1 + \exp(0,2 \times (T_{opt} - 10 - T))\}} \quad (10)$$

sendo C uma constante e T a temperatura média (°C).

Para cálculo de W_{ε} , o autor sugere (Equação 11):

$$W_{\varepsilon} = 0,5 + 0,5 \times \frac{EET}{ETP} \quad (11)$$

sendo EET (mm) a evapotranspiração estimada e ETP (mm) a evapotranspiração potencial.

2.4 Indicadores espectrais da produtividade primária líquida das plantas

Uma das fermentas que vem sendo amplamente utilizada na agricultura como indicador de respostas ao desenvolvimento da vegetação, tem sido o sensoriamento remoto (SR), o que decorre de uma ampla gama de opções na escolha do sensor. Os dados de SR podem ser obtidos em três diferentes níveis: aéreo, onde a coleta de dados é realizada por meio de sensores em uma plataforma aérea; nível orbital, onde são utilizados sensores que orbitam o planeta coletando dados dos alvos da superfície; nível terrestre, onde são utilizados instrumentos que podem ser manuseados por diferentes profissionais a campo ou em laboratórios (INPE, 2018). Segundo Moreira (2007) os sensores também são caracterizados quanto a fonte de radiação podendo ser passivos ou ativos. Os sensores ativos emitem a sua própria fonte de radiação eletromagnética, o que é diferente dos sensores passivos que dependem de uma fonte externa, como por exemplo o Sol. Um exemplo de sensor passivo são os chamados espectroradiômetros, eles permitem um maior detalhamento do alvo caracterizando a forma como o mesmo interage com a radiação solar incidente.

Independentemente do tipo de sensor, procura-se inferir sobre as características do alvo a partir da detecção remota da energia proveniente do alvo. Uma folha verde e sadia intercepta o fluxo radiante incidente direto, proveniente do Sol, ou difuso, após espalhamento. Esta energia incidente interage com os pigmentos, água e espaços intercelulares da folha vegetal, sendo parte absorvida, e refletida ou transmitida. A maioria dos sistemas de sensores remotos funcionam medindo a porção da energia incidente que é refletida pela folha, a qual é denominada reflectância, e muito utilizada para inferências sobre o tipo e condição da vegetação. Os principais fatores que afetam as propriedades de reflectância e transmitância foliar nos comprimentos de onda do visível (350 a 700 nm) são os pigmentos foliares (Thenkabail *et al.*, 2013). As propriedades biofísicas da planta como biomassa, densidade de planta, índice de área foliar são os fatores que caracterizam os comprimentos de onda do infravermelho próximo (750 a 1100 nm). Para comprimentos de ondas maiores que 1100 nm, os espalhamentos internos e o conteúdo interno de umidade determinam as características do perfil de reflectância das plantas (Jensen, 2011). Saber avaliar quais fatores que afetam

e controlam a refletância (Figura 1) e suas potencialidades de aplicação podem ser de grande valia no contexto agrônomo.

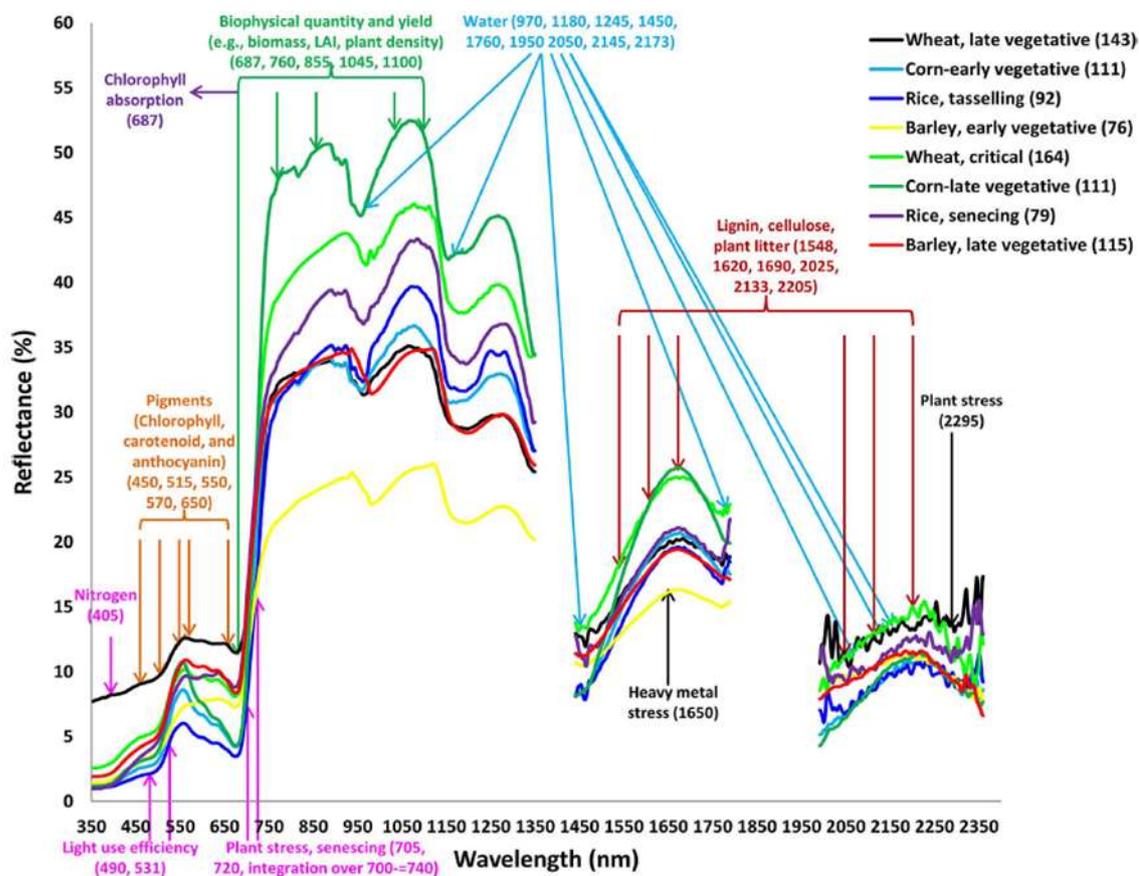


FIGURA 1. Refletância (%) espectral característica da vegetação para diferentes cultivos agrícolas, para o intervalo de comprimento de onda (nm) entre 350 a 2350 nm (Fonte: Thenkabail *et al.*, 2013).

No estudo de dosséis vegetais é muito frequente o uso dos denominados índices de vegetação (IV), os quais são medidas radiométricas adimensionais que indicam a abundância relativa e a atividade da vegetação verde, incluindo índice de área foliar (IAF), porcentagem de cobertura verde, teor de clorofila, biomassa verde e radiação fotossinteticamente ativa (Ponzoni *et al.*, 2015). Entre as muitas possibilidades de equações disponíveis na literatura, o NDVI (*do* inglês *Normalized Difference Vegetation Index*) é o mais utilizado.

O NDVI (Equação 12), proposto por Rouse *et al.* (1973), relaciona a refletância da vegetação nos comprimentos de onda do vermelho (V) e do infravermelho próximo (IV) e é considerado um indicador do acúmulo de biomassa verde pelas plantas. O índice apresenta valores que variam teoricamente de -1 a 1, sendo que valores mais próximos a

1 representam maior acumulo de biomassa. Os valores próximos a zero estão associados a presença de solo e os valores negativos a presença de corpos d'água.

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (12)$$

onde ρ_{IV} representa a reflectância no comprimento de onda do infravermelho próximo e ρ_V a reflectância do vermelho.

Jensen (2011) ressaltou que o NDVI pode monitorar as mudanças sazonais e interanuais no desenvolvimento e na atividade da vegetação, além de reduzir muitas formas de ruídos como, diferença de iluminação solar, sombras de nuvens, algumas atenuações atmosféricas, algumas variações topográficas presentes em múltiplas bandas de imagens de múltiplas bandas.

Por outro lado, o autor apresenta algumas desvantagens deste índice. Sendo o NDVI baseado em uma razão não linear, pode ser influenciado por efeitos ruidosos aditivos, tais como, radiância e trajetória atmosférica. O NDVI é altamente correlacionado com o IAF, entretanto, esta relação pode não ser tão forte durante o período de máximo IAF, aparentemente devido à saturação do NDVI quando o IAF é muito alto. Fontana *et al.* (2019) identificaram que a saturação do NDVI na lavoura de soja ocorre com IAF acima de 5. O NDVI é muito sensível a variações de substrato sob o dossel (p.ex., os solos que são visíveis sob o dossel), com valores particularmente altos com substratos mais escuros.

As fases de crescimento e desenvolvimento das culturas anuais apresentam valores de IV distintos ao longo do tempo, caracterizando os denominados perfis temporais. Os menores índices ocorrem nas fases iniciais da cultura, onde ainda há solo exposto, resultando em baixos valores de índice de vegetação nas imagens, enquanto que os maiores índices ocorrem na fase de máximo desenvolvimento da cultura, quando o solo está totalmente coberto e há presença de elevada biomassa (Rizzi *et al.*, 2008). Os perfis temporais vêm sendo empregados em diversos estudos para o monitoramento de cultivos (Junges & Fontana, 2009; Fontana *et al.*, 2015), na modelagem de grãos e estimativa de área cultivada (Mercante *et al.*, 2010; Santos *et al.*, 2014). Também, alguns estudos têm avaliado a sensibilidade dos IVs frente a eventos meteorológicos e que afetam o desenvolvimento da vegetação (Rodigheri *et al.*, 2020; Schaparini *et al.*, 2020).

Para Rosa e Sano (2013) a PPL pode ser relacionada com o NDVI e RFA, através da equação 13.

$$PPL = EUR \times \Sigma[NDVI][RFA_{inc}] \quad (13)$$

onde Σ representa o somatório do NDVI no período de crescimento da vegetação.

Rodigheri (2020) testou metodologias para quantificar e mapear a Produtividade Primária Líquida através de dados coletados de sensores remotos. Ao comparar modelos utilizando dados meteorológicos obtidos a campo e obtidos através de sensoriamento remoto, os tratamentos não demonstraram diferenças estatísticas. Entretanto, ao comparar a PPL ao longo de 10 safras, concluiu que a variabilidade estava associada com a variação da condição hídrica. Para os diferentes métodos de estimativa da PPL para soja foram encontrados valores entre 149 a 203 gC m⁻² mês⁻¹ nos meses de maior desenvolvimento da soja.

Outro índice muito utilizado em estudos com vegetação é o *Enhanced Vegetation Index* (EVI) (Equações 14), o qual foi proposto posteriormente por Huete *et al.* (1997). Este é um NDVI modificado, que contém um fator de ajuste para solos e dois coeficientes de correção quanto ao espalhamento atmosférico de aerossóis. Este índice de vegetação tem melhorado a sensibilidade para regiões de alta biomassa, permitindo um melhor desempenho no monitoramento da vegetação, dado pela equação 14.

$$EVI = 2,5 \left(\frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + 2,4\rho_V + 1} \right) \quad (14)$$

Sendo, ρ_{IV} a reflectância no comprimento de onda do infravermelho próximo e ρ_V a reflectância do vermelho.

2.5 Área experimental

2.5.1 Localização

O experimento foi conduzido em formato *On Farm*, em uma área comercial de uma propriedade de 553,7 hectares, localizada no Município de Carazinho-RS sob as coordenadas 28°13'46" S e 52°54'32"W, nas safras 2015-2016, 2016-2017 e 2017-2018 (Figura 2), as três safras no mesmo local. O clima da região segundo a classificação

climática de Köppen, é Cfa ou seja, não há ocorrência de estação seca e as precipitações pluviais são distribuídas ao longo do ano (Alvares *et al.*, 2013). O solo da área é um Latossolo Vermelho Aluminoférrico típico (Streck *et al.*, 2008), profundo, com boa drenagem natural, adequado às culturas produtoras de grãos.

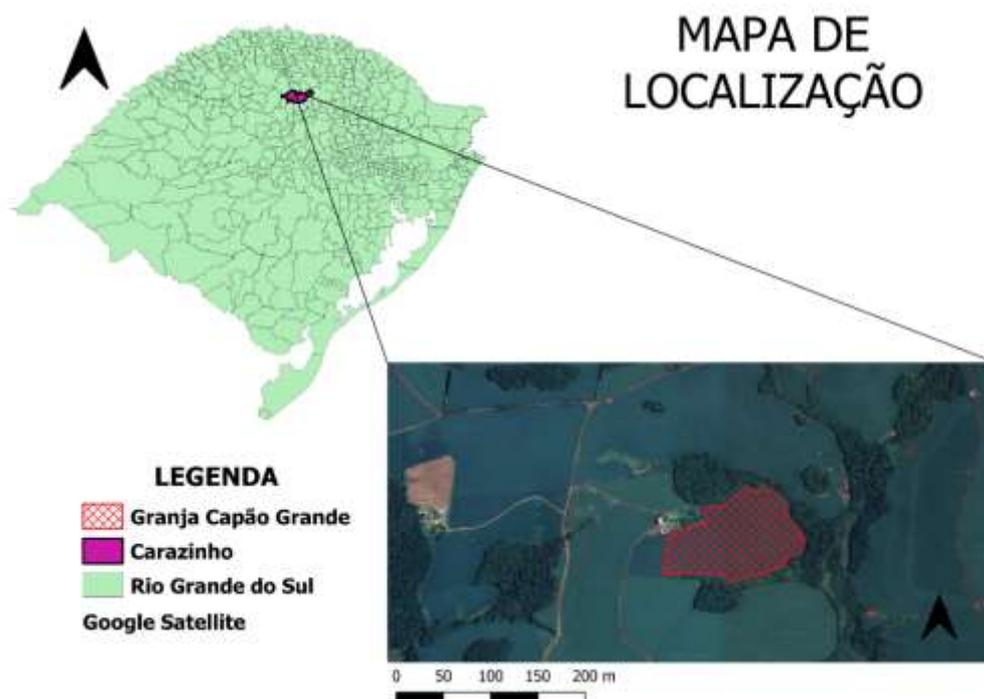


FIGURA 2. Mapa de localização da área experimental. Lavoura de soja localizada na Granja Capão Grande no município de Carazinho – RS.

2.6 Tratos culturais

A semeadura da soja ocorreu em 16/11/2015, 8/11/2016 e 13/11/2017, com emergência das plantas em 24/11/2015, 16/11/2016 e 21/11/2017 e colheita em 24/03/2016, 24/03/2017 e 03/04/2018, respectivamente, para as três safras.

Os genótipos utilizados foram: BMX Apolo RR, NS 5445 IPRO e DM 5958 RSF IPRO, nas safras de 2015, 2016 e 2017, respectivamente. O espaçamento adotado foi de 45 cm entre linhas em todas as safras. A população final de plantas foi de 26,9, 26,8 e 23,9 plantas m⁻².

A adubação de base foi realizada conforme análise de solo e indicação de alto rendimento de grãos para a cultura, com aplicação de 281 kg ha⁻¹ de NPK, da fórmula 05-20-20, em 2015, 304 kg ha⁻¹ de NPK, da fórmula 04-28-08, mais 171 kg ha⁻¹ de KCl, em

2016 e 300 kg ha⁻¹ de NPK da fórmula 04-28-08 mais 160 kg ha⁻¹ de KCl, em 2017. Os controles fitossanitários foram realizados conforme indicações técnicas e necessidade para o cultivo da soja.

2.7 Medições

As medições realizadas ao longo do período experimental forneceram subsídio a elaboração dos três artigos que compõem esta dissertação e abrangeram os seguintes conjuntos de dados:

2.7.1. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram coletados através de estação micro meteorológica instalada na lavoura, com sensores posicionados a 1,5 m de altura do solo para as três safras de soja.

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, marca Apogee. A velocidade do vento foi medida 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 CR 1000, 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.

O preenchimento de falhas quando ocorreram foi feita com dados meteorológicos registrados na estação meteorológica da Embrapa Trigo, pertencente ao 8º Distrito de Meteorologia (8º DISME) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram utilizados dados meteorológicos diários das safras de 2016, 2017 e 2018, sendo eles: temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), precipitação pluvial (mm) e radiação solar global (MJ). Os dados diários de cada elemento foram agrupados para cada mês ao longo da safra da soja no Rio Grande do Sul (de outubro de um ano a abril do ano seguinte) sendo que, para a precipitação fez-se o acumulado de cada decêndio e para os demais elementos fez-se a média.

2.7.2. Dados micrometeorológicos (barras RFA)

Para a obtenção dos dados de RFA transmitida ao nível do solo (RFA_{tr}) e refletida pelo dossel (RFA_{rl}) foram medida utilizando barras de medição de radiação RFA, manufaturadas com cinco células de silício amorfo (Chartier *et al.*, 1989) (Figura 3) e calibradas com o sensor modelo SQ-110, da marca Apogee Instruments.

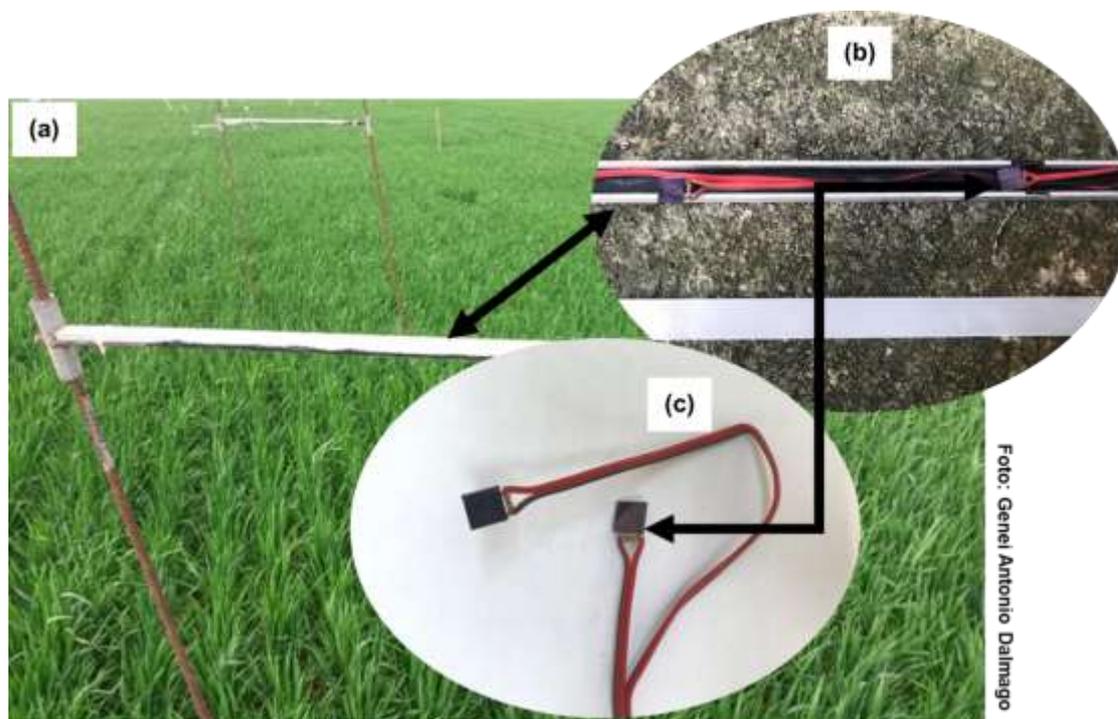


FIGURA 3. Barras de silício amorfo (a); disposição das células de silício amorfo nas canaletas (b); detalhe das células de silício amorfo (c). Passo Fundo –RS. Fonte: Genei Antonio Dalmago.

A disposição das barras de RFA na lavoura está demonstrada na figura 4. Os sensores de medição da RFA_{tr} (a), foram instalados a 5 cm da superfície do solo, fixados em estacas de madeira. Já àqueles para medir a RFA_{inc} (c) e RFA_{rl} (b) foram instalados a 1,5 m acima do solo e fixados em hastes de metal. Todos estes sensores foram instalados transversamente a linha de plantas e nivelados, com a parte sensível orientada para o topo do dossel.

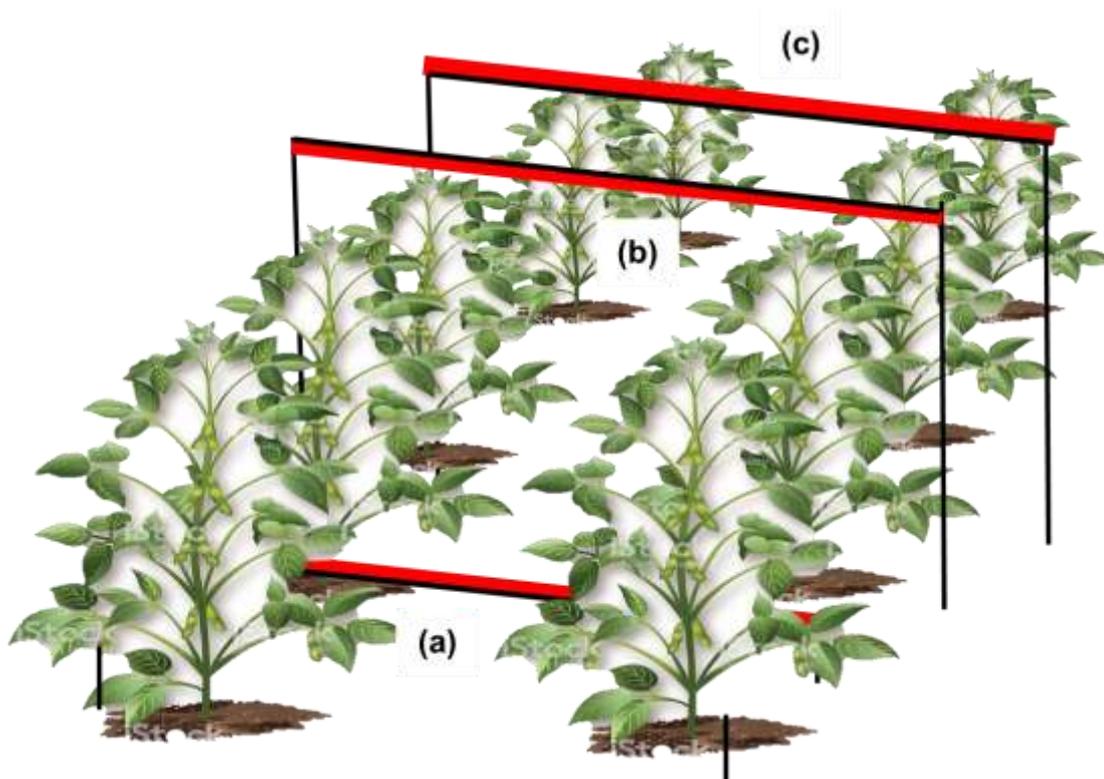


FIGURA 4. Disposição das barras de RFA na lavoura. Barra para RFAtrs (a). RFAabs (b) e RFA (c). A posição da linha vermelha em relação a linha preta ilustra a orientação da parte sensível da barra em relação ao dossel vegetativo Carazinho – RS.

2.7.3. Dados espectrais

Para os dados espectrais de superfície (Figura 5), foram instalados sensores de radiação incidente (SRS NDVI Hemisférico) e refletida (SRS NDVI com Limitador de Visão) no espectro do vermelho ($0,6$ a $0,7 \mu\text{m}$) e do infravermelho próximo (NIR) ($0,805$ a $0,815 \mu\text{m}$). Estes sensores espectrais foram instalados em um mastro no centro da área experimental, a uma altura de 1 m acima do topo do dossel, ajustável ao longo do ciclo. Foram coletados dados em diferentes pontos da lavoura em intervalos de tempo de 15 minutos, tendo sido utilizados neste estudo apenas os dados médios das $10\text{h}15\text{min}$, $10\text{h}30\text{min}$ e $10\text{h}45\text{min}$.

