

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Efeito da água no rendimento e necessidade de irrigação da cultura da soja

Felipe Gustavo Pilau

Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para o Concurso de Livre-Docência junto do Departamento de Engenharia de Biosistemas, área de Agrometeorologia.

Piracicaba
2021

Felipe Gustavo Pilau
Engenheiro Agrônomo

Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura
“Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para o Concurso de
Livre-Docência junto do Departamento de
Engenharia de Biosistemas, área de
Agrometeorologia.

Piracicaba
2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Pilau, Felipe Gustavo

Efeito da água no rendimento e necessidade de irrigação da cultura da soja / Felipe Gustavo Pilau. - - Piracicaba, 2021.

117 p.

Tese (Livre-docência) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Precipitação 2. Soja 3. Deficiência hídrica 4. Modelagem I. Título

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese aos meus amores, Márcia, Enzo e Maria Luiza.

Amo vocês!

AGRADECIMENTOS

À Deus

À minha família, em especial a minha esposa Márcia, pelo apoio, amor, paciência e companheirismo.

Aos meus pais, Laercio e Ivoni, por tudo.

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e Universidade de São Paulo pela formação profissional.

Aos meus orientadores Prof. Sandro Luis Petter Medeiros, Prof. Paulo Augusto Manfron e Prof. Luiz Roberto Angelocci, pelas orientações, ensinamentos e oportunidades que permitiram chegar até aqui.

Ao Prof. Fábio Marin pelas cooperações científicas e acadêmicas.

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pela oportunidade de atuar como docente no Centro de Educação Superior Norte do RS (CESNORS) - campus Frederico Westphalen, e no Centro de Ciências Rurais – Departamento de Fitotecnia, em Santa Maria, RS.

À Universidade de São Paulo, onde prossigo minha carreira de professor universitário no Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP).

Aos meus orientados, suporte e apoio na coleta e processamento de parte dos dados utilizados neste trabalho.

Às agências CNPq e FAPESP, pelos auxílios financeiros concedidos, fundamentais para o desenvolvimento de nossas pesquisas.

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUÇÃO	8
2. IMPACTO DA VARIABILIDADE DAS PRECIPITAÇÕES NA PRODUTIVIDADE DA SOJA NO SUL DO BRASIL.....	10
RESUMO	10
ABSTRACT.....	10
2.1. INTRODUÇÃO	11
2.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
2.2.1. Área de estudo e condições climáticas e de solo.....	12
2.2.2. 'Boundary function' para análises de lacunas de produtividade da soja.....	16
2.2.3. Balanço hídrico da soja.....	17
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
2.4. CONCLUSÕES	29
2.5. REFERÊNCIAS.....	30
3. REQUERIMENTO DE IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR E EFICIÊNCIA CLIMÁTICA PARA A CULTURA DA SOJA NO RIO GRANDE DO SUL.....	36
RESUMO	36
3.1. INTRODUÇÃO	37
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	38
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
3.4. CONCLUSÕES	48
3.5. REFERÊNCIAS.....	49
4. VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO MEDIDA EM MALHAS PLUVIOMÉTRICAS E EFEITOS SOBRE PRODUTIVIDADE ESTIMADA DA SOJA.....	52
RESUMO	52
ABSTRACT.....	52
4.1. INTRODUÇÃO	53
4.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	55
4.2.1. Área experimental.....	55
4.2.2. Medida da precipitação.....	56
4.2.3. Análise dos dados de precipitação	57
4.2.4. Dados históricos de precipitação de Piracicaba (SP).....	58
4.2.5. Falhas de dados de precipitação.....	58
4.2.6. Modelos e simulação da produtividade da Soja.....	58
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.3.1. Dados pluviométricos das malhas MP1 e MP2.....	60
4.3.2. Análise da precipitação entre pontos de medida das malhas pluviométricas	62
4.3.3. Variabilidade da precipitação na escala diária	68
4.3.4. Variabilidade relacionada à distância entre pluviômetros	71
4.3.5. Variabilidade da precipitação para períodos de produção de Soja.....	72
4.3.6. Variabilidade da produtividade simulada da soja.....	79
4.4. CONCLUSÃO.....	84
4.5. REFERÊNCIAS.....	85
5. USO DO ÍNDICE VEGETATIVO NDVI PARA AVALIAR A RESPOSTA DA SOJA À CONDIÇÃO METEOROLÓGICA.....	93
RESUMO	93
ABSTRACT.....	93
5.1. INTRODUÇÃO	94
5.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	95
5.2.1. Local de estudo e dados da cultura	95

5.2.2.	<i>Dados meteorológicos</i>	97
5.2.3.	<i>Dados de NDVI</i>	97
5.2.4.	<i>Balanço hídrico da cultura da soja</i>	98
5.3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	100
5.3.1.	<i>Condições meteorológicas</i>	100
5.3.2.	<i>Variabilidade temporal do NDVI da cultura da soja</i>	106
5.4.	CONCLUSÃO.....	111
5.5.	REFERÊNCIAS.....	111

RESUMO

Efeito da água no rendimento e necessidade de irrigação da cultura da soja

A agricultura certamente é a atividade econômica mais dependente e influenciada pelas condições de clima e tempo. No Brasil eventos meteorológicos extremos são as principais causas de insucesso, trazendo incertezas à economia e segurança alimentar. Sobre isso, a disponibilidade hídrica, naturalmente variável devido à distribuição irregular da precipitação, é o fator mais restritivo. Portanto, avançar no conhecimento da dinâmica do crescimento e desenvolvimento das lavouras e sua relação com o fator meteorológico são questões básicas e necessárias. Por esse motivo essa tese se propôs avaliar da água sobre a cultura da soja. Em uma análise de macroescala, com foco no estado do Rio Grande do Sul (RS), o segundo capítulo destaca a relação entre a variabilidade das condições meteorológicas e a produtividade da soja, retratando a influência do El Niño Oscilação Sul (