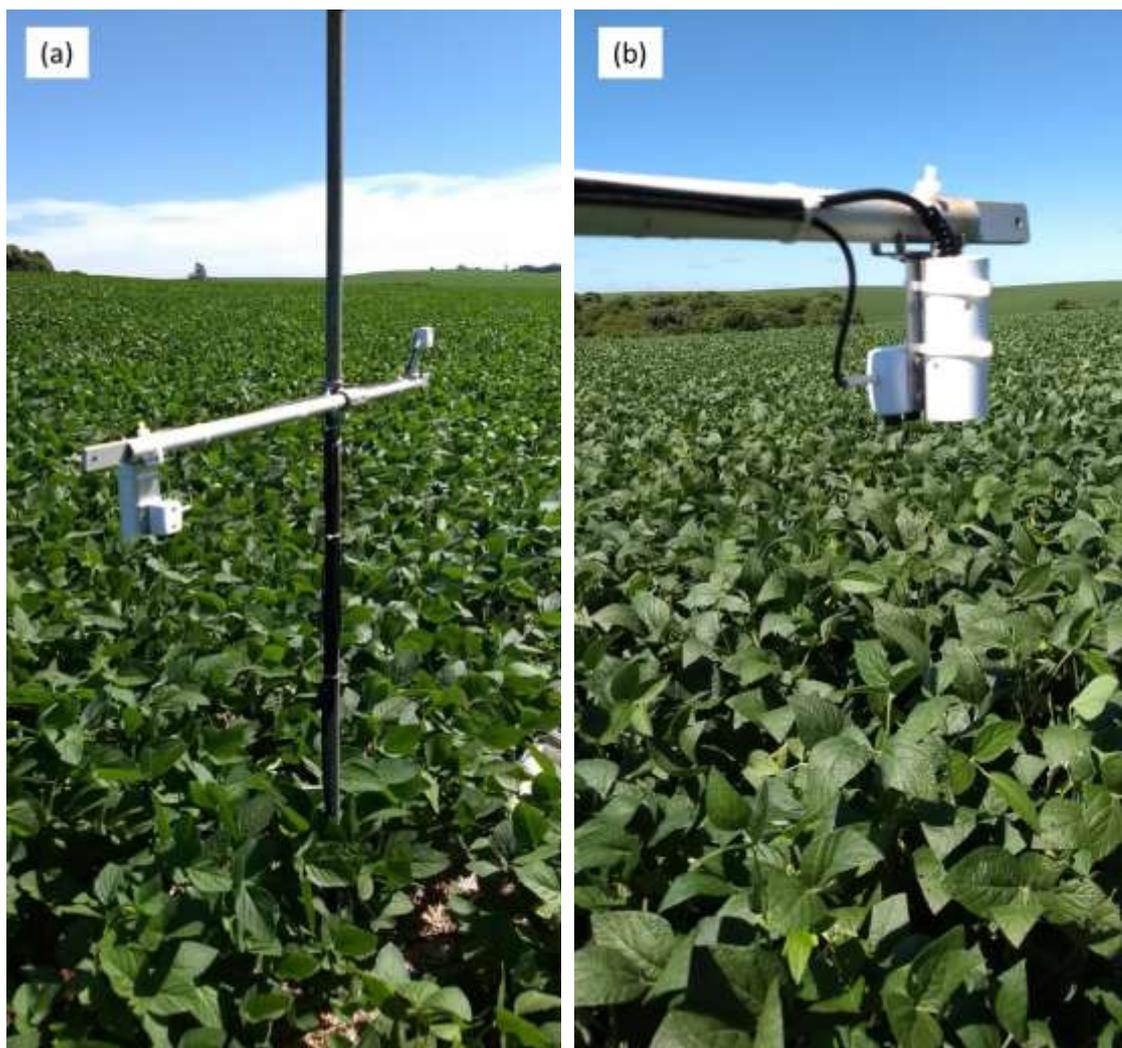


FIGURA 5. Sensores de radiação incidente (SRS NDVI Hemisférico) e refletida (SRS NDVI com Limitador de Visão) instalados na área experimental (a). Aproximação de talhada do sensor (b). Fonte: Lucimara Schirmbeck.

Para os dados espectrais do sensor MODIS, utilizou-se a plataforma Google Earth Engine para processar as imagens e obter os índices de vegetação. O Sensor MODIS fornece alta sensibilidade radiométrica (12 bits), dados em 36 bandas espectrais (de 0,4 a 14,4 μm) e cobrindo a maior parte da superfície da Terra a cada 1-2 dias, com uma resolução espacial de 250 m – 1 km (NASA, 2019). Considerou-se as bandas do infravermelho e vermelho. Na lavoura utilizou-se um pixel localizado no centro da área.

2.8 Condições meteorológicas do período experimental

A dinâmica da temperatura média do ar seguiu padrão esperado para época do ano, com temperaturas mais elevadas nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro e com temperaturas amenas nos meses de outubro, novembro, março e abril.

A temperatura média (Figura 6) para as três safras foi superior as temperaturas médias da normal climatológica. Para a safra 2015-16 a temperatura média variou entre 23,9 a 30,5 °C

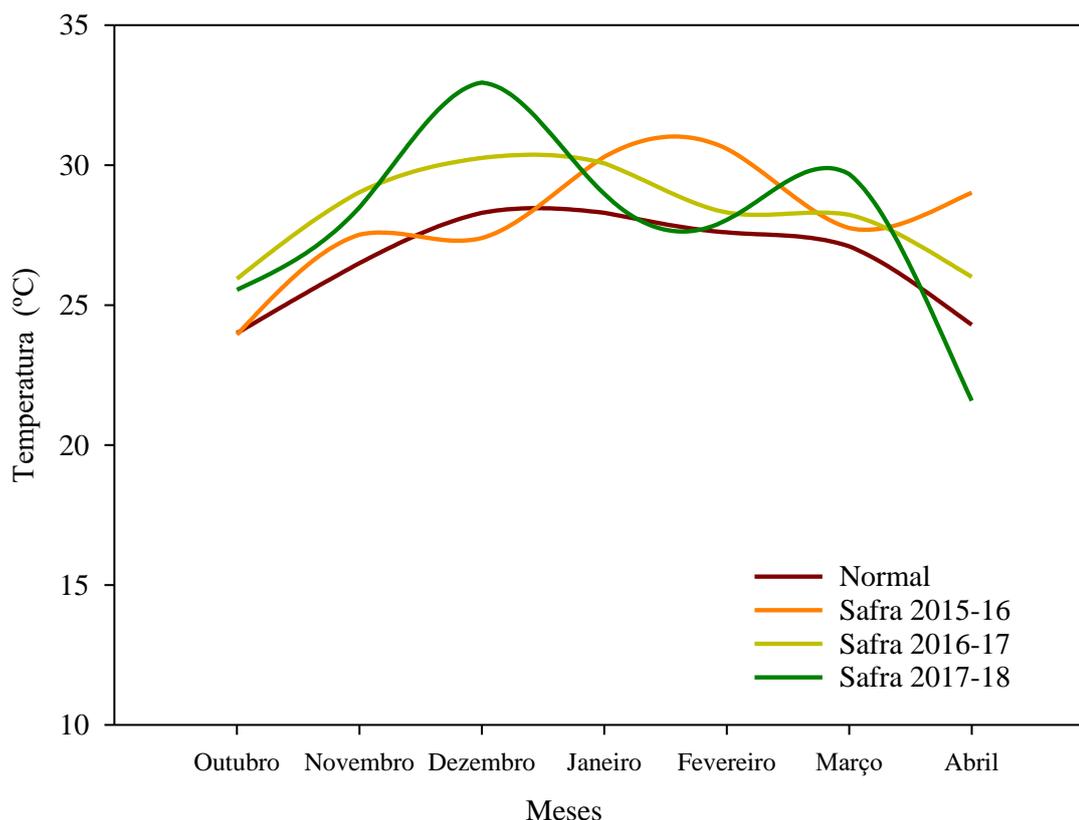


FIGURA 6. Temperatura média do ar ocorrida nas safras 2015-16; 2016-17 e 2017/18 (Dados da estação micrometeorológica instalada na lavoura) e a normal climatológica para o município de Passo Fundo (1981-2010) (INMET, 2019). Carazinho, RS.

A safra 2016-17 foi a que apresentou dados de temperatura média do ar com menor variação, de 26 a 30 °C. Já para a safra 2017-18 as temperaturas médias do ar variaram de 25 a 36 °C.

O Rio Grande do Sul é conhecido pela sua variabilidade interanual quando o assunto é a precipitação (Berlato, 1992), o que também foi verificado ao longo dos três anos do experimento. Na maior parte dos meses, as precipitações pluviiais ocorridas nas três safras avaliadas foram menores do que a normal climatológica, especialmente no mês de janeiro, mês muito importante para o desenvolvimento da soja. (Figura 7). As safras

de 2016-17 e 2017-18 acumularam maior quantidade de precipitação ao longo safra, bastante superior ao observado na safra 2015-16. Dada a variabilidade observada deste elemento ao longo de cada safra e entre as três safras, pode-se intuir que a condição hídrica pode ter ocasionado problemas de crescimento e desenvolvimento das plantas.

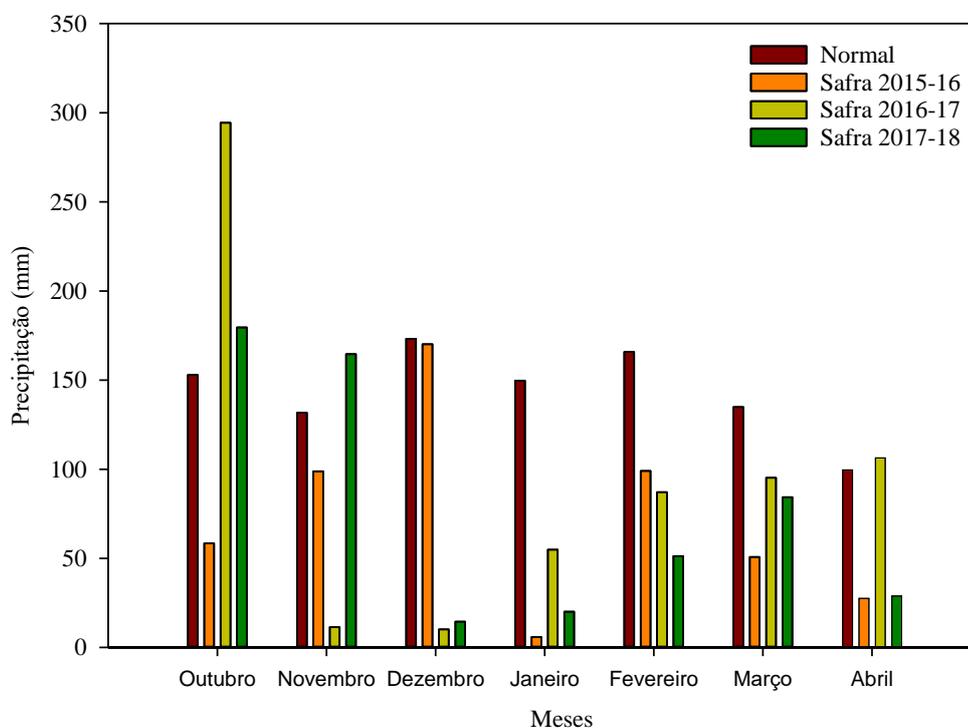


FIGURA 7. Precipitação pluvial ocorrida nas safras 2015-16; 2016-17 e 2017/18 (Dados da estação micrometeorológica instalada na lavoura) e a normal climatológica para o município de Passo Fundo (1981-2010) (INMET, 2019). Carazinho, RS.

Já a análise da densidade de fluxo de radiação solar global (R_g), verifica-se que a normal climatológica foi maior em todos os meses comparando com a radiação medida na lavoura. A safra 2015-16 apresentou menores valores de R_g , sendo que seu pico máximo ocorreu no mês de janeiro (Figura 8). Nas outras duas safras, o mês de janeiro apresentou valores menores de R_g sendo que na safra 2017-18 os meses de dezembro e fevereiro foram os que apresentaram os maiores valores. A baixa radiação solar pode afetar o crescimento das plantas, pois a radiação solar é utilizada pelas plantas para a realização dos processos fotossintéticos.

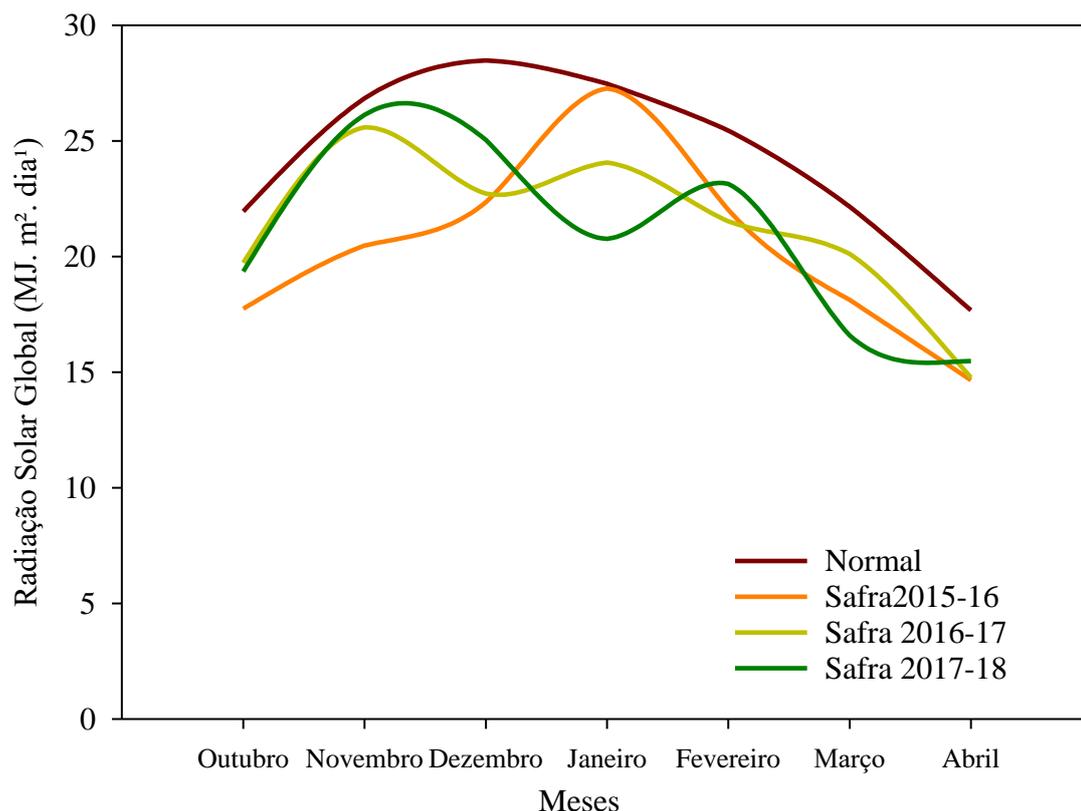


FIGURA 8. Radiação Solar Global nas safras 2015-16; 2016-17 e 2017/18 (Dados da estação micro meteorológica instalada na lavoura) e a normal climatológica para o município de Passo Fundo (1981-2010) (INMET, 2019). Carazinho, RS.

2.9 Referências

- ADEBOYE, O. B. *et al.* Impact of water stress on radiation interception and radiation use efficiency of Soybeans (*Glycine max L. Merr.*) in Nigeria. **Brazilian Journal of Science and Technology**, [São Paulo, Brazil], v. 3, n. 1, p. 1-10, 4 maio 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1186/s40552-016-0028-1>. Acesso em: 08 maio 2020.
- ALADOS, I.; FOYO-MORENO, I.; ALADOS-ARBOLEDAS. Photosynthetically active radiation: measurements and modelling. **Agriculture and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 78, n. 1-2, p. 121-131, 1996. Disponível em: <http://hera.ugr.es/doi/15005057.pdf>. Acesso em: 03 maio 2020.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [Berlin, Germany], v. 22, n. 6, p. 711-728, 1 dez. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 15 dez. 2019.

ARIAS, C. A. *et al.* Desenvolvimento de cultivares de soja com tolerância à deficiência hídrica. **Anais do Simpósio Sobre Tolerância à Deficiência Hídrica em Plantas**, Santo Antônio de Goiás, p. 130-134, out. 2015.

ARSEGO, D. A. *et al.* Indicadores climáticos e a produtividade de soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [São José dos Campos-SP, Brazil], v. 34, n. 2, p. 191-200, jun. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863340024>. Acesso em: 15 dez. 2019.

BAO, G. *et al.* Modeling net primary productivity of terrestrial ecosystems in the semi-arid climate of the Mongolian Plateau using LSWI-based CASA ecosystem model. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [Netherlands], v. 46, p. 84-93, abr. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2015.12.001>. Acesso em: 15 dez. 2019.

BARONI, G.; BENEDETI, P.; SEIDEL, D. Cenários prospectivos da produção e armazenagem de grãos no Brasil. **Revista Thema**, Pelotas, v. 14, n. 4, p. 55-64, 6 dez. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.15536/thema.14.2017.55-64.452>. Acesso em: 15 dez. 2019.

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

BERGAMASCHI, H. *et al.* **Clima da Estação Experimental da UFRGS** (e Região de Abrangência). Porto Alegre: UFRGS, 2003. 78 p.

BERLATO, M. A. As condições de precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul e os impactos da estiagem na produção agrícola. *In*: BERGAMASCHI, H. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, 1992. p. 11-23.

CAMPILLO, C. *et al.* Solar radiation effect on crop production. *In*: BABATUNDE, E. B. **Solar radiation**. Spain: Intecopen, 2012. p. 167-194. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=duOZDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA167&dq=solar+radiation+effect+on+crop+production&ots=_eF7H8Vf2q&sig=ecaJkoTLk2sLbSFHc-aPar1umzk#v=onepage&q=solar%20radiation%20effect%20on%20crop%20production&f=false. Acesso em: 25 abr. 2020.

CASTANHO, R. B.; TEIXEIRA, M. E. S. ROBERTO B. A evolução da agricultura no mundo. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, Ituiutaba, v. 8, n. 1, p. 136-146, jan./jun. 2017. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/braziliangeojournal/article/view/50874>. Acesso em: 15 dez. 2019.

CUNHA, G. R.; PASINATO, A. Análise agrometeorológica da safra de soja 2016/2017 em Passo Fundo, RS. *In*: COSTAMILAN, L. M. (ed.). **Soja: resultados de pesquisa 2016/2017**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2017. p. 9-15. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/164778/1/ID44113-2017DO171p9.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2019.

EMBRAPA TRIGO. Laboratório Agrometeorologia. **Informações meteorológicas:** diárias. [Dados diários de temperatura e precipitação 2019]. Passo Fundo: EMBRAPA, 2019. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/pesquisa/agromet/app/principal/agromet.php>>. Acesso em: 17 jul. 2019.

FONTANA, D. C. *et al.* Inferências sobre o calendário agrícola a partir de perfis temporais de NDVI/MODIS. **Bragantia**, São José dos Campos, SP, v. 74, n. 3, p. 350-358, 28 jul. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0439>. Acesso em: 23 jun. 2020.

FONTANA, D. C. *et al.* NDVI e alguns fatores de variabilidade. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., 2019, Santos. **Anais [...]**. Campinas: GALOÁ, 2019. Disponível em: <<https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/ndvi-e-alguns-fatores-de-variabilidade>>. Acesso em: 14 jun. 2019.

GAVA, R. *et al.* Estresse hídrico em diferentes fases da cultura da soja. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, CE, v. 9, n. 6, p. 349-359, 17 nov. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v9n600368>. Acesso em: 08 maio 2020.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its application. **Agricultural and Forest Meteorology**, Netherlands, v. 103, p. 137-157, 2000.

JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto da vegetação. *In:* JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parênteses Editora, 2011. Cap: 11 – Sensoriamento Remoto da Vegetação, p. 357-402.

JUNGES, A. H.; FONTANA, D. C. Desenvolvimento das culturas de cereais de inverno no Rio Grande do Sul por meio de perfis temporais do índice de vegetação por diferença normalizada. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 39, n. 5, p. 1349-1355, 19 jun. 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782009005000114>. Acesso em: 02 set. 2018.

KULMAN, D. *et al.* Ocorrência de estiagem no Rio Grande do Sul no período de 1981 à 2011. **Ciência e Natura**, Santa Maria, RS, v. 36, n. 3, p. 1-10, 15 set. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5902/2179460x13205>. Acesso em: 08 maio 2020.

MARTORANO, L. G. **Padrões de resposta da soja a condições hídricas do sistema solo-planta-atmosfera, observados no campo e simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT**. 2007. 170 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia, Agrometeorologia)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/8865/000589984.pdf;sequence=1>>. Acesso em: 21 jan. 2020.

MAZOYER, M.; ROUDART, L. **História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea**. [Tradução de Cláudia F. Falluh Balduino Ferreira]. São Paulo: UNESP, 2010. Acesso em: 02 set. 2018.

MERCANTE, E. *et al.* Modelos de regressão lineares para estimativa de produtividade da soja no oeste do Paraná, utilizando dados espectrais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, SP, v. 30, n. 3, p. 504-517, jun. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-69162010000300014>. Acesso em: 02 set. 2018.

MONTHEITH, J. L. Solar radiatin and productivity in tropical ecosystem. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 9, p. 747-766, 1972. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2401901>. Acesso em: 08 maio 2020.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologia de Aplicação**. 3. ed. São Jose dos Campos: Ufv, 2007.

NASA. **MODIS**: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. Washington, DC, [2019]. Disponível em: <https://modis.gsfc.nasa.gov/>. Acesso em: 17 jul. 2020.

PETTER, F. A. *et al.* Elevada densidade de semeadura aumenta a produtividade da soja? Respostas da radiação fotossinteticamente ativa. **Bragantia**, São José dos Campos, SP, v. 75, n. 2, p. 173-183, 26 abr. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.447>. Acesso em: 18 jan. 2020.

PONZONI, Flávio Jorge et al. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2015. 176 p.

RISSO, J. *et al.* Potencialidade dos índices de vegetação EVI e NDVI dos produtos MODIS na separabilidade espectral de áreas de soja. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais [...]**. Natal: INPE, 2009. p. 379-386. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.00.07/doc/379-386.pdf>. Acesso em: 08 maio 2020.

RIZZI, R. *et al.* Estimativa da área de soja no Mato Grosso por meio de imagens MODIS. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais [...]**. Natal: Inpe, 2009. p. 387-394. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.16.18.50.57/doc/387-394.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2020.

RODIGHERI, G. *et al.* Análise espectro-temporal DE NDVI e área da soja cultivada frente ao La Niña de 2012. **Agrometeoros**, Passo Fundo, RS, v. 27, n. 1, p. 1-10, 6 mar. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v27i1.26569>. Acesso em: 18 jan. 2020.

RODIGHERI, G. **Modelagem da produtividade primária líquida utilizando dados coletados de sensores remotos**: avaliação de impactos e perdas em área agrícola. 2020. 87 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/209913/001114654.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 18 jan. 2021.

- ROSA, R.; SANO, E. E. Determinação da produtividade primária líquida (NPP) de pastagens na bacia do rio Paranaíba, usando imagens MODIS. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, Barcelona, p. 367-395, 2013. Disponível em: <<http://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/274>>. Acesso em: 17 set. 2018.
- ROUSE, J. W. *et al.* Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE SYMPOSIUM*, 3., 1973, Washington. **Proceedings** [...]. Washington: NASA, 1973. p. 309-317.
- SCHAPARINI, L. P. *et al.* Análise comparativa entre índices de vegetação e sua relação com o balanço hídrico em soja. *Agrometeoros*, Passo Fundo, RS, v. 27, n. 1, p. 1-8, 6 mar. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v27i1.26574>. Acesso em: 08 maio 2020.
- SEDIYAMA, T.; TEIXEIRA, R. C.; REIS, M. S. (ed.). Melhoramento da soja. *In: BOREM, A. (ed.). Melhoramento de espécies cultivadas*. Viçosa, MG: Editora UFV, 1999. 808 p.
- SENTELHAS, P. C. *et al.* The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. *The Journal of Agricultural Science*, United Kingdom, v. 153, n. 8, p. 1394-1411, 24 abr. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1017/s0021859615000313>. Acesso em: 18 jan. 2021.
- SOUZA, P. J. O. P. *et al.* Consumo hídrico da soja no nordeste paraense. *Irriga*, Botucatu, SP, v. 1, n. 01, p. 218-231, 18 jun. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2016v1n01p218-231> Acesso em: 05 maio 2021.
- STRECK, E.V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. 2 ed. Porto Alegre: Emater/RS, 2008. 222 p
- THENKABAIL, P. S. *et al.* Selection of Hyperspectral Narrowbands (HNBS) and Composition of Hyperspectral Twoband Vegetation Indices (HVIs) for Biophysical Characterization and Discrimination of Crop Types Using Field Reflectance and Hyperion/EO-1 Data. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, United States, v. 6, n. 2, p. 427-439, abr. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/jstars.2013.2252601>. Acesso em: 05 maio 2021.
- USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Production, Supply and Distribution Online**. United State, 2020. Disponível em: http://www.usda.gov/wps/portal/usda/usdahome?navid=DATA_STATISTICS. Acesso em: 23 abr. 2020.
- VAN ROEKEL, R. J.; PURCELL, L. C. Soybean Biomass and Nitrogen Accumulation Rates and Radiation Use Efficiency in a Maximum Yield Environment. *Crop Science*, United State, v. 54, n. 3, p. 1189-1196, maio 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2013.08.0546> Acesso em: 23 abr. 2020.

ZANON, A. J. *et al.* Contribuição das ramificações e a evolução do índice de área foliar em cultivares modernas de soja. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 3, p. 279-290, set. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0463> . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052015000300279&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 15 out. 2019.

3 CAPÍTULO 1

Análise comparativa entre índices de vegetação e sua relação com o balanço hídrico em soja*

*Artigo formatado conforme as normas da Revista Brasileira de Agrometeorologia - Agrometeoros



AUTORIZAÇÃO

Autorizamos a **Sra. LAURA PIGATTO SCHAPARINI**, engenheira-agrônoma e estudante de mestrado, a utilizar o artigo **Análise comparativa entre índices de vegetação e sua relação com o balanço hídrico em soja**, publicado em AGROMETEROS, v. 27, n.1., p. 183-190, 2019, DOI: <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v27i1.26574>, de autoria de Laura Pigatto Schaparini, Denise Cybis Fontana, Genei Antonio Dalmago, Grazieli Rodigheri, José Maurício Cunha Fernandes, Anderson Santi e Paulo Roberto Vargas, como parte da dissertação de mestrado a ser submetida pela autora solicitante ao PPG Fitotecnia – UFRGS.

Passo Fundo, 20 de julho de 2020

Gilberto R. Cunha
Editor-Chefe
Revista AGROMETEOROS



Analise comparativa entre índices de vegetação e sua relação com o balanço hídrico em soja

Laura Pigatto Schaparini¹, Denise Cybis Fontana^{1,2(*)}, Genei Antonio Dalmago³, Grazieli Rodigheri², José Mauricio Cunha Fernandes³, Anderson Santi⁴ e Paulo Roberto Vargas⁴

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Faculdade de Agronomia. Avenida Bento Gonçalves 7712, Caixa Postal 15096, CEP 91501-970. Porto Alegre, RS. E-mails: laura_pigatto@yahoo.com.br e dfontana@ufrgs.br

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto – PPGSR, Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia – CEP SRM. Av. Bento Gonçalves, 9500 – Campus do Vale– Caixa Postal 15044, CEP 91501-970 Porto Alegre, RS. E-mail: grazielirodigheri@gmail.com

³Embrapa Trigo. Rodovia BR 285, km 294, Caixa Postal 3081, CEP 99050-970 Passo Fundo, RS. E-mails: genei.dalmago@embrapa.br, mauricio.fernandes@embrapa.br e anderson.santi@embrapa.br

⁴Fazenda Capão Grande, Carazinho, RS. E-mail: paulovargas@annex.com.br

(*) Autor para correspondência.

INFORMAÇÕES

História do artigo:

Recebido em 17 de setembro de

2019 Aceito em 4 de março de 2020

Termos para indexação:

soja
condição hídrica
NDVI
EVI
evapotranspiração

RESUMO

A soja é uma leguminosa de ciclo anual e de grande importância econômica no Rio Grande do Sul. Para essa cultura, estresses provocados por deficiência hídrica são responsáveis pela instabilidade no rendimento e na produção de grãos. Uma das formas de monitorar a deficiência hídrica é por meio do sensoriamento remoto, o qual vem sendo amplamente utilizado na agricultura, muito frequentemente como índices de vegetação (IVs). O objetivo deste trabalho foi avaliar o padrão temporal dos índices NDVI e EVI para três safras de soja, com condições hídricas distintas, de forma a possibilitar a avaliação da relação entre IVs e as condições hídricas para a cultura. A área do experimento On Farm foi localizada no município de Carazinho – RS. Na lavoura foi instalada uma estação meteorológica para medição de variáveis ambientais. Foi calculado o balanço hídrico diário para cada safra levando em consideração a evapotranspiração da cultura (ETc). Os IVs foram extraídos da plataforma Google Earth Engine (GEE). Além da análise gráfica, realizou-se análise de correlação entre os IVs e a ETc da soja. Tanto o NDVI quanto o EVI apresentaram forte relação com o desenvolvimento vegetativo das plantas, variando de forma semelhante ao longo do ciclo da soja. Ambos os índices tiveram o mesmo padrão de oscilações dos perfis nos períodos de deficiência hídrica. O NDVI e o EVI podem ser utilizados para avaliação da condição hídrica da cultura da soja.

© 2020 SBAgrom. Todos os direitos reservados.

3.1 Introdução

A agricultura é uma das principais bases da economia do Brasil, abrangendo desde extensas monoculturas até a diversificação da produção em pequenas propriedades. O Rio Grande do Sul (RS) contribui, de forma marcante, para a definição da oferta nacional de alimentos. Cerca de 90% da área de cultivo é voltada à produção de grãos (cereais e oleaginosas), que se configura na principal atividade agrícola do Estado (Conab, 2018).

A soja (*Glycine max*) é uma leguminosa de ciclo anual de primavera-verão que ocupa a maior área cultivada, sendo, portanto, a de maior importância econômica. Ao longo das últimas décadas, a produção de soja tem apresentado grande avanço, impulsionada não somente pelo aumento de área cultivada, mas também pela aplicação de técnicas de manejo avançadas, que tem permitido o incremento na produtividade (Freitas, 2011).

As condições meteorológicas quando adversas são aquelas que, com maior frequência, determinam limitações no incremento de biomassa e, conseqüentemente, da produtividade agrícola. Segundo Hoogenboom (2000), dentre todas as variáveis meteorológicas, a radiação solar, a temperatura do ar e a precipitação pluvial são as que mais determinam o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas. Porém, no Rio Grande do Sul, a variabilidade na precipitação pluvial é a responsável pelos maiores impactos negativos às culturas produtoras de grãos. Para Bergamaschi et al (2003), a variação sazonal da condição hídrica no estado é causada principalmente pela maior demanda evaporativa da atmosfera no verão que, via de regra supera a precipitação pluvial. Nestas condições é comum a ocorrência de déficit hídrico, o qual se desenvolve quando a absorção de água do solo é menor do que a transpiração das plantas.

Para a soja, cujo os períodos críticos de desenvolvimento ocorrem eminentemente no período de verão, estresses provocados por deficiência hídrica são responsáveis pela instabilidade na produtividade e na produção de grãos do Estado, sendo muito variável de um ano para o outro (Berlato & Fontana, 1999). Dependendo do nível de estresse hídrico e do estágio fisiológico em que as plantas se encontram, diferentes processos biológicos podem ser afetados, causando importante variabilidade no rendimento de grãos da cultura e na qualidade do grão (Arias et al., 2015), o que se constitui em um dos principais problemas de per-das do setor.

A evapotranspiração (ET) é o processo biofísico pelo qual a energia do ambiente é trocada entre a superfície e a atmosfera através da evaporação direta da água do solo, da evaporação da água disponível em outras partes do sistema e da água que passa pelo dossel de plantas via processo de transpiração. É, portanto, um componente crítico ao desenvolvimento de vários processos físicos e biológicos dentro de um sistema de produção agrícola. Por exemplo, no desenvolvimento das plantas a evapotranspiração pode afetar, direta e indiretamente, processos em escala celular, foliar, copa e dossel da cultura (Katul et al., 2012). Dada a estreita relação entre ET e o crescimento e desenvolvimento das plantas (Monteiro, 2009), esta variável tem sido muito utilizada na elaboração de modelos de estimativa de produtividade para várias culturas de importância agrícola (Melo et al., 2004). Tais modelos, frequentemente, esbarram na necessidade de uma representação espacial mais detalhada dos rendimentos de grãos, do que aquela possível de ser obtida a partir de dados oriundos de estações meteorológicas de superfície, necessitando de outras estratégias de abordagem.

Uma das ferramentas que vem sendo amplamente utilizada na agricultura, com potencial de ampliar a amostragem de respostas de plantas, de forma mais detalhada geograficamente (Melo et al., 2008), é o sensoriamento remoto (SR). Os dados obtidos por SR podem servir de importante subsídio para a modelagem de crescimento e desenvolvimento das culturas, até mesmo da estimativa do rendimento de grãos das mesmas. Isso decorre de uma ampla gama de opções na hora da escolha do sensor, possibilitando a escolha de bandas espectrais específicas para a avaliação de processos específicos, ou momentos distintos do desenvolvimento de uma cultura (Jensen, 2011).

Nos estudos com SR é muito frequente o uso dos denominados índices de vegetação (IV). Os IVs são medidas radiométricas adimensionais que indicam a abundância relativa e a atividade da vegetação verde, incluindo índice de área foliar (IAF), porcentagem de cobertura verde, teor de clorofila, biomassa verde e radiação fotossinteticamente ativa. Entre as muitas possibilidades de equações disponíveis na literatura para este fim, o NDVI (do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*) é o mais utilizado. Outro IV com potencial de uso para acompanhamento da dinâmica da vegetação é o *Enhanced Vegetation Index* (EVI), o qual foi proposto posteriormente ao NDVI, por Huete et al. (2002). O EVI é um NDVI modificado desenvolvido para promover a redução das influências atmosféricas e do solo de fundo do dossel no monitoramento da vegetação. As fases de crescimento e desenvolvimento das culturas anuais apresentam valores de IVs distintos ao longo do ciclo, caracterizando os denominados perfis temporais dos IVs (Risso et al., 2009). Estes podem ser úteis em sistemas de monitoramento para identificar o impacto de eventos adversos em estádios fenológicos críticos.

Sabendo-se da importância econômica da soja para o RS, e do fato de que um dos principais fatores de variabilidade na produtividade é a deficiência hídrica e, ainda, que é possível monitorá-la usando índices de vegetação, o objetivo deste trabalho foi analisar o padrão temporal dos índices NDVI e EVI para três safras soja com condições hídricas distintas durante o ciclo, de forma a possibilitar a avaliação da relação entre IVs e as condições hídricas para a cultura.

3.2 Material e Métodos

O experimento foi conduzido em formato *On Farm*, em uma área comercial de uma propriedade de 553,7 hectares, localizada no Município de Carazinho, RS sob as coordenadas

28°13'46" S e 52°54'32", nas safras 2015-2016, 2016-2017 e 2017-2018. O clima da região segundo a classificação climática de Köppen, é Cfa ou seja, não há ocorrência de estação seca e as precipitações pluviais são distribuídas ao longo do ano (Alvares et al., 2013). O solo da área é um Latossolo Vermelho Aluminoférrico típico (Streck et al., 2008), profundo, com boa drenagem natural, adequado às culturas produtoras de grãos.

A semeadura da soja ocorreu em 16/11/2015, 8/11/2016 e 13/11/2017, com emergência das plantas em 24/11/2015, 16/11/2016 e 21/11/2017 e colheita em 24/03/2016, 24/03/2017 e 03/04/2018, respectivamente, para as três safras. Os genótipos utilizados em cada safra foram: BMX Apolo RR, NS 5445 IPRO e DM 5958 RSF IPRO, nas safras de 2015, 2016 e 2017, respectivamente, todos com hábito de crescimento indeterminado e pertencentes aos grupos de maturidade relativa: 5.5, 5.4 e 5.8, respectivamente. O espaçamento adotado foi de 45 cm entre linhas em todas as safras. A população final de plantas foi de 26,9, 26,8 e 23,9 plantas m⁻². A adubação de base foi realizada conforme análise de solo e indicação de alto rendimento de grãos para a cultura, com aplicação de 281 kg ha⁻¹ de NPK, da fórmula 05-20-20, em 2015, 304 kg ha⁻¹ de NPK, da fórmula 04-28-08, mais 171 kg ha⁻¹ de KCl, em 2016 e 300 kg ha⁻¹ de NPK da fórmula 04-28-08 mais 160 kg ha⁻¹ de KCl, em 2017. Os controles fitossanitários foram realizados conforme indicações técnicas e necessidade para o cultivo da soja.

Os dados de NDVI (Equação 1) e EVI (Equação 2) foram extraídos através da plataforma *-Google Earth Engine (GEE)*, uma plataforma gratuita de processamento em nuvem. Ambos índices foram extraídos para o polígono envolvente da área experimental.

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (1)$$

$$EVI = 2,5 \times \left(\frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + 2,4\rho_V + 1} \right) \quad (2)$$

Onde, ρ_{IV} a reflectância no comprimento de onda do infravermelho próximo e ρ_V a reflectância do vermelho.

Os dados meteorológicos foram coletados através de estação meteorológica instalada na lavoura, com sensores posicionados a 1,5 m de altura do solo para as três safras de soja. 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, marca Apogee. O vento foi medido com um anemômetro sônico bidirecional, modelo WINDSONIC1-L34, marca GILL. A precipitação pluvial (P) foi medida com o pluviômetro TB4-L da

Campbell Scientific, Inc. Todos os sensores foram conectados a um datalogger CR 1000, 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. O preenchimento de falhas quando ocorreram foi feita com dados meteorológicos registrados na estação meteorológica da Embrapa Trigo, pertencente ao 8º Distrito de Meteorologia (8º DISME) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A partir dos dados medidos foi calculada a evapotranspiração potencial (ETP) com o método de Penman-Monteith (1989). Para o cálculo da evapotranspiração da cultura (ETc), a ETP calculada foi multiplicada pelo coeficiente de cultura (Kc), cujos valores variaram de 0,56 a 1,50 (Farias et al, 2001), expressando as variações no consumo hídrico de cada fase fenológica da cultura. Com a ETc foi realizado o cálculo do balanço hídrico meteorológico diário, pelo método desenvolvido por Thornthwaite & Mather (1955) demonstrado por Cunha et al. (1992), ao longo do ciclo da soja para cada safra. O cálculo foi composto pelas variáveis meteorológicas P, ETc e a partir destas, foi calculada a diferença entre P e ETc e o negativo acumulado, que representa a perda potencial de água quando P não atende à demanda evaporativa da cultura. Para a capacidade de armazenamento de água no solo (CAD) foi utilizado o valor de 150 mm, para solos argilosos com culturas de raízes de moderada profundidade.

Os dados de IVs do sensor MODIS são gerados a partir de uma composição de imagens a cada 16 dias. Para realizar uma melhor comparação entre os dados meteorológicos e IVs, os valores de precipitação pluvial (mm) medidos e os valores de ETc (mm), excesso e deficiência hídrica (mm), oriundos do balanço hídrico diário foram somados para períodos de 16 dias. Sendo que, NOV_1 (01/11 a 16/11/2017), NOV_2 (17/11 a 02/12/2017), DEZ_1 (02/12 a 18/12/2017), DEZ_2 (19/12/2017 a 03/01/2018), JAN_1 (04/01 a 19/01/2018), JAN_2 (20/01 a 04/02/2018), FEV_1 (05/02 a 20/02/2018), FEV_2 (21/02 a 08/03/2018), MAR_1 (09/03 a 24/03/2018) e MAR_2 (25/03 a 09/04/2018). Os dados do balanço hídrico diário e dos IVs foram avaliados graficamente e analisados de acordo com a variação do padrão temporal ao longo da safra. Por fim, os dados de ETc, NDVI e EVI foram separados levando em consideração o período inicial do desenvolvimento vegetativo, de início de novembro até o final do mês de dezembro (subperíodo vegetativo) e pleno desenvolvimento, de início de dezembro até o final do ciclo (Subperíodo reprodutivo), para realização de análise de correlação de Pearson, com significância estatística de 95% e 99%.

3.3 Resultados e Discussão

A Figura 1 mostra o padrão de variação do NDVI e EVI ao longo da safra da soja para os três anos avaliados. Verifica-se que a evolução temporal dos mesmos mostrou algumas similaridades, o que é típico de culturas anuais (Junges & Fontana, 2009; Risso et al., 2012; Pinto et al., 2017). Em novembro, quando ocorreu a semeadura da soja, os valores dos IVs foram baixos e, posteriormente, mostraram crescimento até atingir o seu máximo nos meses de janeiro e fevereiro. Nestes meses, a soja encontrava-se no seu desenvolvimento vegetativo máximo, considerando as datas de semeadura de novembro. Em final de março a início de abril os valores dos IVs decresceram rapidamente, representando o período de maturação e de colheita da soja (Couto, 2012). Apesar destas similaridades, foram observadas, em ambos índices, importantes diferenças entre as safras avaliadas, as quais possivelmente tenham sido decorrentes das condições hídricas distintas, uma vez que os materiais genéticos utilizados foram todos de crescimento indeterminado e grupo de maturação próximos.

Na Figura 2 estão representados graficamente os perfis temporais dos dois IVs e também o Balanço Hídrico diário para cada período analisado, de forma a dar subsídios às análises.

Para as safras 2015-2016 e 2016-2017, o balanço hídrico evidenciou a ocorrência de deficiências hídricas em alguns períodos ao longo do ciclo da cultura da soja. Na safra 2015-2016 a deficiência ocorreu durante o mês de janeiro, enquanto que na safra 2016-2017 foi no final do mês de dezembro e no final do mês de janeiro e início de fevereiro. Os IVs, NDVI e EVI, responderam a esses períodos de baixa disponibilidade hídrica com redução nos valores. Nestas duas safras o perfil dos IVs não apresentou o padrão contínuo de evolução temporal (Fiori et al., 2015) como frequentemente se observa em culturas anuais com adequada

Figura 2. Componentes do balanço hídrico meteorológico durante as três safras analisadas. Excesso Hídrico, deficiência hídrica, evapotranspiração da cultura (ETc), precipitação pluviométrica. Índices de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Enhanced Vegetation Index* (EVI) ao longo do crescimento e desenvolvimento das plantas de soja em três safras no período de 2015 a 2018 [NOV_1 (01/11 a 16/11/2017), NOV_2 (17/11 a 02/12/2017), DEZ_1 (02/12 a 18/12/2017), DEZ_2 (19/12/2017 a 03/01/2018), JAN_1 (04/01 a 19/01/2018), JAN_2 (20/01 a 04/02/2018), FEV_1 (05/02 a 20/02/2018), FEV_2 (21/02 a 08/03/2018), MAR_1 (09/03 a 24/03/2018) e MAR_2 (25/03 a 09/04/2018)]. Carazinho – RS.

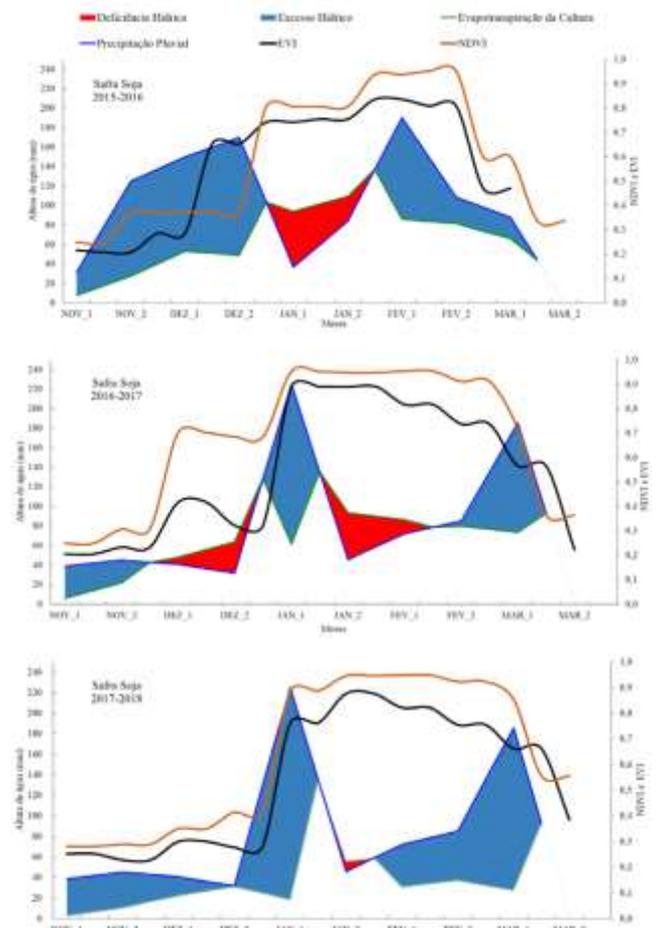
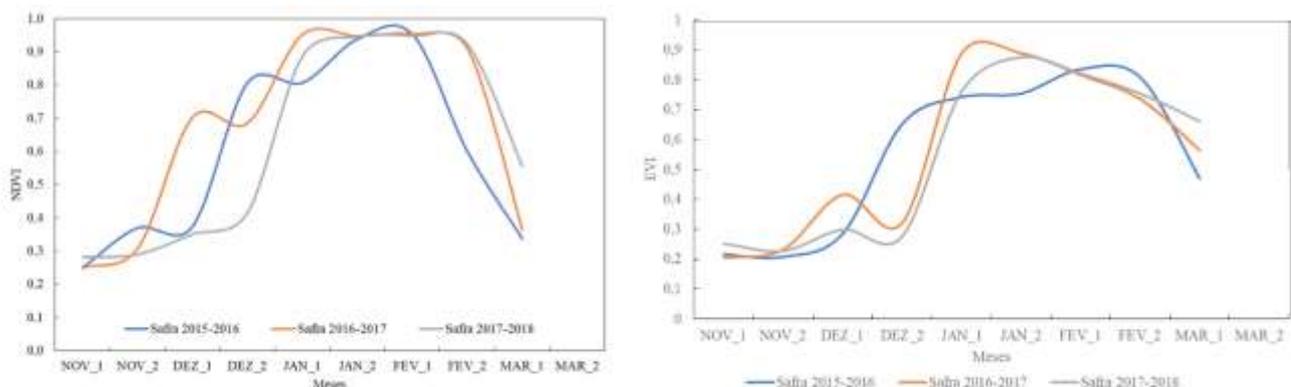


Figura 1. Perfil temporal dos índices de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Enhanced Vegetation Index* (EVI) ao longo do crescimento e desenvolvimento das plantas de soja em três safras no período de 2015 a 2018 [NOV_1 (01/11 a 16/11/2017), NOV_2 (17/11 a 02/12/2017), DEZ_1 (02/12 a 18/12/2017), DEZ_2 (19/12/2017 a 03/01/2018), JAN_1 (04/01 a 19/01/2018), JAN_2 (20/01 a 04/02/2018), FEV_1 (05/02 a 20/02/2018), FEV_2 (21/02 a 08/03/2018), MAR_1 (09/03 a 24/03/2018) e MAR_2 (25/03 a 09/04/2018)]. Carazinho, RS.



condição hídrica. Mas é importante ressaltar que, segundo Cunha (2017), períodos de deficiência hídrica no início do ciclo não acarretam necessariamente em perda de rendimentos de grão de soja na região de Passo Fundo.

Já na safra 2017/2018, o perfil de NDVI e EVI mostraram o padrão típico de variação de culturas anuais. Ao compararmos os perfis dos IVs com o balanço hídrico desta safra, observou-se evolução contínua e suave no tempo, o que pode ser explicado pelas condições hídricas do período, em que não ocorreram deficiências hídricas relevantes para as plantas (Figura 2). Segundo Roppa Kuss et al. (2008), lavouras de soja com disponibilidade hídrica adequada, seja por meio de irrigação ou precipitação pluvial ao longo de todo o ciclo, apresentam maiores rendimentos de grãos do que lavouras com disponibilidade de água irregular e abaixo da necessidade da cultura. Um período de estiagem pode estar relacionado a hidrologia do local (por exemplo, precipitação pluvial, umidade do solo), condição da planta (por exemplo, tipo, idade, estágio de crescimento e vigor, incluindo clorofila conteúdo e índice de área foliar que estão relacionados aos IVs) (Joiner et al., 2018).

Na Tabela 1 estão apresentados os valores de correlação entre ETc e os índices NDVI e EVI para as três safras analisadas. Os valores foram divididos entre os subperíodos vegetativos e reprodutivos da soja. Na Figura 3 encontram-se a dispersão dos dados para estes mesmos subperíodos.

No subperíodo vegetativo (início de novembro a final de dezembro) a ETc mostrou correlações positivas e significativas com ambos IVs (Tabela 1). Uma correlação positiva explica que o aumento de valor de uma variável pode ser explicado pelo aumento do valor de outra variável, ou seja, quanto maiores os IVs maior a ETc. Como, segundo Jensen (2011), os IVs são indicadores de biomassa verde é esperado que, em condições de maior biomassa verde, a ETc daquele dossel seja maior. Apesar das correlações significativas em ambos IVs, o NDVI apresentou correlação mais forte (99%) e menor dispersão dos dados com a ETc, do que o EVI.

Já as correlações no subperíodo seguinte, quando as plantas se encontravam na fase reprodutiva, evidenciou-se que, especialmente, o NDVI tendeu a saturação, sendo esta uma das principais limitações deste índice (Jensen, 2011; Almeida, 2008). O termo saturação é usado para os

casos em que aumentos ou diminuições na biomassa não resultam em consequentes variações no NDVI. Estudos vem demonstrando que, para a cultura da soja, a saturação do NDVI ocorre em IAF acima de 5,0 (Fontana et al., 2019), o que é característico do subperíodo reprodutivo da cultura. As correlações realizadas nesse subperíodo do desenvolvimento da soja foram baixas e negativas, decorrentes do fato de que, enquanto a ETc continua apresentando mudanças em função das condições de demanda hídrica da atmosfera e de incrementos de IAF, os IVs se mostram estabilizados em seus valores máximos, saturados. Apesar disso, no ciclo completo, as correlações foram positivas e significativas.

3.4 Conclusão

Os índices de vegetação, NDVI e EVI, podem ser utilizados como indicadores do desenvolvimento da soja ao longo da safra. Períodos de deficiência hídrica, demonstrados pelo balanço hídrico, acarretam em oscilações no perfil temporal dos IVs ao longo do ciclo da cultura. Safras de soja em que ocorrem pequenos ou nulos períodos de deficiência hídrica, tendem a apresentar perfis de NDVI e EVI mais contínuos. A ETc apresenta forte correlações com os IVs, reforçando que o desenvolvimento vegetativo adequado da soja, depende, principalmente, das condições hídricas ofertadas à lavoura.

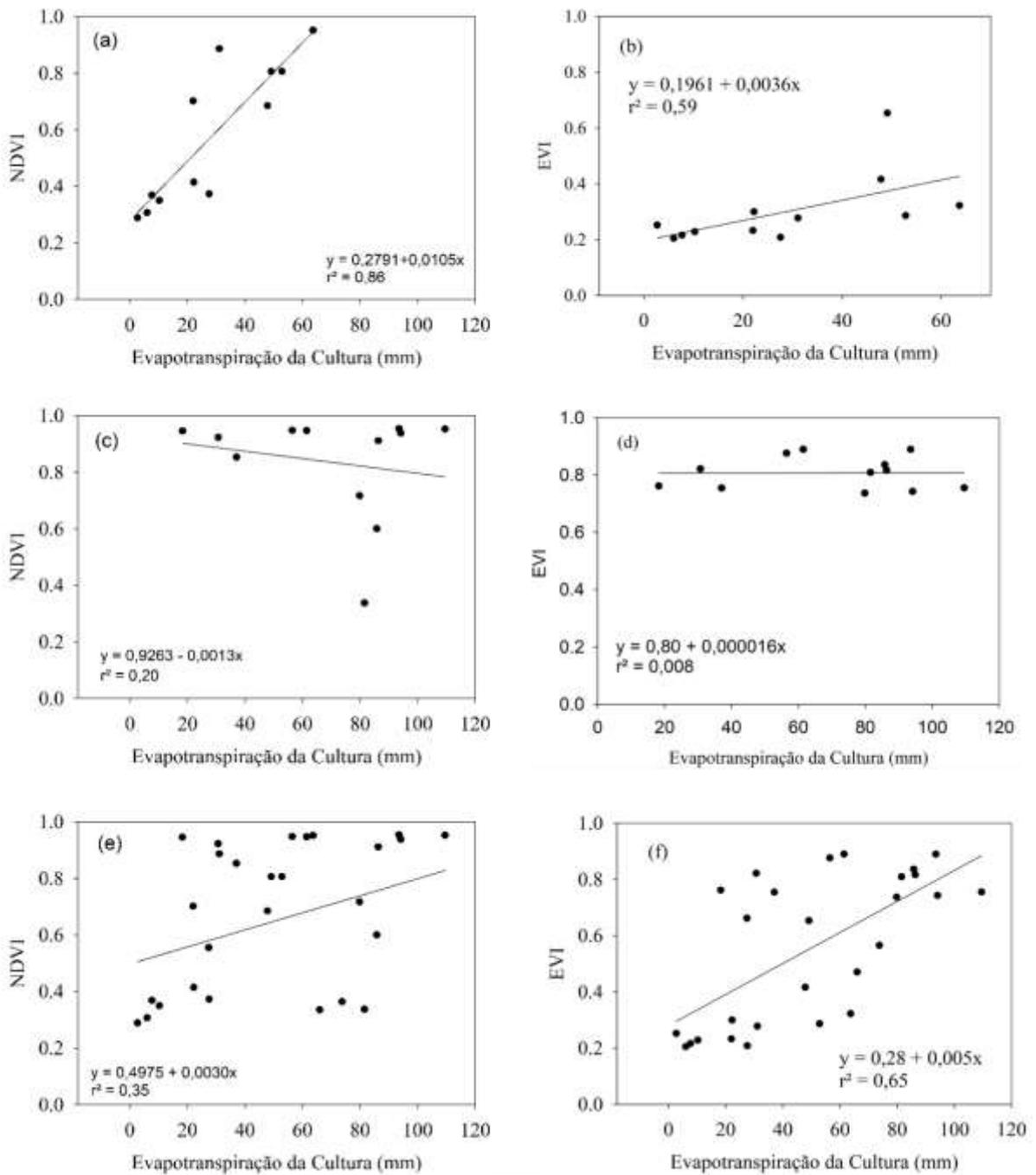
Agradecimento

O presente trabalho foi realizado com apoio da Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (CNPq) - Código de Financiamento 001 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.

Tabela 1. Coeficiente de correlação de Pearson entre a Evapotranspiração da cultura (ETc) e os Índices de vegetação (IVs) Normal-ized Difference Vegetation Index (NDVI) e Enhanced Vegetation Index (EVI) de todas as safras em conjunto (2015-2016, 2016-2017, 2017-2018) para o subperíodo vegetativo, subperíodo reprodutivo e ciclo completo da cultura. Carazinho, RS, 2019. Correlações com significância estatística (* $p > 0,05$; ** $p > 0,001$; ns = não significativo)

IVs	Evapotranspiração da Cultura		
	Subperíodo vegetativo	Subperíodo reprodutivo	Ciclo Completo
NDVI	0,86**	-0,19ns	0,35*
EVI	0,59*	-0,008ns	0,65**

Figura 3. Relação entre a Evapotranspiração da cultura e os Índices de vegetação Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e Enhanced Vegetation Index (EVI) de todas as safras em conjunto (2015-2016, 2016-2017, 2017-2018) para o subperíodo vegetativo (a, b), subperíodo reprodutivo (c, d) e ciclo completo da cultura (e, f). Carazinho, RS, 2019.



3.5 Referências

- ALMEIDA, T. **Respostas espectrais da soja sob diferentes condições hídricas e de preparo de solo**. Dissertação (PPG Sensoriamento Remoto UFRGS), 2008.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P.C., de MORAES GONÇALVES, J.L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s.l.], v. 22, n. 6, p.711-728, 1 dez. 2013. Schweizerbart. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ARIAS, C. A.; OLIVEIRA, M.F de; PÍPOLO, A. E.; CARNEIRO, G.S.; UBIRAJARA, J.; KASTER, M. Desenvolvimento de cultivares de soja com tolerância à deficiência hídrica. **Simpósio Sobre Tolerância à Deficiência Hídrica em Plantas**, Santo Antonio de Goias, p.130-134, out. 2015.
- BERGAMASCHI, H.; GUADAGNIN, M.R.; CARDOSO, L.S.; SILVA, M.I.G. Clima da Estação Experimental da UFRGS (e Região de Abrangência). Porto Alegre: UFRGS, 2003. 78p
- BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. Variabilidade Interanual da precipitação pluvial e rendimento da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p.119-125, jul. 1999.
- CONAB. **Bases de dados**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>. Acesso em 10 de set. 2018
- COUTO, A. F.; CARVALHO Jr, O.A.; MARTINS, E.S.. Séries temporais MODIS aplicadas em sucessão de culturas de soja (Glycine max (L.) Merrill) e milho (Zea mays L.) em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 64, n. 3, p. 405-418, 2012
- CUNHA, G. R., et al. Balanço Hídrico Climático. In: BERGAMASCHI, Homero et al. **Agrometeorologia Aplicada a Irrigação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1992. Cap. 5. p. 63-85.
- CUNHA, G. R; BERGAMASCHI, H. Efeitos da disponibilidade hídrica sobre o rendimento das culturas. In: BERGAMASCHI, H. et al. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, 1992. Cap.6, p.85-97.
- CUNHA, G. R; PASINATO, A. Análise agrometeorológica da safra de soja 2016/2017 em Passo Fundo, RS. **Soja: resultados de pesquisa 2016/2017**, p. 9, 2017.
- EMBRAPA. Exigências climáticas. In: EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja** - Paraná - 2003. Londrina: Embrapa Soja, 2002. Cap.1, p.28-30. (Sistemas de Produção; 2).
- FARIAS, J. R. B.; ASSAD, E.D.; ALMEIDA, I.R.; EVANGELISTA, B.A.; LAZZAROTTO, C.; MEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001
- FIORI, D.; TONIOLO, G.; CUNHA, H.; FONTANA, D.C.; SALDANHA, D.S. Relação entre NDVI e dados de precipitação em diferentes safras de soja no município de Cruz Alta - RS. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - Sbsr**, João Pessoa, v. 17, n. 1, p.6351-6357, abr. 2015. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1379.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2019.
- FREITAS, M. C. M. A cultura da soja no Brasil: o crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 7, n. 12, p.1-12, 31 maio 2011. Disponível em: <http://conhecer.org.br/enciclop/2011a/agrarias/a%20cultura%20da%20soja.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2019.
- FONTANA, D. C.; SANTOS, L.N.; DALMAGO, G.A.; SCHIRMBECK, J. SCHIRMBECK, L.W. NDVI e alguns fatores de variabilidade. In: **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2019, Santos. Anais eletrônicos... Campinas, GALOÁ, 2019. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/ndvi-e-alguns-fatores-de-variabilidade>. Acesso em: 14 jun. 2019.
- HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its application. **Agricultural and Forest Meteorology**, 103, 137-157, 2000.
- HUETE, A.; DIDAN, K; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E.P.; X GAO; FERREIRA, L.G., Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing Of Environment**, [s.l.], v. 83, n. 1-2, p.195-213, nov. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2). Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2). Acesso em: 17 set. 2019
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente – Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. Tradução da 2ª edição J.C.N EPIPHANIO (org.). São José dos Campos: Parênteses Editora. 2011. Cap: 11 – Sensoriamento Remoto da Vegetação, p 357.
- JOINER, J.; YOSHIDA, Y.; ANDERSON, M.; HOLMES, T.; HAIN, C.; REICHLE, R.; KOSTER, R.; MEDDLETON, E.; ZENG, F. Global relationships among traditional reflectance vegetation indices (NDVI and NDII), evapotranspiration (ET), and soil moisture variability on weekly timescales **Remote Sensing. Of Environment, Greenbelt**, p.339-352, 24 out. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.10.020>. Acesso em: 04 jun. 2019.
- JUNGES, A. H.; FONTANA, D. C. Desenvolvimento das culturas de cereais de inverno no Rio Grande do Sul por meio de perfis temporais do índice de vegetação por diferença normalizada. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 5, p. 1349-1355.
- KATUL, G. G.; OREN, R.; MANZONI, S.; HIGGINS, C.; PARLANGE, M.B. Evapotranspiration: A process driving mass transport and energy exchange in the soil-plant-atmosphere-climate system. **Reviews of Geophysics**, [s.l.], v. 50, n. 3, p.1-25, 20 jul. 2012. **American Geophysical Union** (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2011rg000366>.
- MONTEIRO, J. E. B. A. (Org.). **Agrometeorologia dos Cultivos**: O fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: Inmet, 2009. 530 p. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/porta/css/content/home/publicacoes/agrometeorologia_dos_cultivos.pdf. Acesso em: 14 jun. 2019.
- MELO, R. W.; FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A. Indicadores de produção de soja no Rio Grande do Sul comparados ao zoneamento agrícola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 12, p.1167-1175, dez. 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/pab/v39n12/22857.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2019.

- MELO, R. W.; FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; DUCATI, J.R. An agrometeorological–spectral model to estimate soybean yield, applied to southern Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, [s.l.], v. 29, n. 14, p.4013-4028, 14 jun. 2008. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160701881905>.
- PINTO, D. G.; FONTANA, D. C.; DALMAGO, G. A.; CUNHA, G.R.; FOCESATO, E.; VICARI, M.B.; GOUVEA, J.A.; SANTI, A. Temporal dynamics of spectral reflectance and vegetation indices during canola crop cycle in southern Brazil. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 47, n. 1, p.1-8, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20151403>>. Acesso em: 17 set. 2019.
- RIZZI, R.; RISSO, J.; EPIPHANIO, R.D.V.; RUDORFF, B.F.T.; FORMAGGIO, A.R.; SHIMABUKURO, Y.E.; FERNANDES, S.L. Estimativa da área de soja no Mato Grosso por meio de imagens MODIS, 2008. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 387-394.
- RISSO, J.; RIZZI, R; RUDORFF, B.F.T.; ADAMI, M.; SHIMABUKURO, Y.E.; FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, R.D.V. Índices de vegetação Modis aplicados na discriminação de áreas de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p.1317-1326, set. 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Marcos_Adami/publication/267560026_Indices_de_vegetacao_Modis_aplicados_na_discriminacao_de_areas_de_soja/links/54626fb30cf2c0c6aec1b263.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2019.
- ROPPA KUSS, R. C., KONIG, O.; DUTRA, L.M.C.; BELLÉ, A.; ROGGIA, S.; STURMER, G. Populações de plantas e estratégias de manejo de irrigação na cultura da soja. **Ciência Rural**, vol. 38, no. 4, 2008, p. 1133+. Academic OneFile, https://link.galegroup.com/apps/doc/A193835793/AONE?u=ufrgs_br&sid=AONE&xid=c840fa72. Accessed 4 June 2019
- ROUSE, J.W.; HAAS, R.H; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. 1973 In: **Earth Resources Technology Satellite Symposium**, 3., 1973, Washington. Proceedings... Washington: NASA. p.309-317.
- SATVEG (Org.). SATVeg: Sistema de Análise Temporal da Vegetação. 2019. Disponível em: <<https://www.satveg.cnptia.embrapa.br/satveg/login.html>>. Acesso em: 12 set. 2019
- 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.
- THORNTHWAIT, C.W.; MATHER, J.R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. **Publication in climatology**, Centerton, New Jersey, 10(3): 181-311. 1955.

4 CAPÍTULO 2

Balço radiação fotossinteticamente ativa (RFA): eficiência do uso pela cultura da soja (*Glycine max* L. Merrill) em diferentes safras

RESUMO

A radiação solar (Rg) é fonte de energia para os processos físicos e biológicos das plantas. De toda a radiação que incide sobre a vegetação, apenas alguns comprimentos de onda, chamados de radiação fotossinteticamente ativa (RFA), são utilizados para realização da fotossíntese. Além da Rg estar relacionada com a fotossíntese, ela é também responsável por outros aspectos ligados à fisiologia da planta e rendimento de grãos. Desta forma, o trabalho teve como objetivo quantificar os componentes do balanço de RFA da soja, ao longo de três safras e avaliar a variabilidade da eficiência de absorção, assim como da eficiência do uso da RFA. O experimento foi conduzido em formato On Farm, no município de Carazinho–RS, durante três safras. Foram obtidos dados meteorológicos na lavoura, além de dados biofísicos. Houve diferenças entre as safras, sendo 2016-17 a safra que apresentou um índice de área foliar mais eficiente em absorver a RFA. A eficiência do uso da radiação (EUR) das safras 2015-16, 2016-17 e 2017-18, foi de 1,99 g.m⁻², 1,78 g.m⁻² e 2,21 g.m⁻² de matéria seca por MJ de radiação absorvida, respectivamente. Apesar de não diferir entre safras, mostra diferenças entre as fases fenológicas. A maior EUR acontece no florescimento e enchimento de grãos, sendo fundamental para a definição da produção de grãos.

4.1 Introdução

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de alimentos. Dentre os fatores que favorecem essa condição, estão os edafoclimáticos adequados para o cultivo de diversas espécies agrícolas. Dentre os determinantes climáticos, destaca-se a disponibilidade de Rg como um dos mais importante ao crescimento e desenvolvimento das plantas.

A energia necessária para a realização da fotossíntese, processo que transforma o CO₂ atmosférico em energia metabólica, é proveniente da Rg (Taiz & Zieger, 2004). O processo fotossintético utiliza a Rg emitida na faixa de 400 a 700 nm, a qual é denominada de radiação fotossinteticamente ativa (RFA). Na maioria dos estudos, a RFA tem sido estimada como uma fração constante do espectro total da Rg incidente, podendo variar entre 44 a 69% de Rg dependendo de fatores climáticos como, pressão atmosférica, elevação solar, turbidez atmosférica, e precipitação pluvial (Alados *et al.*, 1996). Em média essa faixa energética corresponde a 48% da Rg incidente na superfície (Bergamaschi & Bergonci, 2017).

A absorção da RFA pelas culturas depende do seu índice de área foliar (IAF), geometria, tamanho das folhas, arranjo das plantas, densidade de semeadura, posição solar e época do ano, além da espécie cultivada, das condições meteorológicas e de práticas de manejo da cultura (Petter *et al.*, 2016). No caso do cultivo da soja (*Glycine max* L. Merrill), que apresenta elevada área foliar e rápida emissão de folíolos, ocorre vigoroso incremento na interceptação de Rg e rápido autossombreamento das folhas mais baixas (Casaroli *et al.*, 2007).

A conversão da energia solar em biomassa é conhecida como eficiência do uso da radiação (EUR) (Montheith, 1972), a qual pode ser definida pela quantidade de biomassa seca produzida por unidade de RFA absorvida pelo dossel. Normalmente, a EUR aumenta a partir da emissão do quinto trifólio, quando a intensidade de acúmulo da Matéria Seca Total (MST) é alta, mantendo-se elevada até o enchimento de grãos (Schöffel & Volpe, 2001). De acordo com Casaroli *et al.* (2007) na fase de enchimento de grãos, a EUR aumenta de forma linear, variando de 0,89 a 1,20 g MJ⁻¹ de RFA absorvida.

Dados de RFA e EUR têm sido amplamente estudados para uso em modelagem e análise de crescimento de culturas, em diferentes espécies vegetais e também para biomas (Sinclair & Mucho 1999; Tesfaye *et al.*, 2006; Stöckle & Kemanian 2009). Grande parte desses estudos tem sido feitos em parcelas experimentais o que, nem sempre, caracteriza o desenvolvimento da soja em condições de lavoura. No que concerne a soja, inúmeros trabalhos vêm sendo realizados a fim de encontrar parâmetros para otimização da produção e fornecimento de orientações sobre um melhor manejo à cultura (Silva *et al.*, 2013, Adeboye *et al.*, 2016; Tibolla *et al.*, 2019). Van Roekel e Purcell (2014) caracterizaram as taxas de acúmulo de biomassa, de nitrogênio e a EUR para a soja, encontrando informações fisiológicas sobre o acúmulo de nitrogênio e sua relação com a EUR. De acordo com esses autores, os valores de EUR variaram entre a faixa de 0,90 a 1,83 g MJ⁻¹ dependendo da adubação nitrogenada.

Tendo em vista o apresentado, somado ao panorama atual da agricultura globalizada e a escassez de dados que fazem referência e se aproximam das reais condições de desenvolvimento da soja submetida a realidade produtiva da região, fez-se a relevância do presente trabalho. Sendo assim, o objetivo desse estudo foi avaliar a variabilidade da eficiência de absorção, assim como da eficiência do uso da RFA, em três safras de soja cultivadas em uma lavoura comercial.

4.2 Material e Métodos

O experimento foi conduzido em formato *On Farm*, em uma propriedade de 553,7 hectares, localizada no município de Carazinho–RS sob as coordenadas 28°13'46" S e 52°54'32"W, nas safras 2015-2016, 2016-2017 e 2017-2018. O clima da região segundo a classificação climática de Köppen, é Cfa, subtropical sem ocorrência de estação seca e com precipitações pluviais distribuídas ao longo do ano (Alvares *et al.*, 2013). O solo da área é caracterizado como Latossolo vermelho aluminoférrico típico (Streck *et al.*, 2008), profundo, com boa drenagem natural, adequado às culturas produtoras de grãos.

A semeadura da soja ocorreu em 16/11/2015, 8/11/2016 e 13/11/2017, com emergência das plantas em 24/11/2015, 16/11/2016 e 21/11/2017 e colheita em 24/03/2016, 24/03/2017 e 03/04/2018, respectivamente, para as três safras. Os genótipos utilizados em cada safra foram: BMX Apolo RR, NS 5445 IPRO e DM 5958 RSF IPRO, nas safras de 2015, 2016 e 2017, respectivamente. O espaçamento adotado foi de 45 cm entre linhas em todas as safras, com população final de plantas de 26,9, 26,8 e 23,9 plantas m⁻². A adubação de base foi realizada conforme análise de solo e indicação de alto rendimento de grãos para a cultura, com aplicação de 281 kg ha⁻¹ de NPK, da fórmula 05-20-20, em 2015, 304 kg ha⁻¹ de NPK, da fórmula 04-28-08, adicionados 171 kg ha⁻¹ de KCl, em 2016 e 300 kg ha⁻¹ de NPK da fórmula 04-28-08 acrescidos de 160 kg ha⁻¹ de KCl, em 2017. Os controles fitossanitários foram realizados conforme indicações técnicas e necessidade para o cultivo da soja (Salvadori *et al.*, 2016).

Para as medidas biofísicas foram coletadas 8 (repetições) amostras de plantas de 0,5 m de segmento de linha em 2015 e 4 (repetições) amostras de 1 m de segmento de linha nos demais anos, em frequência semanal. Adotou-se o método de coleta de dados por amostragem (Surveys) simples, em transectos localizados na área central das glebas. O ponto central dos transectos tinha, pelo menos, 100 metros de raio em relação a borda da lavoura, garantindo representatividade às condições micrometeorológica das lavouras de soja. A estratégia de coleta de dados foi adotada para reduzir ao mínimo a interferência nos tratamentos culturais realizados pela equipe técnica da propriedade. Após a coleta, em laboratório as folhas foram separadas das outras partes, acondicionadas em embalagem de papel e colocadas em estufa de secagem de material vegetal, com circulação de ar forçada e na temperatura de 65°C até atingirem a massa da matéria seca constante. O

somatório da matéria seca de folhas e das outras partes das plantas resultou na MST da soja.

Paralelamente à determinação da MST, a cada 15 dias durante o ciclo, também foram coletadas 4 amostras de plantas pareadas. Estas plantas foram separadas no laboratório e a área foliar do conjunto das folhas de cada planta foi determinada em planímetro óptico, modelo 3100-L, marca LICOR. Em seguida as folhas foram colocadas para secar, seguindo procedimento daquelas colhidas no segmento de linha, até as folhas atingirem massa da matéria seca constante. Com os dados de área foliar e da massa de matéria seca de cada conjunto de folhas foi ajustada a equação de regressão linear para estimativa da área foliar específica para a soja (Richter *et al.*, 2014).

A aplicação da equação da área foliar específica, tendo como variável dependente de entrada a matéria seca de folhas determinada semanalmente, possibilitou a estimativa do IAF semanal da soja em cada ano experimental. Para as três safras foi utilizado um modelo sigmoidal na fase de crescimento do IAF e um modelo linear na fase de redução do IAF.

A Rg e a radiação solar fotossinteticamente ativa incidentes (RFAinc) foram medidas com um piranômetro modelo SP-110-L-10 e um sensor quantum modelo SQ-110, respectivamente. Ambos sensores são modelos da marca Apogee Instruments. A RFA transmitida ao nível do solo (RFAtr) e a refletida (RFArfl) pelo dossel da soja foram medidas utilizando barras de medição de radiação RFA, manufaturadas com cinco células de silício amorfo (Chartier *et al.*, 1989) e calibradas com o sensor quantum modelo SQ-110. Desta forma, foi obtida uma equação específica para cada sensor, cujo coeficiente angular da reta foi utilizado como coeficiente de conversão dos valores de RFA, registrados em milivolts, para $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Posteriormente, os dados foram transformados de $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$, de acordo com a equação 1 proposta por Thimijan e Heins (1983).

$$RFA_{Mj} = \sum_{dia} \left(RFA_{\mu\text{mol}} \times \frac{t}{4,596 \times 1,000,000} \right) \quad (1)$$

Onde t é tempo em segundos; o 4,596 é o fator de conversão de μmol em J e 1.000.000 é o fator de conversão de J em MJ.

No experimento, a medição da RFA_{tr} foi realizada com quatro sensores em 2015, oito em 2016 e 2017. A RFA_{rfl}, para os mesmos experimentos foi medida com quatro, quatro e seis sensores, respectivamente, em cada ano. Em seguida foram calculadas a RFA interceptada (RFA_{int}) (Equação 2), a RFA absorvida (RFA_{abs}) (Equação 3) e a eficiência de absorção (ϵ_{abs}) (Equação 4).

$$RFA_{int} = RFA_{inc} - RFA_{tr} \quad (2)$$

$$RFA_{abs} = RFA_{inc} - RFA_{rfl} - RFA_{tr} \quad (3)$$

$$\epsilon_{abs} = \frac{RFA_{abs}}{RFA_{in}} \quad (4)$$

No início do ciclo, os valores de RFA_{int} e RFA_{abs} foram estimados com um modelo exponencial ajustado em função dos dias após emergência (DAE). Isso foi necessário pois as medições iniciaram apenas entre 20 e 30 DAE das plantas. Um modelo exponencial, com dados diários foi ajustado para descrever a ϵ_{abs} em função do IAF, com base em dados de IAF e de ϵ_{abs} diárias. Foram feitas análises de regressão linear entre os dados de matéria seca total e os dados de eficiência de absorção. Deste modo, é possível relacionar a quantidade de matéria seca total acumulada ao longo do ciclo, com a RFA absorvida acumulada, em MJ m⁻², a qual expressa a eficiência com que a cultura utilizou a radiação solar (MONTEITH, 1977).

Para cada safra, o ciclo da soja foi dividido em quatro fases fenológicas representativas, considerando a escala fenológica de Ritchie *et al.* 1982 (adaptado por Yorinori, 1996). Para a fase vegetativa, considerou-se o período da emergência até o início do florescimento, já a fase florescimento abrangeu o início do florescimento até o início da formação de grãos. Considerou-se como fase de enchimento de grãos do início da formação de grãos até o momento em que houvesse 100% de formação de grãos em toda a planta. Por fim, a fase senescência que englobou o restante do ciclo, até a maturação de colheita.

Ao final do ciclo foi determinado o rendimento de grãos. Para isso foram colhidas quatro amostras no transecto central da área de 4,5 m² em 2015 e de 9 m² em 2016 e em 2017. As plantas foram acondicionadas em embalagens plásticas e no laboratório foram

trilhadas em colheitadeira de parcelas, modelo WINTERSTEIGER, marca CLASSIC. Os grãos foram separados e em seguida foi determinada a umidade dos mesmos, com o equipamento marca AGROLOGIC PORTÁTIL, modelo AL-101. O rendimento de grãos foi corrigido para 13% de umidade e calculado para uma área de um hectare.

Para a análise estatística avaliou-se os intervalos de confiança (IC) entre os coeficientes das equações lineares e exponenciais obtidas. As análises estatísticas foram realizadas no software R Studio.

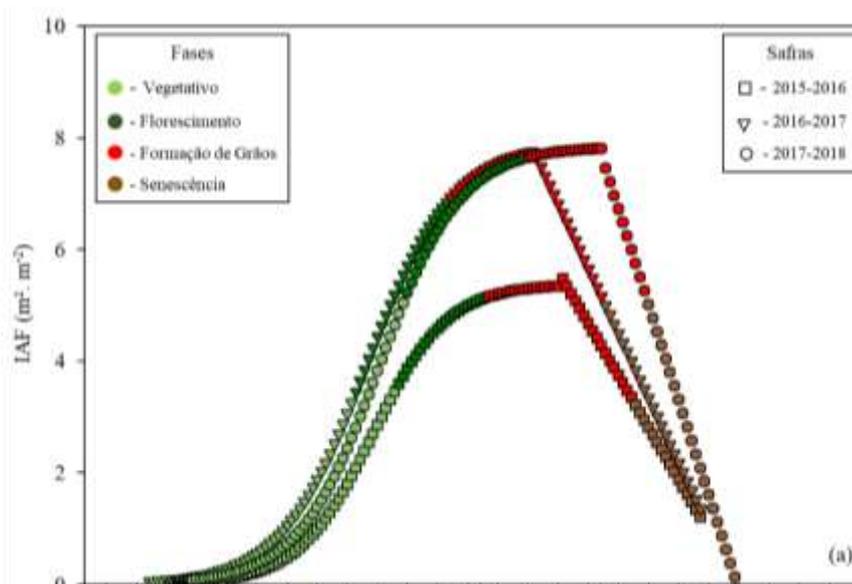
4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Crescimento e desenvolvimento da soja

Para as três safras avaliadas o IAF (Figura 1a) apresentou o padrão de evolução temporal esperado para culturas anuais, com valores crescentes da emergência das plantas, alcançando valores máximos próximos aos 80 dias após emergência (DAE) e redução ao final do ciclo com a senescência das folhas. Os valores de IAF observados estiveram dentro da faixa esperada para as três safras e para a cultura da soja no Rio Grande do Sul (Zanon *et al.*, 2015), oscilando de 0,02 a 7,81, com especificidades em cada safra. Em 2015-16 o IAF apresentou, ao longo de todo o ciclo se comparando as safras de 2016-17 e 2017-18, valores inferiores, não atingindo 6 no momento de máximo crescimento das plantas. Entretanto, nas demais safras os IAFs foram próximos a 8. O desenvolvimento do IAF, ao longo do ciclo, interfere diretamente na capacidade de interceptar a Rg incidente e conseqüentemente, na eficiência da fotossíntese realizada pela planta (Hu & Wiatrak, 2012).

Similar ao IAF, também a dinâmica do acúmulo de MST seguiu o padrão característico de culturas anuais (Figura 1b), sendo lento na fase vegetativa, rápido nas fases de florescimento e enchimento de grãos e com posterior decréscimo na fase de senescência, referente as quedas de folhas. A MST acumulada observada em cada safra foi de 1.073 g m², 1.247 g m² e 1.291 g m², respectivamente, para 2015-16, 2016-17 e 2017-18, valores semelhantes encontrados por Santos *et al.* (2017). Em parte, o padrão diferenciado entre as safras pode estar relacionado às condições hídricas também distintas entre as mesmas safras. Na safra 2015-16 é possível verificar um crescimento mais lento tanto do IAF quanto da MST (Figura 1) desde o início da safra, comprometendo o desenvolvimento das plantas ao longo de todo o ciclo. Além disso, segundo Schaparini *et al.* (2020), a safra 2015-16 apresentou um período de deficiência hídrica no mês de janeiro,

que compreendeu a fase de florescimento. Esse período de estresse nas fases de florescimento e enchimento de grãos, atrelado ao lento crescimento das plantas desde o início do ciclo, foram os principais fatores que acarretaram a redução de produtividade para a cultura (Gava *et al.*, 2015). A quantificação da MST para as safras é de extrema relevância, uma vez que, o aumento linear da MST em função da RFAabs resulta na EUR pela cultura (Pereira, 2002). Além da relação linear entre MST e RFAabs, a EUR pode estar relacionada com o potencial genético de cada cultivar, bem como a disponibilidade de água e nutrientes (Schöffel & Volpe, 2001).



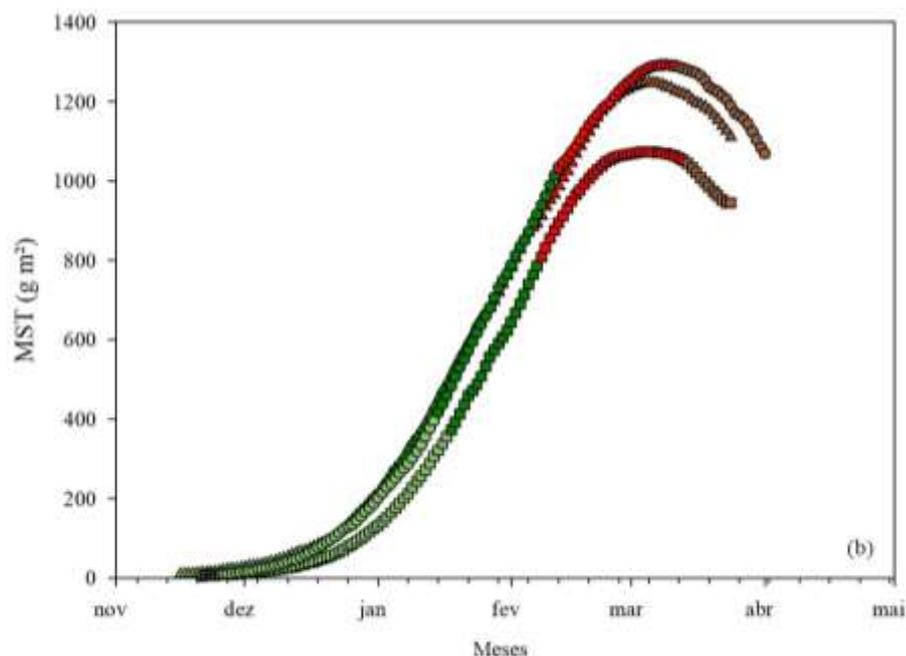


FIGURA 1. Índice de área foliar (IAF) (a) e matéria seca total (MST) (b) da soja, em função de dias após a emergência (DAE), nas safras de 2015-2016, 2016-2017 e 2017-2018 em Carazinho, RS.

4.3.2 Balanço de RFA

Na figura 2 é possível verificar o balanço de RFA para as três safras analisadas. A partir da análise de regressão entre os valores de R_g e RFA_{inc} (Tabela 1), constatou-se que o total da RFA_{inc} durante o ciclo da soja em cada safra correspondeu a cerca de 44%, 48% e 43% da R_g respectivamente. Resultados semelhantes foram obtidos por outros autores, que também encontraram valores próximos a 45% (Assis & Mendez, 1989; Cunha & Volpe, 2010; Petter *et al.*, 2016). A diferença entre a RFA_{inc} em relação a R_g foi significativa apenas na safra 2016-17, ao comparar as três safras, conforme demonstram os IC dos coeficientes da função ajustada (Tabela 1).

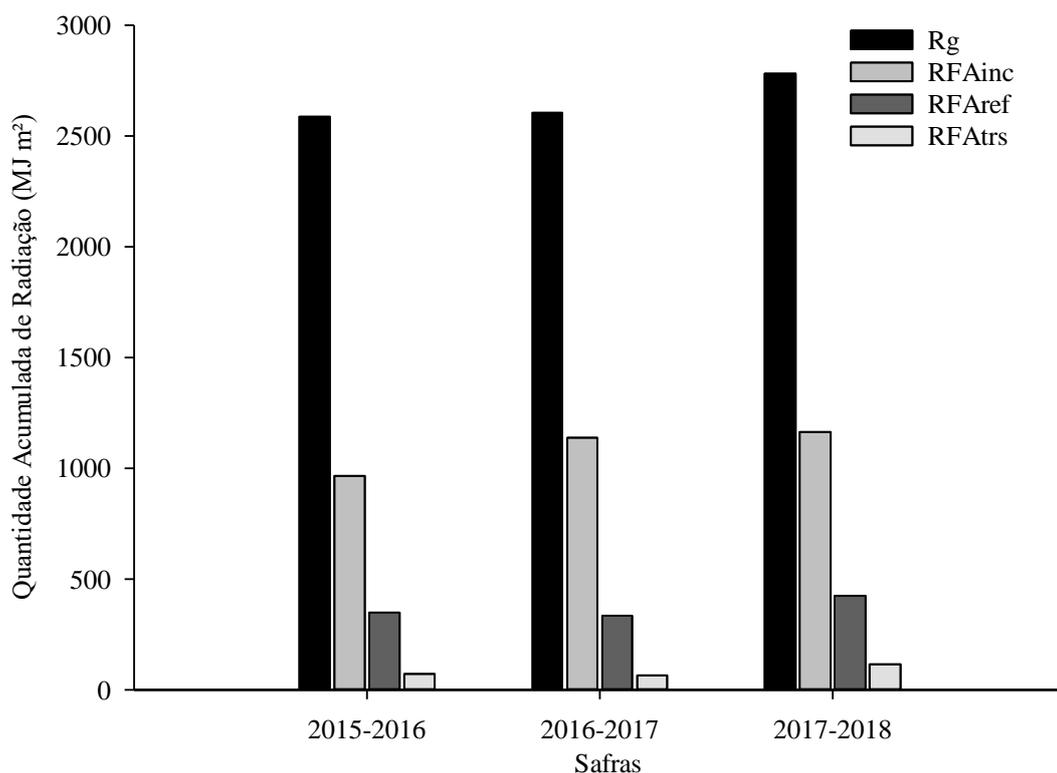


FIGURA 2. Quantidade de radiação solar global (Rg), radiação fotossinteticamente ativa incidente (RFAinc), refletida (RFAref) e transmitida (RFAtrs). Carazinho - RS / Brasil, safra 2015-16, 2016-17 e 2017-18.

TABELA 1. Intervalo de confiança (IC) máximo (97,5%) e mínimo (2,5%) dos coeficientes (a e b) da RFAinc em relação a Rg nas safras 2015-16; 2016-17; 2017-18.

Safras	Parâmetros					
	Equação	r ²	a		b	
			IC (2,5%)	IC(97,5%)	IC (2,5%)	IC(97,5%)
2015-2016	y= -0,04x + 0,44	0,92	-0,14	0,05	0,43	0,44
2016-2017	y= -0,12 + 0,48	0,98	-0,35	0,11	0,46	0,48
2017-2018	y= 0,48x + 0,43	0,93	-0,02	0,98	0,41	0,45

A RFAinc, conforme esperado, foi o componente de maior magnitude do balanço de RFA, apresentando valores acumulados, para toda a safra, de 965,82; 1.137,85 e 1.164,01 MJ m⁻², respectivamente, para as safras de 2015-16, 2016-17 e 2017-18. Já a RFAref acumulada ao longo do ciclo da soja foi de 348,82 MJ m² para a safra 2015-16; 334,19 MJ m² para a safra 2016-17 e 423,96 MJ m² para a safra 2017-18, sendo, 36%, 28%, 36%, respectivamente em relação a quantidade de RFAinc. Para a RFAtr, os valores foram menores se comparados a outros componentes, atingindo valores próximos a 100

MJ m⁻² nas três safras. Para a safra 2015-2016 cerca de 7% da RFAinc foi transmitida, enquanto para a safra 2016-2017 foi cerca de 6% e para a safra 2017-2018 foi cerca de 9%. As diferenças encontradas nas três safras referentes aos valores de RFA refletida e transmitida, se devem também aos distintos ciclos da soja para as três safras analisadas.

Do total de RFAint pela soja, aproximadamente, 92%, 94% e 90% foram efetivamente absorvidas pelas plantas para as safras 2015-16, 2016-17 e 2017-18, respectivamente (Figura 3). Através da análise dos IC dos parâmetros das equações lineares, a safra 2016-17 apresentou uma maior absorção da RFAint em relação as demais. Esse resultado está relacionado ao maior desenvolvimento foliar durante safra, confirmando a importância desse processo para a interceptação da RFA. A relação entre quantidade de RFAabs por RFAint em geral, é semelhante para dosséis vegetais semelhantes. Para o cultivo do milho o coeficiente angular da função linear entre ambas variáveis é da ordem de 92%, indiferente do manejo aplicado (irrigado e não irrigado) (Müller & Bergamaschi, 2005). Para a canola o coeficiente angular entre ambas variáveis apresenta valores em torno de 90% (Dalmago *et al.*, 2018). Neste estudo, Dalmago *et al.* (2018) demonstraram que, diferentes doses de adubação nitrogenada, podem acarretar em diferentes quantidades de RFAabs em relação a RFA interceptada.

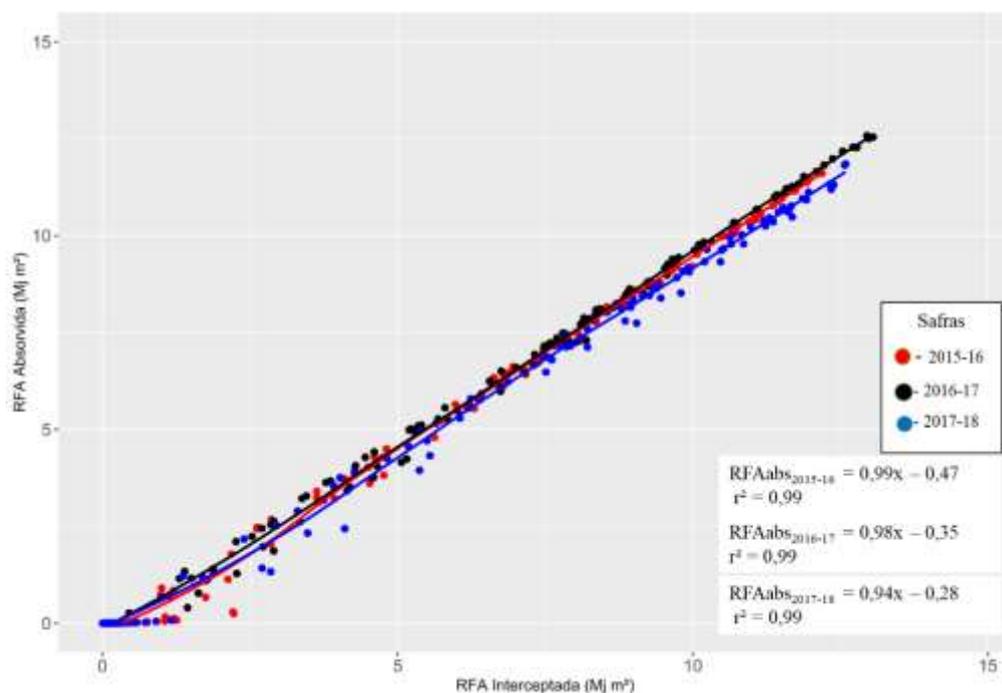


FIGURA 3. Radiação Fotossinteticamente Ativa absorvida em razão da Radiação Fotossinteticamente Ativa interceptada safras 2015-2016, 2016-2017 e safra 2017-2018 (c). Carazinho - RS.

Na Figura 4 é possível observar a relação entre o IAF e a eficiência de absorção da RFA (ϵ_{abs}), a qual assume uma forma exponencial, para as três safras. A eficiência de absorção apresentou valores crescentes em relação ao crescimento do IAF. Para a safra 2015-16 a máxima eficiência de absorção (0,96) ocorreu no máximo IAF (5,76) (Figura 1) da soja para a safra. No período de 2016-17 e 2017-18, a partir de um IAF de 4,5 (Figura 1), a soja já apresentou a máxima eficiência de absorção da RFA. Apenas a safra 2016-17 apresentou diferença dos parâmetros da equação em comparação com as demais (Tabela 2), apresentando um dossel vegetativo mais eficiente em absorver a RFA.

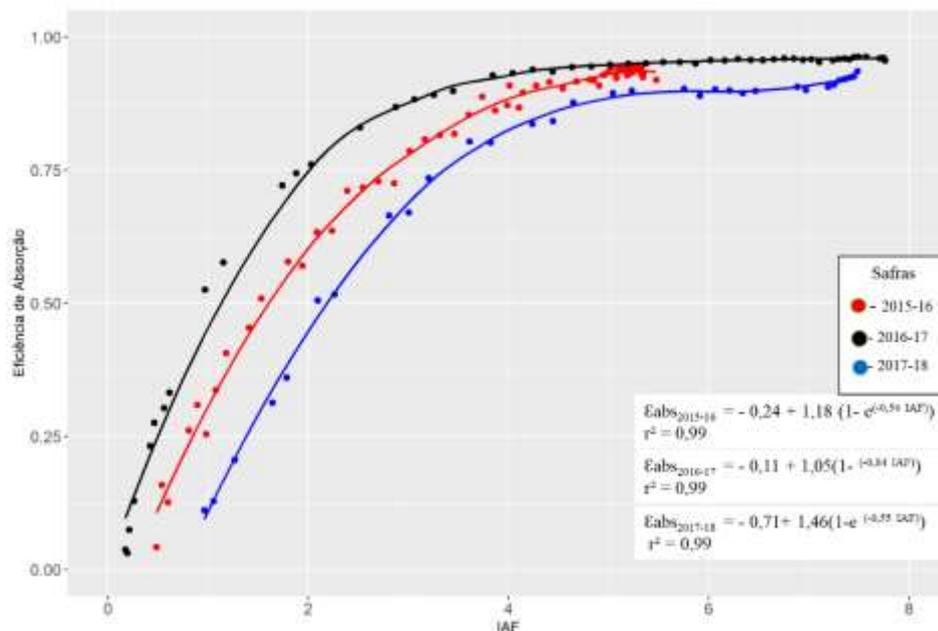


FIGURA 4. Eficiência de absorção da radiação fotossinteticamente ativa (ϵ_{abs}) observada o em razão do índice de área foliar (IAF) para a safra 2015-2016, 2016-2017 e safra 2017-2018 (c). Carazinho- RS.

TABELA 2. Intervalo de confiança (IC) máximo (97,5%) e mínimo (2,5%) dos coeficientes (a, b e c) da regressão exponencial para a eficiência do uso da radiação (EUR) da soja nas safras 2015-16; 2016-17; 2017-18.

Safras	Parâmetros					
	a		b		c	
	IC (2,5%)	IC (97,5%)	IC (2,5%)	IC (97,5%)	IC (2,5%)	IC (97,5%)
2015-16	1,17	1,23	0,53	0,60	-0,24	0,17
2016-17	1,05	1,07	0,87	0,89	-0,11	-0,09
2017-18	1,46	1,65	0,55	0,64	-0,71	-0,52

Por outro lado, os coeficientes angulares da reta de regressão linear (Figura 5), que relacionam a quantidade de MST acumulada ao longo do ciclo, com a RFAabs acumulada, em $MJ m^{-2}$, não apresentaram diferença entre as safras para o ciclo completo, conforme demonstra o IC dos coeficientes das equações (Tabela 3). A EUR das safras 2015-16, 2016-17 e 2017-18, foi de $1,99 g m^{-2}$, $1,78 g m^{-2}$ e $2,21 g m^{-2}$ de matéria seca por MJ de radiação absorvida, respectivamente. Dessa maneira, a EUR para as três safras pode ser estimada através de uma equação obtida com os valores médios dos dados de RFAabs e MST (Tabela 3).

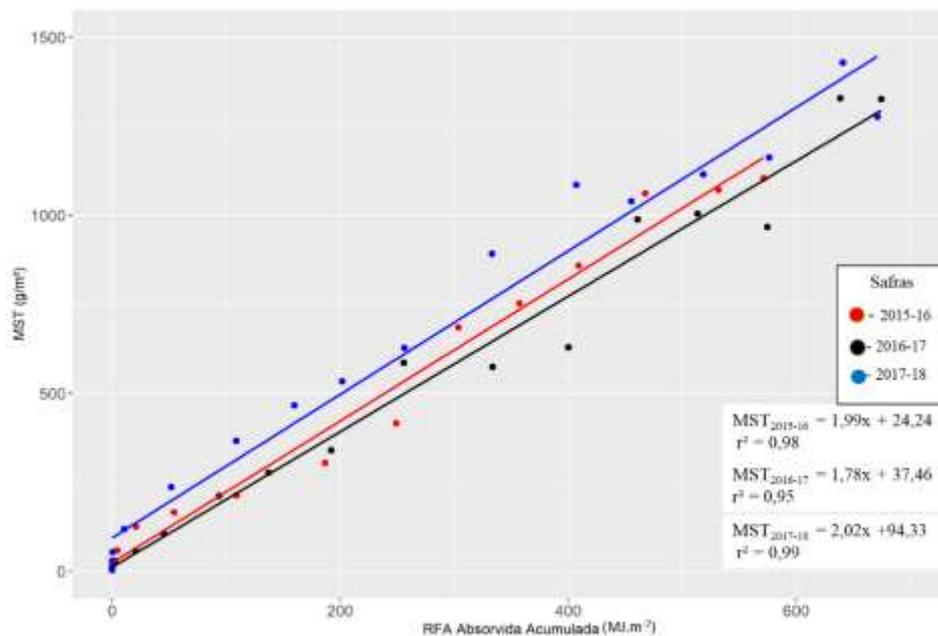


FIGURA 5. Matéria Seca (MST) observada o em razão da radiação fotossinteticamente ativa acumulada para as safras 2015-2016, 2016-2017 e safra 2017-2018 (c). Carazinho - RS.

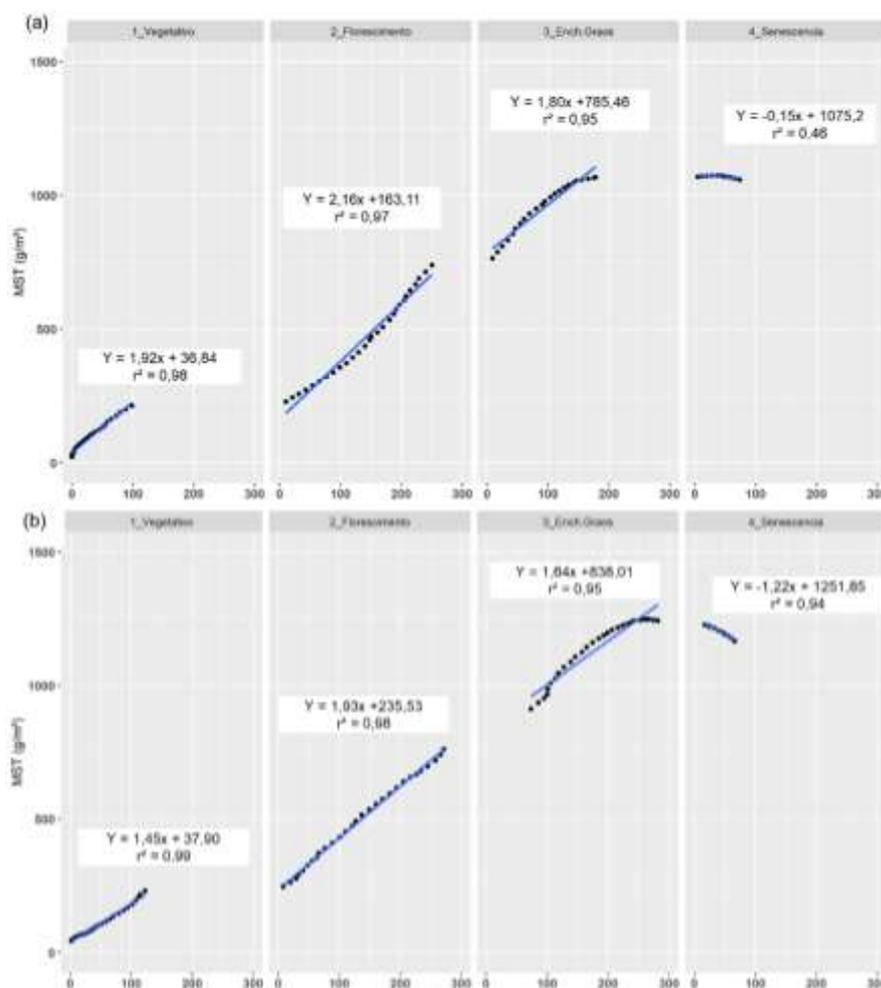
TABELA 3. Intervalo de confiança (IC) (95%) para os parâmetros (a e b) da regressão linear para a eficiência do uso da radiação (EUR) da soja nas safras 2015-16; 2016-17; 2017-18.

Safras	Parâmetros			
	a		b	
	IC (2,5%)	IC(97,5%)	IC (2,5%)	IC(97,5%)
2015-2016	-23,52	72,01	1,83	2,15
2016-2017	-45,39	120,32	1,54	1,93
2017-2018	27,29	161,37	1,82	2,20
Média	-11,51	152,18	1,57	1,98

Essa semelhança entre os valores de EUR pode ser explicada devido as três cultivares utilizadas pertencem ao mesmo grupo de maturação relativa, com duração de ciclo semelhantes de aproximadamente 110 dias. Apesar disso, fatores como condições meteorológicas e manejo podem causar variações entre as EUR de uma safra para outra. É amplamente reconhecido que, quando submetidas a condições meteorológicas e nutricionais adequadas, as culturas tendem a elevar a EUR. Martorano (2007) constatou que a soja quando irrigada, apresentou EUR de 1,57 g m⁻², entretanto, quando não irrigada, a EUR foi de 1,03 g m⁻². Van Roekel e Purcell (2014), em um estudo com soja nos Estados Unidos, também verificaram diferenças entre safras, encontrando valores de EUR que variaram de 1,01 a 1,89 g MJ⁻¹. Outros autores avaliaram a EUR para cultivos

de ciclo anual submetidas a tratamentos com deficiência hídrica ou nutrientes. Dalmago *et al.* (2018) concluíram que uma correta adubação nitrogenada combinada a condições hídricas adequadas proporcionaram maior EUR para o cultivo da canola. Já para o cultivo do milho, uma espécie de mecanismo C4, quando irrigado, obteve EUR de $3,57 \text{ g m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$ e não irrigado de $2,43 \text{ g m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$ (Müller & Bergamaschi, 2005).

Nas Figuras 6a, 6b e 6c estão apresentadas as EUR considerando separadamente as quatro fases do ciclo da soja: vegetativo, florescimento, enchimento de grãos e senescência para as três safras avaliadas. De forma geral, o padrão de relação entre a MST e a RFAabs foi similar, com os maiores acréscimos ocorrendo nas fases vegetativa e florescimento, superiores aos observados no enchimento de grãos, e negativos na senescência. Os valores de EUR encontrados nas três safras para os dois primeiros subperíodos expressam o rápido incremento de biomassa experimentado pela cultura, em relação a quantidade de RFAabs pelo dossel.



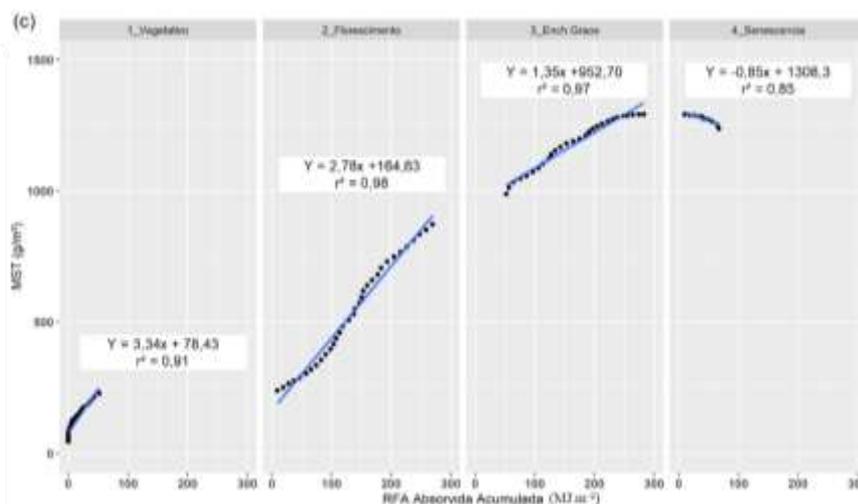


FIGURA 6. Evolução da matéria seca aérea da soja em quatro subperíodos do ciclo da soja (1_Vegetativo; 2_Florescimento; 3_Enchimento de Grãos e 4_Senescência) em função da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAAbs) nas safras: (a) 2015-16; (b) 2016-17 e (c) 2017-18. Carazinho - RS / Brasil.

Apenas para a safra 2016-17 houve diferenças entre os coeficientes angulares (b) em cada fase dentro do ciclo de desenvolvimento, comparado às mesmas fases das safras 2015-16 e 2017-18 (Tabela 4). Na safra 2016-17 a fase que apresentou o maior coeficiente angular, ou seja, a maior EUR foi a do florescimento, com valor de $1,93 \text{ g m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$, seguido da fase de enchimento de grãos. Lake e Sadras (2017) em seu estudo com a espécie de leguminosa grão de bico (*Cicer arietinum* L.), verificaram maior EUR no subperíodo de florescimento quando na presença de um período de chuva e manejos com irrigação. A safra 2017-18 apresentou diferença de EUR na fase de enchimento de grãos em relação as demais safras. Para o subperíodo vegetativo, apesar de não ter diferença, a safra 2017-18 apresentou maior valor de EUR ($3,34 \text{ g m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$), seguida pelas safras 2016-17 ($1,45 \text{ g m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$) e 2015-16 ($1,92 \text{ g m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$).

TABELA 4. Intervalo de confiança (IC) (95%) para os parâmetros (a e b) da regressão linear para a eficiência do uso da radiação (EUR) da soja para as fases (Vegetativa, florescimento, enchimento de grão e senescência) nas safras 2015-16; 2016-17; 2017-18.

Fases	Safra 2015-2016			
	a		b	
	IC (2,5%)	IC (97,5%)	IC (2,5%)	IC (97,5%)
Vegetativa	33,16	40,51	1,83	2,08
Florescimento	142,15	184,06	2,03	2,29
Enchimento de Grãos	765,85	805,07	1,62	1,98
Senescência	1070,54	1079,92	-0,24	-0,04

Continuação TABELA 4. Intervalo de confiança (IC) (95%) para os parâmetros (a e b) da regressão linear para a eficiência do uso da radiação (EUR) da soja para as fases (Vegetativa, florescimento, enchimento de grão e senescência) nas safras 2015-16; 2016-17; 2017-18.

Safr 2016-2017				
	IC (2,5%)	IC (97,5%)	IC (2,5%)	IC (97,5%)
Vegetativa	33,87	41,93	1,38	1,51
Florescimento	229,15	241,91	1,89	1,97
Enchimento de Grãos	803,63	872,38	1,47	1,82
Senescência	1246,33	1257,37	-1,35	-1,1
Safr 2017-2018				
	IC (2,5%)	IC (97,5%)	IC (2,5%)	IC (97,5%)
Vegetativa	68,14	88,71	2,82	3,86
Florescimento	144,23	185,04	2,61	2,88
Enchimento de Grãos	934,43	970,97	1,25	1,45
Senescência	1295,17	1321,49	-1,14	-0,56

Para as duas primeiras safras, na fase enchimento de grãos, marcada pelo início da sua formação, a taxa de incremento de MST por RFAabs diminuiu, aproximadamente, 20% em comparação a fase de florescimento. Esse resultado diverge do encontrado para a safra 2017-18, que obteve redução por volta de 50%. A diferença da taxa de incremento de MST na fase de enchimento de grãos para as três safras indica diferentes potencias produtivos. A safra 2015-2016 apresentou um lento desenvolvimento no início do ciclo resultando num menor IAF (Figura 1a), resultados decorrentes dos eventos de seca (Schaparini *et al*, 2020). No último período do ciclo da soja, que compreende a senescência, os valores de EUR foram negativos para as três safras. Isso ocorreu em virtude da interrupção da produção e translocação de fotossintatos das folhas para a manutenção dos grãos. Além disso, a fase de senescência é caracterizada pela perda do acúmulo de biomassa, que por sua vez está relacionado a queda natural das folhas.

4.4 Conclusão

A máxima eficiência de absorção de RFA ocorre entre as fases de florescimento e enchimento de grãos. O valor máximo de eficiência de absorção se dá concomitante ao valor máximo de IAF.

A eficiência na absorção da RFA é maior em safras onde o desenvolvimento do IAF e MST são melhores.

Apesar de não diferir entre safras, mostra diferenças entre as fases fenológicas. A maior EUR acontece no florescimento e enchimento de grãos, sendo fundamental para a definição da produção de grãos.

4.5 Referências bibliográficas

- ADEBOYE, O. B. *et al.* Impact of water stress on radiation interception and radiation use efficiency of Soybeans (*Glycine max* L. Merr.) in Nigeria. **Brazilian Journal of Science and Technology**, [São Paulo, Brazil], v. 3, n. 1, p. 1-10, 4 maio 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1186/s40552-016-0028-1>. Acesso em: 08 maio 2020.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [Berlin, Germany], v. 22, n. 6, p. 711-728, 1 dez. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 15 dez. 2019.
- ALADOS, I.; FOYO-MORENO, I.; ALADOS-ARBOLEDAS. Photosynthetically active radiation: measurements and modelling. **Agriculture and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 78, n. 1-2, p. 121-131, 1996. Disponível em: <http://hera.ugr.es/doi/15005057.pdf>. Acesso em: 03 maio 2020.
- ASSIS, F. N.; MENDEZ, M. E. G. Relação entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 24, n. 1, p. 797-800, jun. 1989. Disponível em: <http://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/15922/10019>. Acesso em: 03 maio 2020.
- BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I. **As Plantas e o clima: princípios e aplicações**. Guaíba: Agrolivros, 2017. 352 p.
- CHARTIER, M. *et al.* Utilisation des cellules au silicium amorphe pour la mesure du rayonnement photosynthétiquement actif (400-700 nm). **Agronomie**, France, v. 9, n. 3, p. 281-284, 1989. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1051/agro:19890308>. Acesso em: 09 jun. 2019.
- CUNHA, A. R.; VOLPE, C. A. Relações radiométricas no terço superior da copa de cafeeiro. **Bragantia**, Campinas, SP, v. 69, n. 2, p. 263-271, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-8705201000020000>. Acesso em: 08 maio 2020.
- DALMAGO, G. A. *et al.* Use of solar radiation in the improvement of spring canola (*Brassica napus* L., Brassicaceae) yield influenced by nitrogen topdressing fertilization. **Agrometeoros**, Passo Fundo, RS, v. 26, n. 1, p. 223-237, 2018.
- CASAROLI, D. *et al.* Radiação solar e aspectos fisiológicos na cultura de soja: uma revisão. **Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia**, Uruguaiiana, v. 14, n. 2, p. 102-120, abr. 2007. Disponível em:

<http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/fzva/article/view/2502/>. Acesso em: 03 maio 2020.

GAVA, R. *et al.* Estresse hídrico em diferentes fases da cultura da soja. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, CE, v. 9, n. 6, p. 349-359, 17 nov. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v9n600368>. Acesso em: 08 maio 2020.

HU, M.; WIATRAK, P. Effect of planting date on soybean growth, yield, and grain quality: review. **Review. Agronomy Journal**, United States, v. 104, n. 3, p. 785-790, maio 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2011.0382>. Acesso em: 08 maio 2020.

LAKE, L.; SADRAS, V. Associations between yield, intercepted radiation and radiation-use efficiency in chickpea. **Crop and Pasture Science**, United States, v. 68, n. 2, p. 140-148, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1071/cp16356>. Acesso em: 02 set. 2018.

MARTORANO, L. G. **Padrões de resposta da soja a condições hídricas do sistema solo-planta-atmosfera, observados no campo e simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT**. 2007. 170 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia, Agrometeorologia)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/8865/000589984.pdf;sequence=1>>. Acesso em: 21 jan. 2020.

MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystem. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 9, p. 747-766, 1972. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2401901>. Acesso em: 08 maio 2020.

MONTEITH, J. L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Proceedings of the Royal Society of London**, London, v. 281, p. 277-294, 1977. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstb.1977.0140>. Acesso em: 02 set. 2018.

MÜLLER, A. G.; BERGAMASCHI, H. Eficiências de interceptação, absorção e uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo milho (*Zea mays* L.), em diferentes disponibilidades hídricas e verificação do modelo energético de estimativa da massa seca acumulada. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 13, n. 1, p. 27-33, 04 abr. 2005. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/269036905_Eficiencias_de_interceptacao_a_borcao_e_uso_da_radiacao_fotossinteticamente_ativa_pelo_milho_Zea_mays_L_em_diferentes_disponibilidades_hidricas_e_verificacao_do_modelo_energetico_de_estimativa_da_massa>. Acesso em: 18 jan. 2020.

PEREIRA, C. R. **Análise do crescimento e desenvolvimento da cultura de soja sob diferentes condições ambientais**. 2002. 305 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/9475/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 13 maio 2020.

PETTER, F. A. *et al.* Elevada densidade de semeadura aumenta a produtividade da soja? Respostas da radiação fotossinteticamente ativa. **Bragantia**, São José dos

Campos, SP, v. 75, n. 2, p. 173-183, 26 abr. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.447>. Acesso em: 18 jan. 2020.

RITCHIE, S, Gean Leonardo et al. How a soybean plant develops. Ames: Iowa State University of Science and Technology, Coop. Ext. Serv. **Special Report**, 53. 1982. p. 20. Adaptado por YORINORI, 1996.

RICHTER, G. L. *et al.* Estimativa da área de folhas de cultivares antigas e modernas de soja por método não destrutivo. **Bragantia**, São Jose dos Campos, SP, v. 73, n. 4, p. 416-425, dez. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0179>. Acesso em: 18 jan. 2020.

SALVADORI, J. R. *et al.* **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e Santa Catarina, safras 2016/2017 e 2017/2018**. Passo Fundo/RS: UPF Editora, 2016. 128 p. Disponível em: http://editora.upf.br/images/ebook/indicacoes_tecnicas_PDF.pdf. Acesso em: 29 abr. 2020.

SANTOS, H. P. *et al.* **Soja**: resultados de pesquisa 2016/2017: rendimento de grãos de soja em sistemas de produção com integração lavoura-pecuária, sob sistema plantio direto. Passo Fundo: Embrapa, 2017. 63 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1074810/1/ID441062017DO171.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2020.

SCHÖFFEL, E. R.; VOLPE, C. A. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela soja para a produção de fitomassa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria/RS, v. 9, n. 2, p. 241-249, 12 nov. 2001. Disponível em: <http://sbagro.org/files/biblioteca/1299.pdf>. Acesso em: 13 maio 2020.

SILVA, W. B. *et al.* Desenvolvimento inicial de *Urochloa ruziziensis* e desempenho agrônômico da soja em diferentes arranjos espaciais no cerrado Mato-Grossense. **Bragantia**, São José dos Campos, SP, v. 72, n. 2, p. 146-153, jun. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0006-87052013000200006>. Acesso em: 18 jan. 2021.

STRECK, E.V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. 2 ed. Porto Alegre: Emater/RS, 2008. 222 p.

TAIZ, L. & ZIEGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TESFAYE, K.; WALKER, S.; TSUBO, M. Radiation interception and radiation use efficiency of three grain legumes under water deficit conditions in a semi-arid environment. **European Journal of Agronomy**, Netherlands, v. 25, n. 1, p. 60-70, jul. 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2006.04.014>. Acesso em: 08 maio 2020.

THIMIJJAN, R. W.; HEINS, R. D. Photometric, radiometric, and quantum light units of measure: a review of procedures for interconversion. **HortScience**, United State, v. 18, n. 6, p. 818-822, 1983.

TIBOLLA, L. B. *et al.* Effect of artificial shading on soybean growth and yield. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, PE, v. 14, n. 4, p. 1-7, 31 dez. 2019.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v14i4a6876>. Acesso em: 08 maio 2020.

VAN ROEKEL, R. J.; PURCELL, L. C. Soybean Biomass and Nitrogen Accumulation Rates and Radiation Use Efficiency in a Maximum Yield Environment. **Crop Science**, United State, v. 54, n. 3, p. 1189-1196, maio 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2013.08.0546> Acesso em: 23 abr. 2020.

ZANON, A. J. *et al.* Contribuição das ramificações e a evolução do índice de área foliar em cultivares modernas de soja. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 3, p. 279-290, set. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0463> . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052015000300279&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 15 out. 2019.

5 CAPÍTULO 3

NDVI como estimador da eficiência de absorção da radiação solar da cultura da soja visando a modelagem da produtividade primária líquida

RESUMO

O crescimento da população mundial e a demanda por maior produtividade por parte da agricultura faz com que novas ferramentas de acompanhamento e avaliação das condições dos cultivos sejam buscadas. O sensoriamento remoto tem sido utilizado para acompanhar o desenvolvimento dos cultivos agrícolas e fornece dados importantes para obtenção de estimadores da vegetação, como a produtividade primária líquida (PPL). O objetivo do trabalho foi avaliar o NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada), como estimador da Eficiência de Absorção da Radiação (ϵ_{abs}), para fins de modelagem da PPL. O experimento foi conduzido em formato *On Farm*, no município de Carazinho-RS, durante três safras de soja. Foram obtidos dados meteorológicos com sensores instalados em uma torre no interior da lavoura, além de dados biofísicos. Os dados espectrais foram obtidos com um sensor SRS instalado a campo e também com o sensor MODIS, utilizando a plataforma *Google Earth Engine* (GEE). Dada a alta correlação do NDVI obtido a campo e pelo sensor MODIS, este foi usado para estimar o IAF e também a ϵ_{abs} , usando duas abordagens. Ambas estimativas da ϵ_{abs} mostram-se adequadas para fins de cálculo da PPL. A vantagem do uso de dados de NDVI / MODIS nas estimativas da PPL de lavouras de soja, é a possibilidade de, remotamente, caracterizar as alterações na PPL nas diferentes fases do ciclo da cultura e também gerar o valor da PPL acumulada no ciclo completo.

5.1 Introdução

As projeções da Organização das Nações Unidas (ONU 2019) sinalizam para uma população global de 9,5 bilhões de pessoas em 2050, gerando uma demanda crescente por produção de alimentos. Esta demanda deverá ser atendida ou pela expansão da fronteira agrícola, ou pela intensificação, com obtenção de maior produção por unidade de área, ou por ambos. A expansão da produção de grãos no Brasil inicialmente se deu do sul do país migrando em direção ao centro-oeste e, atualmente, tem se direcionado para os estados do Nordeste (Freitas *et al.*, 2016). Mas é importante salientar que se a expansão das atividades agrícolas e pecuárias ocorre sobre os ecossistemas naturais, isto tem efeitos deletérios para o meio ambiente (Dobrovolski *et al.*, 2011).

Uma alternativa para o crescimento em área de cultivo é o aprimoramento da qualidade das lavouras, com manejos mais adequados e um melhor monitoramento para que seja extraído o potencial produtivo dos ambientes (Sentelhas *et al.*, 2015). Para isto,

são importantes os estudos que buscam identificar, para as diferentes regiões produtoras, as lacunas de rendimento (Marcon *et al.*, 2017; Reis & Zanatta, 2019) e, a partir disto, subsidiar a intensificação da produção agrícola. Desta forma, estudos executados diretamente no ambiente de condução das lavouras se tornam estratégias importantes.

A Produtividade Primária Líquida (PPL ou NPP da sigla em inglês *Net Primary Productivity*) é toda a energia armazenada pelas plantas a partir da fotossíntese (Produtividade Primária Bruta) menos o que é consumido na respiração, representando a taxa de produção de biomassa das culturas (De Souza & Malhi, 2017; Lorel *et al.*, 2019). A capacidade fotossintética das plantas está diretamente relacionada à sua habilidade em utilizar a água, luz e nutrientes. Diversos fatores, entretanto, influenciam a produtividade primária, dentre os quais podemos destacar: a disponibilidade radiação solar global ou de CO₂, a temperatura do ar, a disponibilidade de água e de nutrientes. Pode-se afirmar que a PPL é o principal indicador de “saúde” de uma cultura, sendo de grande importância para o equilíbrio ecológico. Para Rosa e Sano (2013), a importância em conhecer a PPL tem sido muito reconhecida, visto o papel central que desempenha no ciclo do carbono e fluxo de energia em diversos ecossistemas.

Dada a importância do tema, existem diversos modelos de estimativa da PPL para ecossistemas naturais. De forma geral, os modelos buscam estudar a dinâmica da vegetação e qual a sua resposta frente as mudanças climáticas e atividades antrópicas (Bao *et al.*, 2016; Peng *et al.*, 2019). Entretanto, um dos grandes problemas enfrentados na estimativa de PPL é a disponibilidade de dados medidos ainda ser limitada e a grande dificuldade para medi-los a campo. Uma ferramenta que vem sendo utilizada para inferir sobre os dados de campo é o sensoriamento remoto (SR). A ferramenta apresenta vantagens como baixo custo, rapidez de processamento e visualização de locais remotos (Shanmugapriya *et al.*, 2019). Grande parte dos modelos para estimativa de PPL utilizam índices de vegetação (IV) para caracterizar o alvo de interesse. Dentre os vários IVs existentes, o NDVI (do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*) tem sido o mais utilizado em estudos de alvos agrícolas. O NDVI usa duas faixas de comprimento de onda nas quais as plantas respondem antagonicamente em seu crescimento: vermelho (V) e infravermelho próximo (IVP). As propriedades biofísicas das plantas, como biomassa, densidade das plantas, índice de área foliar, são os fatores que afetam a refletância principalmente nos comprimentos de onda no infravermelho próximo (0,75 a 1,10 µm) (Jensen, 2011). Como os dados NDVI podem ser obtidos de uma ampla gama de sensores

posicionados em diferentes plataformas, o uso do NDVI tornou-se comum, combinando dados de diferentes sensores.

Como os sensores remotos medem apenas a energia incidente no sensor, usando esta tecnologia, a estimativa de PPL fica na dependência da geração de modelos. Neste caso, os dados de índice de vegetação obtidos através de SR podem entrar como variáveis independentes dos modelos, inferindo sobre características estruturais da vegetação (Rosa & Sano, 2013; Aruelo, 2018). Ou também, além das características da vegetação, o SR pode oferecer aos modelos outras variáveis importantes, como as meteorológicas. Como exemplo, pode-se citar o modelo proposto por Bao *et al.* (2016), onde a estimativa da PPL considera fatores climáticos, visto que, seu excesso ou falta, podem causar situações de estresse para a planta.

Mesmo considerando as limitações existentes, as técnicas de sensoriamento remoto são um meio eficaz de obter dados devido às vantagens exclusivas para observações que abrangem e detalham grandes áreas, a geração de imagens em várias bandas espectrais e a sua repetitividade no tempo. Apesar da difusão do uso da ferramenta, ainda é necessário testar e entender, de forma mais aprofundada, a aplicação dos modelos de estimativa de PPL para áreas agrícolas visto que, grande parte dos estudos consideram grandes áreas como biomas, florestas, entre outras. De outro lado, trabalhos realizados a campo permitem obter informações detalhadas da PPL na superfície, de forma controlada e com maior grau de precisão em diversos momentos do desenvolvimento dos cultivos, mas são restritas quanto representação da variabilidade espacial desta variável.

Neste contexto, o presente estudo utilizou dados espectrais, meteorológicos e biofísicos medidos a campo, aliados a dados orbitais, com o objetivo de avaliar a acurácia do NDVI como estimador da Eficiência de Absorção da Radiação, para fins de modelagem da PPL em lavoura de soja no município de Carazinho-RS, Brasil.

5.2 Material e Métodos

Os experimentos foram conduzidos em formato *On Farm*, em uma área comercial de uma propriedade de 553,7 hectares, localizada no Município de Carazinho-RS sob as coordenadas 28°13'46" S e 52°54'32" W, em três safras consecutivas, 2015-2016, 2016-2017 e 2017-2018 (Figura 1). A classificação climática de Köppen, para a região é Cfa (Alvares *et al.*, 2013). O solo da área é um Latossolo Vermelho Aluminoférrico típico

(Streck *et al.*, 2008), profundo, com boa drenagem natural, adequado às culturas produtoras de grãos.

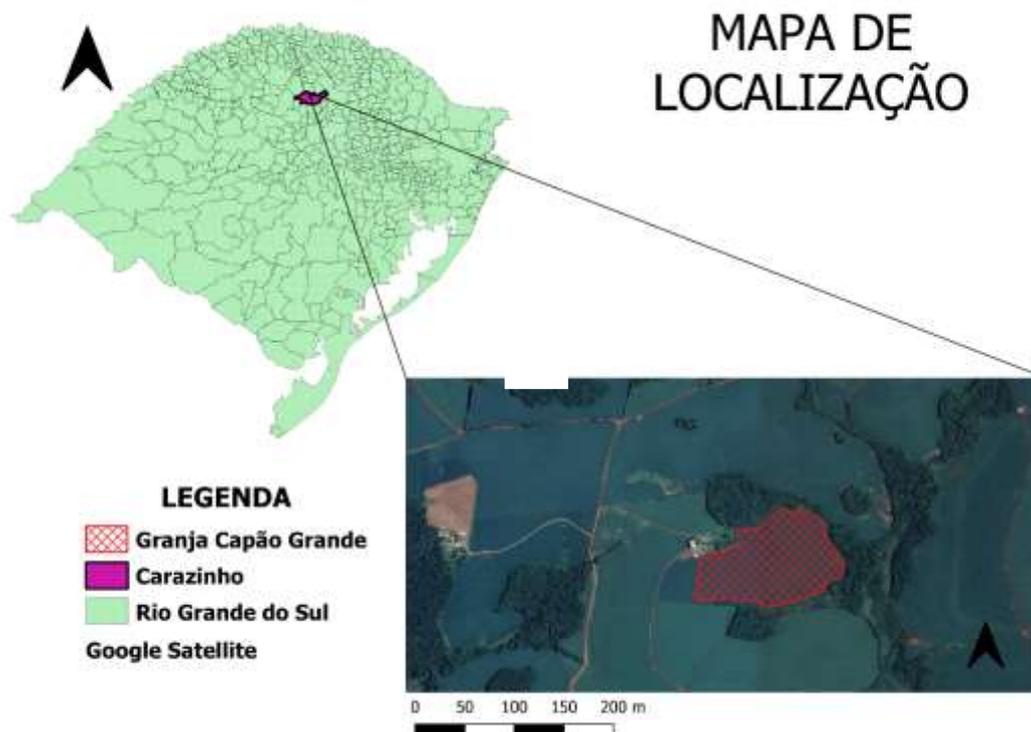


FIGURA 1. Mapa de localização da área experimental. Carazinho – RS/ Brasil.

A semeadura da soja ocorreu em 16/11/2015, 8/11/2016 e 13/11/2017, com emergência das plantas em 24/11/2015, 16/11/2016 e 21/11/2017 e colheita em 24/03/2016, 24/03/2017 e 03/04/2018, respectivamente, para as três safras. Os genótipos utilizados em cada safra foram: BMX Apolo RR, NS 5445 IPRO e DM 5958 RSF IPRO, nas safras de 2015, 2016 e 2017, respectivamente. O espaçamento adotado foi de 45 cm entre linhas em todas as safras.

Os dados meteorológicos foram coletados através de estação micrometeorológica instalada na lavoura, com sensores posicionados a 2 m de altura do solo. Para a medição da temperatura foi utilizado um sensor conjugado, modelo HC2S3-L da Campbell Scientific, Inc. O sensor de temperatura foi conectado a um datalogger CR 1000, 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. O preenchimento de falhas quando ocorreram foi feita com dados meteorológicos

registrados na estação meteorológica da Embrapa Trigo, pertencente ao 8º Distrito de Meteorologia (8º DISME) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Para o cálculo da soma térmica (ST) foi utilizado o método dos graus-dia (Ometo, 1981), que leva em consideração as temperaturas máxima e mínima do ar, além das temperaturas cardinais para o cultivo de soja no estado do Rio Grande do Sul. Utilizou-se a temperatura base inferior (Tb) de 13 ° C e a temperatura base superior (TB) de 40 ° C (Farias *et al.*, 2007).

A radiação solar global (Rg) e a radiação solar fotossinteticamente ativa incidentes (RFA_{inc}) foram medidas com um piranômetro modelo SP-110-L-10 e um sensor quantum modelo SQ-110, respectivamente. Ambos pertencentes a marca *Apogee Instruments*. A RFA transmitida ao nível do solo (RFA_{tr}) e a refletida pelo dossel (RFA_{rfl}) pelo dossel da soja foram medidas utilizando barras de medição de radiação RFA, manufaturadas com cinco células de silício amorfo (Chartier *et al.*, 1989) e calibradas com o sensor descrito acima. No experimento, a medição da RFA_{tr} foi realizada com quatro sensores em 2015, oito em 2016 e 2017. A RFA_{rfl}, para os mesmos experimentos foi medida com quatro, quatro e seis sensores, respectivamente, em cada ano. Em seguida foram calculadas a RFA interceptada (RFA_{int}) (Equação 1), a RFA absorvida (RFA_{abs}) (Equação 2) e a eficiência de absorção (ϵ_{abs}) (Equação 3).

$$RFA_{int} = RFA_{inc} - RFA_{tr} \quad (1)$$

$$RFA_{abs} = RFA_{inc} - RFA_{rfl} - RFA_{tr} \quad (2)$$

$$\epsilon_{abs} = \frac{RFA_{abs}}{RFA_{inc}} \quad (3)$$

Partindo da equação conceitual de cálculo da PPL (gC m^{-2}) (equação 4), foram testadas formas alternativas para a obtenção do termo de Eficiência de Absorção da radiação a partir de dados obtidos por sensores remotos.

$$PPL = RFA_{inc} \times \epsilon_{abs} \times EUR \quad (4)$$

sendo, RFA_{inc} ($MJ\ m^{-2}$) é a radiação fotossinteticamente ativa, E_{fabs} é a eficiência de absorção e EUR ($g\ m^{-2}\ MJ^{-1}$) é a eficiência do uso da radiação. Os dados de EUR utilizados na equação foram $1,99\ g\ m^{-2}\ MJ^{-1}$; $1,78\ g\ m^{-2}\ MJ^{-1}$ e $2,21\ g\ m^{-2}\ MJ^{-1}$, respectivamente para as safras 2015-16, 2016-17 e 2017-18. Os dados de EUR foram obtidos por Sachaparini *et al.* (2020) em um estudo realizados nas mesmas safras e na mesma área experimental.

A cada 15 dias durante o ciclo, foram coletadas 4 amostras de plantas pareadas. Estas plantas foram separadas em laboratório e a área foliar do conjunto das folhas de cada planta foi determinada em planímetro óptico, modelo 3100-L, marca LICOR. Em seguida as folhas foram colocadas para secar, seguindo procedimento daquelas colhidas no segmento de linha, até atingir massa da matéria seca constante de folhas. Com os dados de área foliar e da massa de matéria seca foi ajustada a equação de regressão linear para estimativa da área foliar específica para a soja (Richter *et al.*, 2014). A aplicação da equação da área foliar específica, tendo como variável dependente de entrada a matéria seca de folhas determinada semanalmente, possibilitou a estimativa do IAF semanal da soja em cada ano experimental.

Na safra de 2017-18 foram instalados na lavoura sensores SRS – Decagon, que medem o NDVI (Índice de Vegetação Diferenciado da Diferença) de forma contínua, com registros a cada 15 minutos, a partir do fluxo incidente e refletido da radiação eletromagnética no espectro vermelho e infravermelho próximo. Registradores de dados Campbell, modelo CR1000, foram utilizados. Utilizando os dados de refletância medidos na lavoura, calculou-se o índice de vegetação, NDVI (Equação 5).

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (5)$$

sendo, ρ_{IV} e ρ_V as reflectâncias (razão entre o fluxo refletido e incidente) na banda do infravermelho próximo e do vermelho, respectivamente.

Também, para as três safras, foram utilizados dados de NDVI provenientes do produto MOD13Q1, do sensor MODIS (NDVI Modis), extraídos de um polígono que considerou toda a área experimental, obtidos usando a plataforma *Google Earth Engine* (GGE), uma plataforma gratuita de processamento em nuvem. O produto fornece dados de máximo valor de NDVI a cada 16 dias, o qual ao minimizar a interferência da atmosfera, permitiu o monitoramento contínuo da lavoura ao longo de todo o ciclo da soja.

O NDVI_Modis então foi utilizado para estimar os valores de ε_{abs} usando dois enfoques:

Enfoque 1: ajuste de regressão linear entre NDVI e ε_{abs}

$$\varepsilon_{abs_1} = a \times NDVI_Modis + b \quad (6)$$

Enfoque 2: uso da equação proposta por Ahl *et al.* (2005) de estimativa de RFAabs (Equação 4) e na sequência a estimativa da ε_{abs} (Equação 7):

$$\varepsilon_{abs_2} = [1 - e^{(-k IAF_{Modis})}] / RFA_{inc} \quad (7)$$

onde, k é o coeficiente de extinção e IAF Modis é o IAF estimado através de dados de NDVI do sensor MODIS, o qual foi obtido a partir do ajuste de uma função exponencial média para as três safras e RFA_{inc} a Radiação fotossinteticamente ativa incidente medida a campo.

Para cálculo do coeficiente k (Equação 8) utilizou-se dados de IAF e $\varepsilon_{int_{campo}}$ obtidos com dados de campo. O coeficiente k foi calculado separadamente para cada safra

$$\ln(1 - \varepsilon_{int_{campo}}) = k \cdot IAF \quad (8)$$

onde $\ln(1 - \varepsilon_{fabs_{campo}})$ é o logaritmo neperiano da radiação transmitida (não interceptada) pelo dossel.

Os dados estimados da ε_{abs} pelos enfoques 1 e 2 foram substituídos na equação (1), obtendo-se duas estimativas de PPL (PPL_1 e PPL_2) para cada safra. Os dados obtidos e estimados de IAF e PPL foram analisados considerando o ciclo completo da soja. Além disso, para cada safra, o ciclo da soja foi dividido em quatro fases representativas, considerando a escala fenológica determinada Escala de Ritchie *et al.* 1982 (adaptado por Yorinori, 1996). Para a fase vegetativa, considerou-se o período de emergência até o início do florescimento. Para fase florescimento englobou-se o início do florescimento até o início da formação de grãos. Já para a fase de enchimento de grãos considerou-se o início da formação de grãos até o momento em que houvesse 100% de formação de grãos em toda a planta, e finalizando, a fase senescência englobou o restante do ciclo, até a maturação de colheita.

Os dados de NDVI obtido através do sensor MODIS e no sensor instalado a campo, foram submetidos a um teste de concordância proposto por Willmott (1981). Este teste resulta em um valor que varia entre 0 e 1 onde, o valor de concordância 1 indica uma combinação perfeita e 0 indica nenhuma concordância. Os dados de PPL calculados pelos dois enfoques foram submetidos a análise de regressão linear e para fins de comparação, calculou-se os intervalos de confiança dos coeficientes das equações.

5.3 Resultados e Discussão

Na Figura 2 está apresentado o perfil de desenvolvimento do IAF medido a campo e NDVI_Modis para as três safras, caracterizando safras com condições de crescimento e desenvolvimento distintas. O IAF (Figura 2a) apresentou valores crescentes desde a implantação da cultura, atingindo valores máximos, próximos a 5 para a safra 2015-16 e perto de 8 para as safras 2016-17 e 2017-18, no início do enchimento dos grãos, e diminuindo ao final do ciclo. Os valores observados estão dentro da faixa esperada para o cultivo de soja no Rio Grande do Sul (Zanon *et al.*, 2015).

Verifica-se ainda que, para as três safras, o perfil de NDVI (Figura 2-b) demonstrou padrão típico de cultivos anuais (Santos *et al.*, 2014; Cordeiro *et al.*, 2017). Os valores foram baixos no início do ciclo por conta da baixa densidade de biomassa verde, crescentes até a lavoura atingir o máximo desenvolvimento e decrescente posteriormente, resultado do processo de senescência da planta. Apesar da similaridade, observou-se diferenças nos valores de NDVI nestas três safras.

Tanto o IAF como o NDVI da safra 2017-18 evidenciaram que o início de desenvolvimento da cultura foi mais lento em relação as duas outras safras analisadas. Segundo Schaparini *et al.* (2020), durante todo o ciclo de desenvolvimento da soja para a safra 2017-18 houve uma grande disponibilidade hídrica. Se por um lado, as chuvas no início do ciclo podem ter ocasionado um atraso da germinação da soja (França-Neto *et al.*, 2016) ou mesmo um crescimento inicial mais lento em função da redução da disponibilidade de radiação associada à nebulosidade, o suprimento hídrico adequado determinou um maior IAF e em consequência uma maior duração do NDVI com valores elevados nesta safra. Esquerdo *et al.* (2011), ao avaliar o desenvolvimento da soja em diferentes safras, concluíram que períodos onde há condições ambientais e climáticas favoráveis, o melhor desenvolvimento vegetativo acarreta em valores de NDVI maiores e durante mais tempo.

Em contraste, a safra 2015-16 apresentou um ciclo com menor número de dias em relação as demais safras avaliadas, com rápido decréscimo do NDVI e com um menor IAF ao longo da safra. Segundo Schaparini *et al.* (2020), a safra 2015-16 apresentou um período de deficiência hídrica no mês de janeiro, que compreende a fase de florescimento. Esse período de estresse nas fases de florescimento e enchimento de grãos pode apresentar redução no desenvolvimento da cultura (Gava *et al.*, 2015).

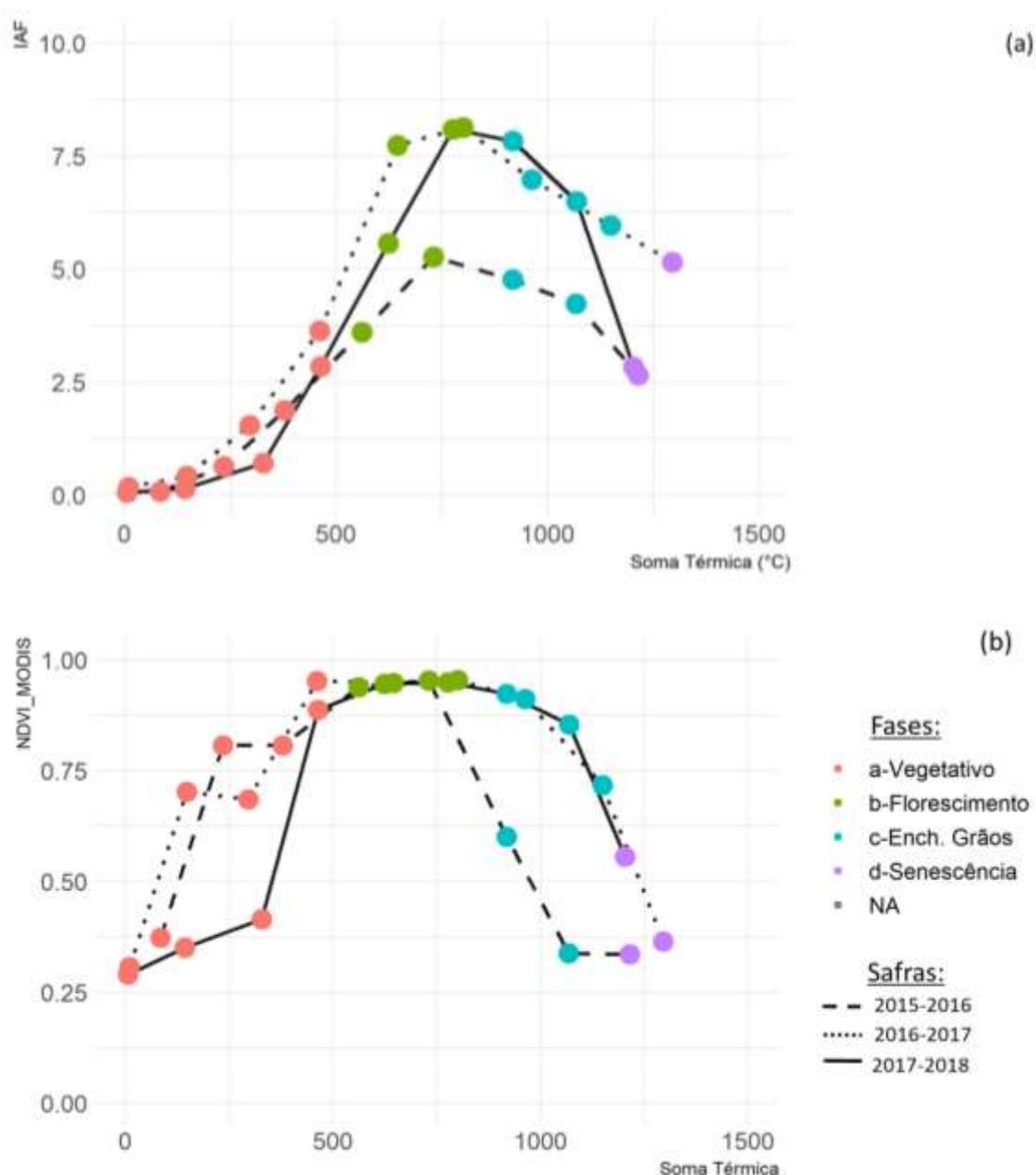


FIGURA 2. Perfil temporal do IAF (a) e NDVI Modis (b). Safras 2015-2016, 2016-2017 e 2017-2018, Carazinho-RS.

A Figura 3 mostra que existe concordância entre os dados de NDVI obtidos através de um sensor instalado no interior da lavoura com dados de NDVI obtidos com o sensor MODIS, com um índice de concordância de 0,98. A compatibilidade dos dados obtidos entre um sensor terrestre e um orbital também foi avaliada por Della Justina (2014) em seu trabalho no cultivo da soja. Isto atesta a qualidade espectral dos dados orbitais e também a adequação das correções radiométricas e geométricas aplicadas aos produtos MODIS. Mesmo em uma área relativamente pequena, como a da lavoura experimental, os dados de moderada resolução espacial dos produtos MODIS são de grande valia. Tendo como base este resultado, foi possível utilizar dados de NDVI do sensor MODIS para as análises nas três safras de soja avaliadas, mesmo aquelas que não havia medições de NDVI na lavoura.

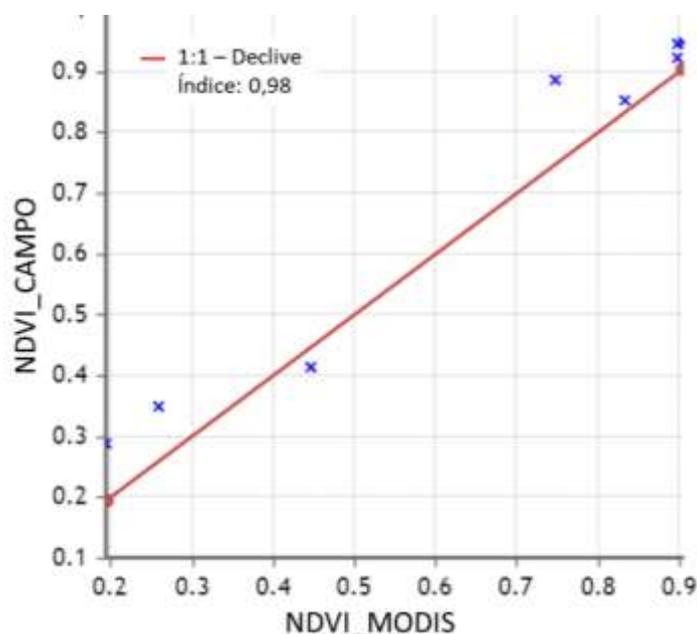


FIGURA 3. Índice de concordância, Willmott (1981), entre dados de NDVI medidos a campo e dados de NDVI obtidos do sensor MODIS.

A relação exponencial entre o NDVI e o IAF, nas três safras, explicando mais de 92% para a safra 2015-16, 87% para a safra 2016-17 e 91% para a safra 2017-18 das variações do IAF ao longo da safra é mostrada na Figura 4. A relação entre NDVI e IAF já é amplamente conhecida e cada vez mais vem sendo aplicada na agricultura (Risso *et al.*, 2012; Trindade *et al.*, 2019). Verifica-se que para os altos valores de NDVI, acima de 0,85, os valores de IAF variam, desde próximo a 3 até 8, indicando que o NDVI é um bom estimador do IAF para valores baixos e médios, mas apresenta importante limitação em condições de alto IAF. Segundo Fontana *et al.* (2019), quando o IAF é superior a 5,

os valores de NDVI tenderam a saturar, o que é uma das principais limitações desse índice (Jensen, 2011; Almeida, 2008). O termo saturação é usado para casos em que aumentos ou diminuições na biomassa não resultam em consequentes variações no NDVI.

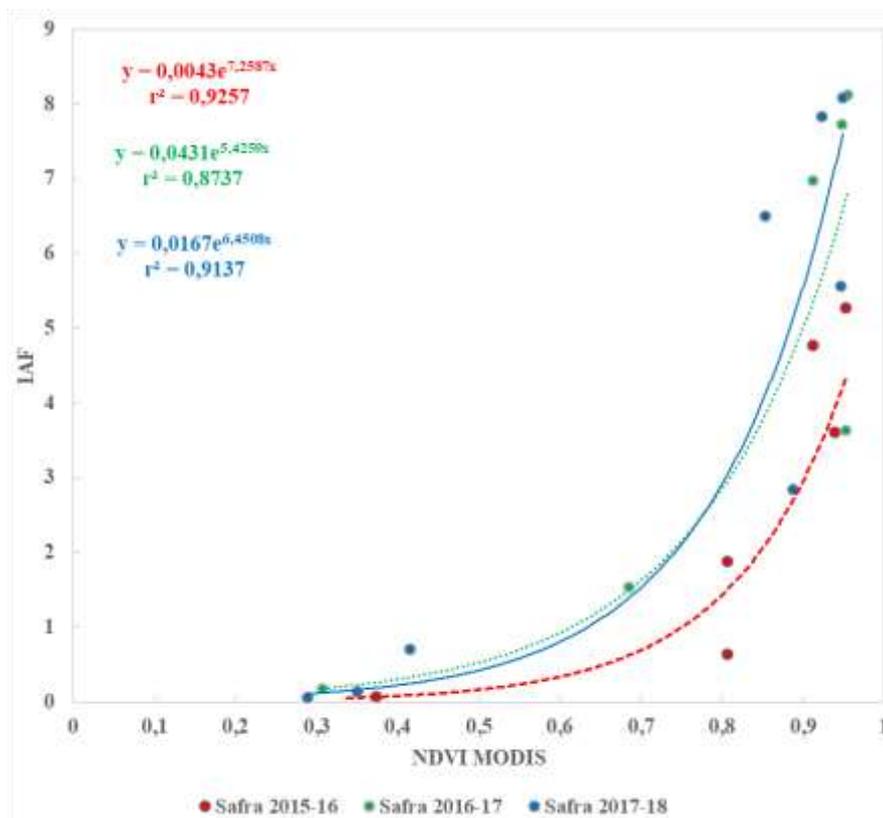


FIGURA 4. Regressão exponencial entre dados de NDVI_Modis e dados de IAF para a safra 2015-2016; 2016-2017 e 2017-2018 (d). Carazinho/RS.

Na Tabela 1 estão descritos os intervalos de confiança (IC) para os parâmetros das equações exponenciais entre IAF e NDVI. A distribuição dos IC de cada equação determina que as equações obtidas para as três safras não apresentaram diferença. Dessa forma, foi obtida uma equação média para as três safras.

Tabela 1. Intervalo de confiança (IC) (95%) para os parâmetros (a e b) da regressão exponencial para a estimativa do IAF através do Índice NDVI nas safras 2015-16;2016-17;2017-18.

Safras	Parâmetros					
	Equação	r ²	a		b	
			IC (2,5%)	IC(97,5%)	IC (2,5%)	IC(97,5%)
2015-2016	$y=0,0043e^{7,2587x}$	0,92	$-3,3 \times 10^{-3}$	$5,3 \times 10^{-3}$	3,89	14,39
2016-2017	$y=0,0431e^{5,4259x}$	0,87	$-4,6 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-6}$	1,59	20,14

Continuação TABELA 1. Intervalo de confiança (IC) (95%) para os parâmetros (a e b) da regressão exponencial para a estimativa do IAF através do Índice NDVI nas safras 2015-16; 2016-17; 2017-18

2017-2018	$y=0,0167e^{6,4508x}$	0,91	$-3,4 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-1}$	3,00	6,98
Média	$y=0,0036e^{8,0779x}$	0,95	$-3,1 \times 10^{-3}$	$-1,1 \times 10^{-2}$	5,63	10,08

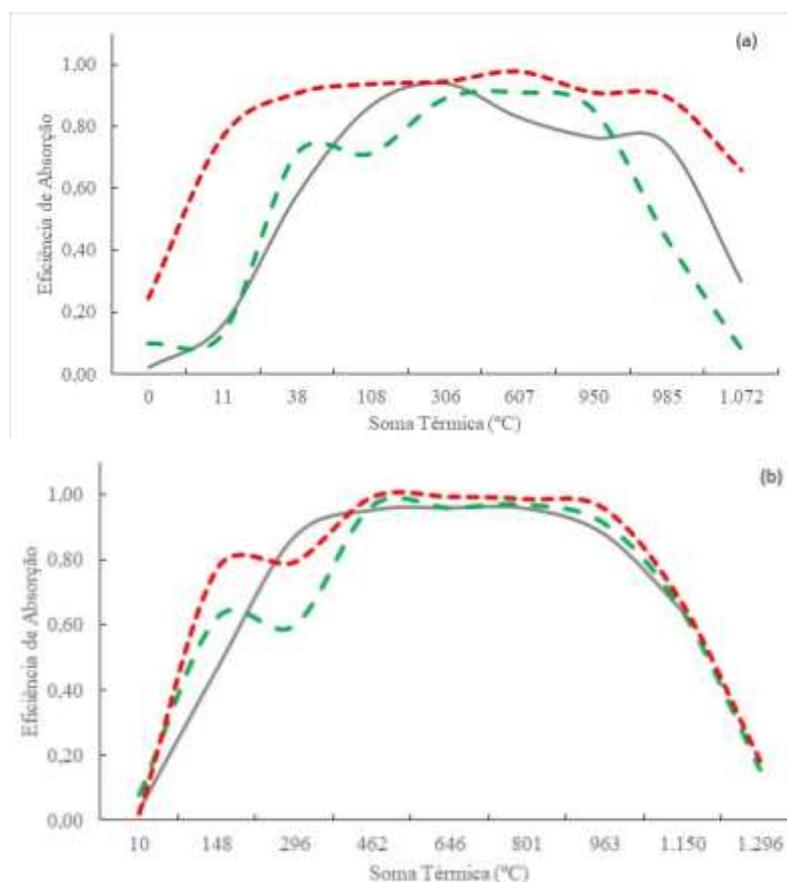
Apesar da limitação já bem conhecida como a saturação do NDVI, este índice vem sendo extensamente utilizado como um indicador da condição da biomassa verde, sendo que no presente trabalho foi avaliado sua relação com a Eficiência de Absorção da Radiação, que é um parâmetro essencial para determinação da produtividade primária. Na aplicação do enfoque 1, quando se fez o ajuste de regressão linear entre a ξ_{abs} e o NDVI (Tabela 2), observou-se que o NDVI explica, em média, 85% da variação da ξ_{abs} . Da mesma forma que o NDVI tende a aumentar com o desenvolvimento da biomassa verde, a ξ_{abs} possui um padrão similar.

TABELA 2. Intervalo de confiança (IC) (95%) para os parâmetros (a e b) da regressão linear para a estimativa da eficiência de absorção através do Índice NDVI nas safras 2015-16; 2016-17; 2017-18.

Safras	Equação	r^2	Parâmetros			
			a		b	
			IC (2,5%)	IC(97,5%)	IC (2,5%)	IC(97,5%)
2015-2016	$y= 1,35x - 0,37$	0,85	0,83	1,86	-0,74	-0,01
2016-2017	$y= 1,37x - 0,35$	0,86	-0,58	2,18	-1,02	1,20
2017-2018	$y= 1,37x - 0,37$	0,84	-0,76	0,02	0,84	1,96
Média	$y= 1,39x - 0,39$	0,86	0,55	2,23	-1,00	0,22

Nas curvas de eficiência de absorção, tanto para dados estimados quanto para os dados obtidos a campo (Figura 5), nota-se uma evolução contínua, com padrão similar a evolução temporal do IAF (Figura 2a) e NDVI (Figura 2b). Nas três safras o enfoque 1 gerou valores mais próximos aos que foram medidos a campo, descrevendo de forma mais fidedigna a evolução da ξ_{abs} ao longo do ciclo. Na safra 2015-16 (Figura 5a), em relação a ξ_{abs} medida a campo, a ξ_{abs} obtida através do método 2 mostrou valores mais elevados em todo o período, o que ficou mais evidenciado no início da safra. Para a safra 2016-17 (Figura 5b) as curvas das ξ_{abs} obtidas através dos métodos 1 e 2 demonstraram padrão semelhante ao NDVI destas safras gerando um aumento mais acelerado da ξ_{abs} em relação aos dados obtidos a campo. Em cerca de 290 °C de

Soma térmica houve uma queda dos valores de NDVI (Figura 2b) e consequentemente também nos valores de ϵ_{abs} . Já na safra 2017-18 (Figura 5c) novamente o enfoque 2 gerou valores de ϵ_{abs} maiores do que os obtidos a campo. Esta foi a safra em que houve no início do ciclo as maiores diferenças entre as ϵ_{abs} medida e estimadas. No enfoque 2 o crescimento da ϵ_{abs} foi mais acelerado do que o obtido a campo, enquanto no enfoque 1 este foi mais retardado. Em todas as safras os valores estimados de ϵ_{abs} foram bastante próximos dos obtidos a campo no período de maior crescimento da cultura.



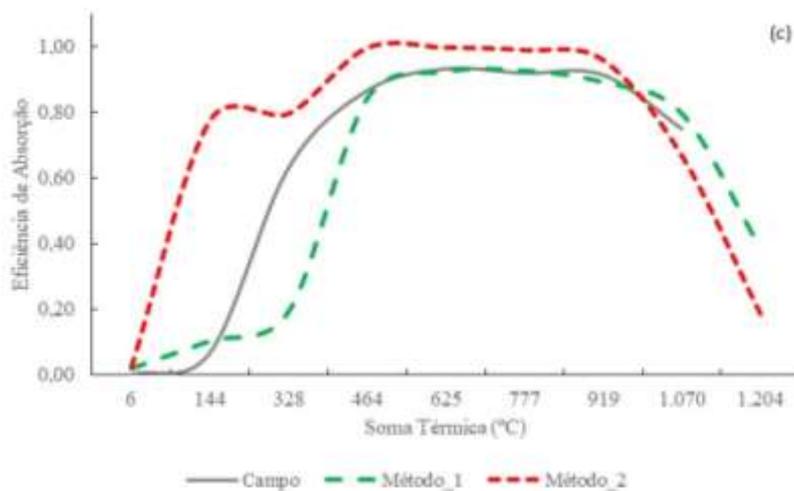


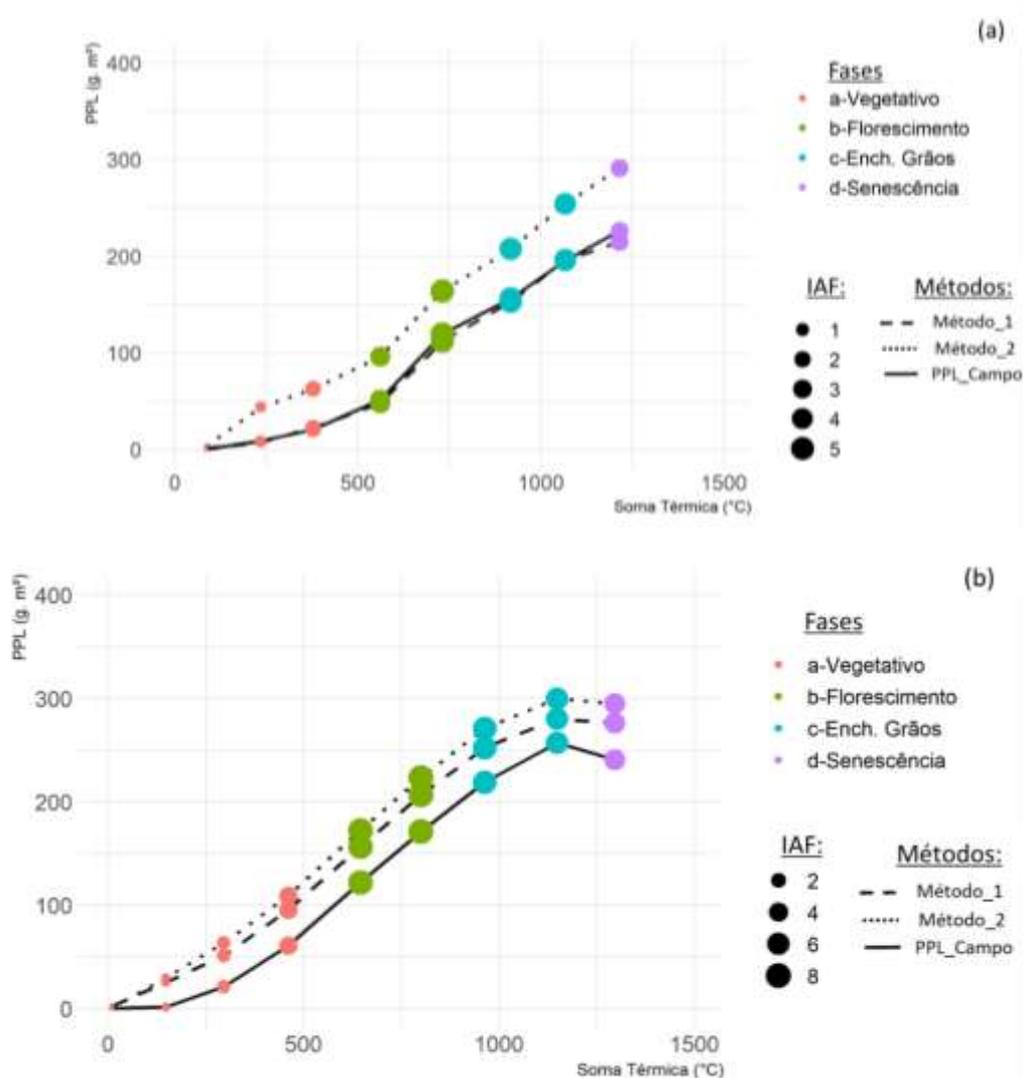
FIGURA 5. Perfil temporal da Eficiência de Absorção Obtida com dados coletados a campo (Campo), através do enfoque1 (Método_1) e Enfoque 2 (Método_2). Para as safras 2015-16 (a), 2016-17 (b) e 2017-18 (c). Carazinho –RS.

Na Figura 6 estão representados as PPL acumuladas ao longo do ciclo da soja, obtidos com dados medidos a campo, e através do enfoque 1 e enfoque 2 para as três safras. A PPL acumulada mostrou magnitudes diferentes para as três safras e enfoques adotados. As três safras apresentaram valores acumulados estimados de PPL entre 214 a 309 gC. m², sendo que o acúmulo máximo ocorreu na fase de enchimento de grãos. As safras 2015-16 e 2017-18 apresentaram um acúmulo de PPL semelhantes no ciclo. Pode-se inferir que a condição hídrica esteve relacionada ao acúmulo da PPL, mas em sentidos contrários. Na safra 2015-16 houve limitação hídrica, enquanto que na safra 2017-18 a grande quantidade de chuvas pode ter interferido na incidência da RFA na área experimental.

Comparando o impacto dos dois enfoques testados utilizando dados de SR para a obtenção da eficiência de absorção sobre o valor estimado de PPL, verifica-se uma resposta coerente. Na safra 2015-16, similar a ϵ_{abs} os valores mais altos de PPL foram obtidos com o enfoque 2, sendo que o enfoque 1 e dados de campo apresentaram valores muito próximos. Na safra 2016-17 houve maior aproximação dos dados estimados pelo enfoque 1 e 2, consequência das ϵ_{abs} mais altas no início do ciclo. Já na safra 2017-18 ambos enfoques geraram valores similares de PPL.

Estes resultados encontram respaldo na literatura. Para Ahl *et al.*, (2005) o IAF pode ser considerado para cálculos de PPL e seu uso é de grande valia para diferenciar os diferentes usos e coberturas do solo. Já Peng *et al.* (2019), concluíram que dados de sensoriamento remoto, principalmente dados das bandas do vermelho e infravermelho do

espectro eletromagnético, são capazes de estimar a PPL com precisão para cultivos anuais como soja e milho. Para Rosa e Sano (2013), dados de NDVI obtidos através do sensor MODIS demonstraram grande aptidão para estimativa da PPL ao longo do ano para pastagens. Além disso, o NDVI possibilita o monitoramento de elementos importantes para estimativa da PPL, como a RFAabs, podendo acompanhar quase em tempo real o desenvolvimento da soja (Fontana *et al.*, 2012).



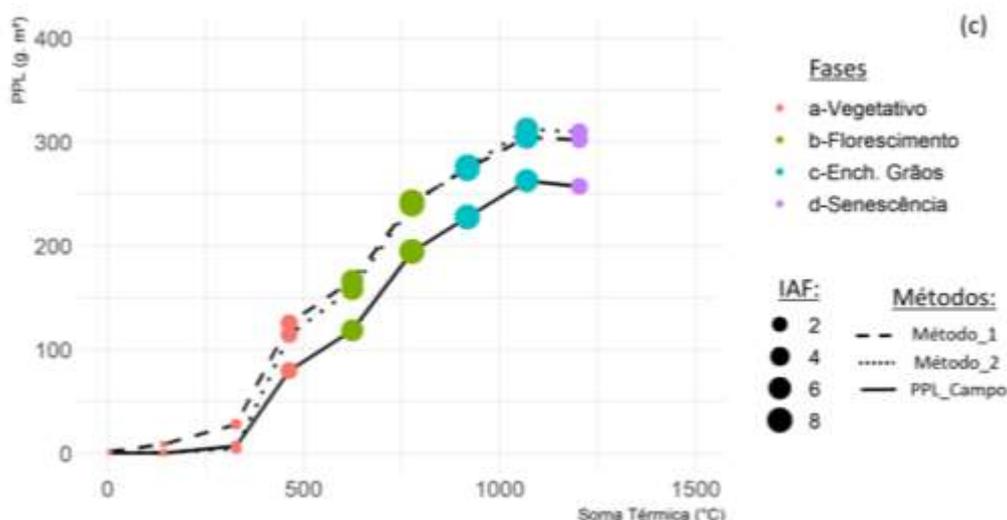


FIGURA 6. Perfil temporal de PPL, diâmetros distintos indicam diferentes tamanhos de IAF Safra 2015-16 (a), Safra 2016-17 (b) e Safra 2017-18 (c). Carazinho-RS.

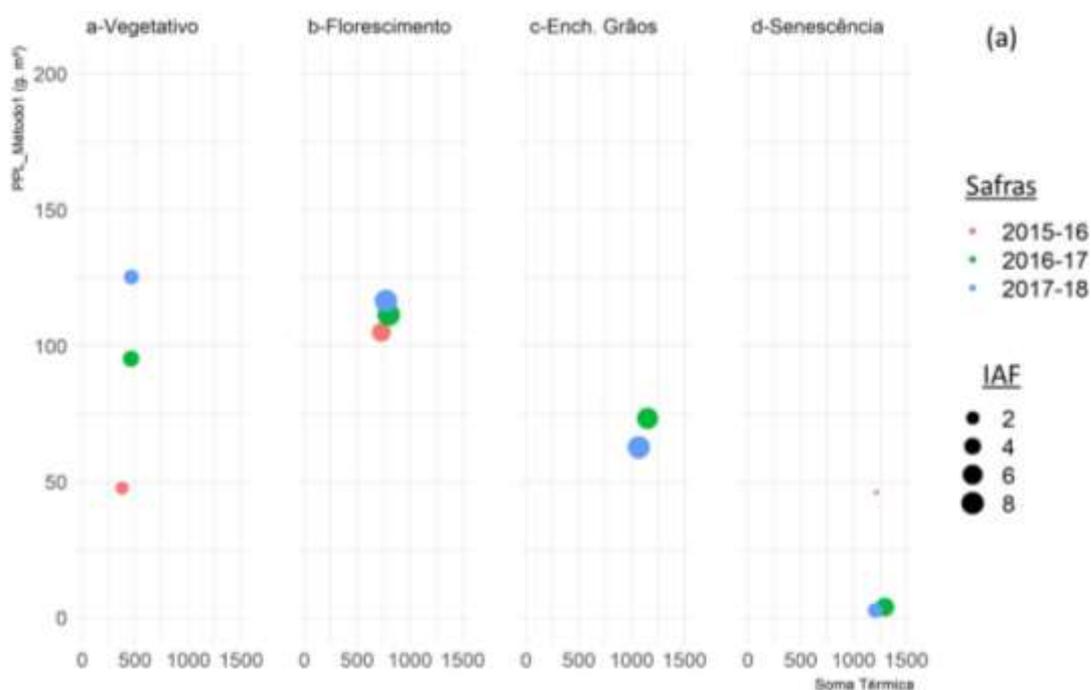
Na Tabela 3 estão os resultados da regressão linear para fins de comparação entre os métodos de estimativa da PPL para cada safra. Considerando os intervalos de confiança entre os parâmetros das equações é possível concluir que os dados de PPL obtidos tanto com o método_1 e método_2 são semelhantes nas safras 2016-17 e 2017-18. A semelhança entre os resultados obtidos para ambas as safras pode estar relacionada com o melhor desenvolvimento foliar ao longo do ciclo da soja e similar. Por outro lado, a deficiência hídrica ocorrida na safra 2015-16 (Schaparini *et al.*, 2020) na fase do florescimento, determinou os menores valores de PPL em comparação com as demais safras.

TABELA 3. Intervalo de confiança (IC) (95%) para os parâmetros (a e b) da regressão linear para a Produtividade Primária Líquida (PPL) da soja obtidas através dos métodos 1 e 2, nas safras 2-15-16; 2-16-17; 2017-18.

Safra	Equação	r ²	Parâmetros			
			a		b	
			IC (95%)			
			Min	Max	Min	Max
2015-16	$y = -19,92 + 0,81x$	0,98	-34,23	-5,62	0,73	0,88
2016-17	$y = -3,89 + 0,94x$	0,99	-8,50	0,72	0,91	0,96
2017-18	$y = 13,00 + 0,94x$	0,99	4,32	21,67	0,90	0,98

Ao acumular a PPL nas quatro fases avaliadas (Figura 7) pode-se avaliar as diferenças ocorridas ao longo das safras e entre as safras. A maior diferença entre os dados foi notada na fase vegetativa em ambos enfoques utilizados para obtenção da ξ abs, mas

especialmente no enfoque 1. Para a safra 2015-16 o maior acúmulo de PPL ocorreu na fase de florescimento e posteriormente na fase de enchimento de grãos. O incremento tardio de IAF e consequentemente de biomassa na fase vegetativa pode explicar esse pequeno acúmulo de PPL no início do ciclo. Já para a safra 2016-17, os maiores valores acumulados de PPL ocorreram nas fases vegetativa e de florescimento. Apresentar maior desenvolvimento de biomassa nas das fases iniciais é importante para soja pois na fase de enchimento de grãos, toda a energia da planta deve estar direcionada para a qualidade nas formações dos grãos.



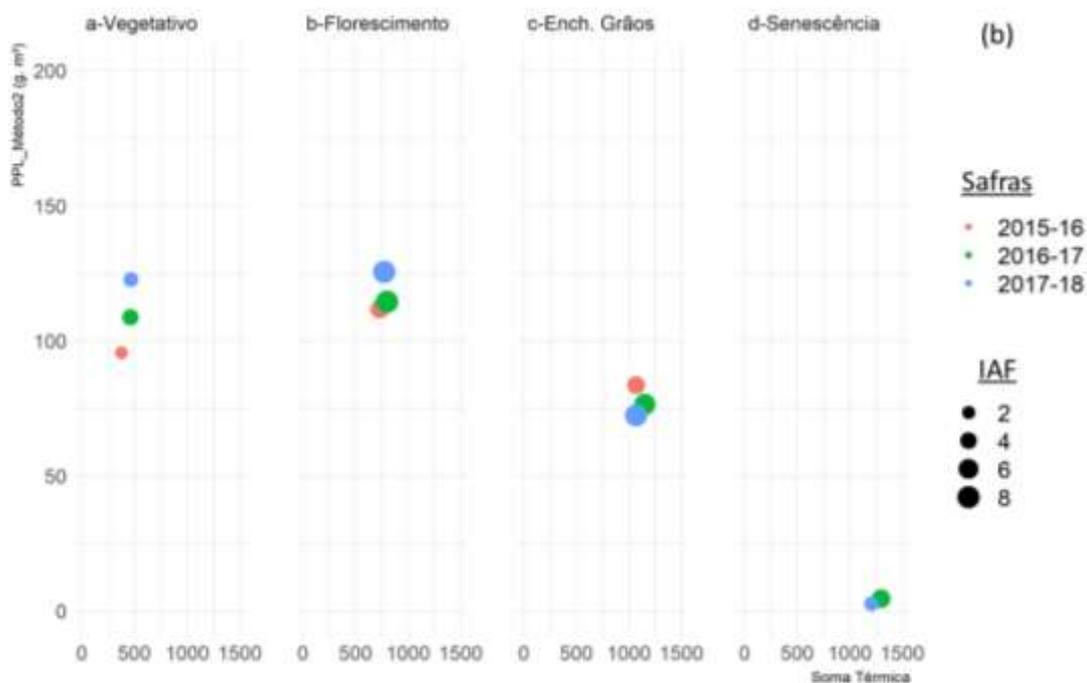


FIGURA 7. Acumulado de PPL para cada fase dentro do ciclo da soja. Método 1 (a), método 2 (b). Safras 2015-2016, 2016-2017 e 2017-2018, Carazinho-RS.

5.4 Conclusão

NDVI obtido através do sensor MODIS mostra coerência com os dados medidos a campo e pode-se constituir em um estimador do IAF e da eficiência de absorção da radiação pelo dossel de soja.

Ambos os enfoques testados para estimar a eficiência de absorção da radiação mostram-se adequados para fins de estimativa da PPL. O enfoque 2, que utiliza o IAF estimado usando o NDVI / MODIS como variável independente do modelo, apesar de não apresentar diferença significativa gera estimativas mais aproximadas dos dados medidos a campo.

A vantagem do uso de dados de NDVI / MODIS nas estimativas da PPL de lavouras de soja é a possibilidade de remotamente caracterizar as alterações na PPL nas diferentes fases do ciclo da cultura e também gerar o valor da PPL acumulada no ciclo completo.

Recomenda-se a realização de trabalhos futuros visando a validação das relações obtidas no presente estudo, de forma a permitir a extrapolação regional das estimativas de PPL em diferentes regiões de produção de soja no Rio Grande do Sul.

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 Campão Grande pela parceria no trabalho.

5.5 Referências Bibliográficas

- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [Berlin, Germany], v. 22, n. 6, p. 711-728, 1 dez. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 15 dez. 2019.
- CHARTIER, M. *et al.* Utilisation des cellules au silicium amorphe pour la mesure du rayonnement photosynthétiquement actif (400-700 nm). **Agronomie**, France, v. 9, n. 3, p. 281-284, 1989. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1051/agro:19890308>. Acesso em: 09 jun. 2019.
- CORDEIRO, A. P. A. *et al.* Regiões homogêneas de vegetação utilizando a variabilidade do NDVI. **Ciência Florestal**, [Santa Maria, RS, Brazil], v. 27, n. 3, p. 883, 31 ago. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509828638>. Acesso em: 15 dez. 2019.
- DE SOUZA, P.; MALHI, Y. Land use change in India (1700-2000) as examined through the lens of human appropriation of net primary productivity. **Journal of Industrial Ecology**, United States, v. 22, n. 5, p.1202-1212, 26 ago. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/jiec.12650>. Acesso em: 23 jun. 2020.
- DELLA JUSTINA, D. D. **Dinâmica espectral da soja por meio do NDVI utilizando sensores orbital e terrestre**. 2014. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)- Programa de Pós-graduação "stricto Sensu" em Engenharia Agrícola, Engenharia, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel/PR, 2014. Disponível em: <http://tede.unioeste.br/handle/tede/2650>. Acesso em: 23 jun. 2020.
- DOBROVOLSKI, R. D. L.; MARCO JÚNIOR, P.; DINIZ-FILHO, J. A. F. Agricultural Expansion Can Menace Brazilian Protected Areas During the 21st Century. **Natureza & Conservação**, Rio de Janeiro, RJ, v. 9, n. 2, p. 208-213. 2011.
- ESQUERDO, J. C. D. M. *et al.* Use of NDVI/AVHRR time-series profiles for soybean crop monitoring in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, United Kingdom, v. 32, n. 13, p. 3711-3727, 28 jun. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/01431161003764112>. Acesso em: 23 jun. 2020.

FONTANA, D. C. *et al.* Estimativa da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela cultura da soja através de dados do sensor Modis. **Bragantia**, São José dos Campos, SP, v. 71, n. 4, p. 563-571, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0006-87052012000400015>. Acesso em: 23 jun. 2020.

FONTANA, D. C. *et al.* NDVI e alguns fatores de variabilidade. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., 2019, Santos. **Anais [...]**. Campinas: GALOÁ, 2019. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/ndvi-e-alguns-fatores-de-variabilidade>. Acesso em: 14 jun. 2019.

FRANÇA NETO, J. *et al.* **Tecnologia da produção de semente de soja de alta qualidade**. Londrina: Embrapa Soja, 2016. 82 p. (Embrapa Soja. Documentos, 380).

FREITAS, R. E. *et al.* Expansão agrícola no Brasil e a participação da soja: 20 anos. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, DF, v. 54, n. 3, p. 497-516, set. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1234-56781806-94790540306>. Acesso em: 23 jun. 2020.

GAVA, R. *et al.* Estresse hídrico em diferentes fases da cultura da soja. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, CE, v. 9, n. 6, p. 349-359, 17 nov. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v9n600368>. Acesso em: 08 maio 2020.

JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto da vegetação. In: JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parênteses Editora, 2011. Cap: 11 – Sensoriamento Remoto da Vegetação, p. 357-402.

LOREL, C. *et al.* Linking the human appropriation of net primary productivity-based indicators, input cost and high nature value to the dimensions of land-use intensity across French agricultural landscapes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Netherlands, v. 283, p. 106565-106565, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2019.06.004>.

MARCON, E. *et al.* Uso de diferentes fontes de nitrogênio na cultura da soja. **Revista Thema**, Pelotas, RS, v. 14, n. 2, p. 298-308, 23 maio 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.15536/thema.14.2017.298-308.427>. Acesso em: 08 maio 2020.

REIS, E. M.; ZANATTA, M. REIS, A. C. Performance of chlorothalonil levels and spraying intervals on Asian rust control and soybean grain yield. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, SP, v. 45, n. 3, p. 261-264, set. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-5405/204867>. Acesso em: 18 jan. 2020.

RISSO, J. *et al.* Índices de vegetação Modis aplicados na discriminação de áreas de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 47, n. 9, p. 1317-1326, set. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2012000900017>. Acesso em: 18 jan. 2020.

ROSA, R.; SANO, E. E. Determinação da produtividade primária líquida (NPP) de pastagens na bacia do rio Paranaíba, usando imagens MODIS. Geofocus: **Revista**

Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, Barcelona, p. 367-395, 2013. Disponível em: <<http://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/274>>. Acesso em: 17 set. 2018.

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**, Campina Grande, PB, v. 18, n. 1, p. 54-63, jan. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662014000100008>. Acesso em: 18 jan. 2021.

SENTELHAS, P. C. *et al.* The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **The Journal of Agricultural Science**, United Kingdom, v. 153, n. 8, p. 1394-1411, 24 abr. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1017/s0021859615000313>. Acesso em: 18 jan. 2021.

SHANMUGAPRIYA, P. *et al.* Applications of remote sensing in agriculture: a review. **International Journal of Current Microbiology And Applied Sciences**, India, v. 8, n. 01, p. 2270-2283, 10 jan. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20546/ijcmas.2019.801.238>. Acesso em: 08 maio 2020.

STRECK, E.V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. 2 ed. Porto Alegre: Emater/RS, 2008. 222 p.

TRINDADE, F. S. *et al.* Relação espectro-temporal de índices de vegetação com atributos do solo e produtividade da soja. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, PA, v. 62, p. 1-11, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.22491/rca.2019.2928>. Acesso em: 23 abr. 2020.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo utilizou uma base de dados obtidos em experimento *on farm* em três safras consecutivas buscando indicadores espectrais, oriundos de sensores remotos, de forma a obter estimativas robustas da PPLda soja. Dois foram os pontos chaves do trabalho. Primeiro, foi fato do experimento ter sido no formato *on farm*, o que introduz maior aproximação das condições experimentais das reais práticas de condução da cultura na região produtora. Segundo, foi a larga base de dados composta por 3 anos experimentais, a qual conferiu maior robustez nas relações avaliadas.

Nestas três safras ocorreram condições diferenciadas quanto as condições meteorológicas, as quais determinaram padrões também diferenciados de crescimento e desenvolvimento das plantas de soja. Ao avaliar o balanço hídrico observou-se que períodos de deficiência hídrica ocasionam perdas tanto no desenvolvimento (IAF e MST) quanto na produtividade da soja. Para monitoramento do desenvolvimento vegetativo, os índices de vegetação obtidos através do Sensoriamento Remoto, tanto na superfície como orbital, demonstraram sensibilidade frente a períodos de restrição de água, resultando em perfis com maiores oscilações durante o ciclo da cultura.

Além da radiação solar influenciar todos os elementos meteorológicos, ela também é a principal fonte de energia para os processos biofísicos que ocorrem na planta, tendo sido avaliados neste estudo os componentes do balanço da RFA, assim como a PPL acumulada no ciclo. A máxima eficiência de absorção se dá concomitante ao valor máximo de IAF e, portanto, é maior em safras onde o desenvolvimento do IAF e MST são melhores. Entretanto, a EUR foi a mesma nas três safras analisadas indicando que a eficiência de conversão da radiação em matéria seca refere-se à características da planta,

como genótipos semelhantes. Para uma melhor avaliação da EUR, ao longo do ciclo da soja, a segmentação em fases mostrou maiores detalhamentos. As fases de florescimento e enchimento de grãos diferenciaram-se das demais e demonstraram maior eficiência no uso da radiação, enfatizando a importância da EUR para estas etapas do ciclo, considerando termos produtivos.

Além de caracterizar o ciclo da soja, o NDVI demonstrou capacidade em constituir-se em um estimador do IAF e da eficiência de absorção da radiação pelo dossel de soja. Com isso, foi possível estimar a PPL para as três safras avaliadas no estudo. Dentre os dois enfoques avaliados para estimar a PPL, o enfoque que utiliza o IAF obtido de imagens NDVI/MODIS como variável independente do modelo, apesar de não se diferenciar significativamente, gerou estimativas mais aproximadas dos dados medidos a campo. Existem outros enfoques propostos na literatura, assim como outros índices de vegetação que podem e devem ser testados em estudos subsequentes. Mas fica a constatação de que o NDVI/MODIS é um robusto indicador que pode ser utilizado em extrapolações regionais.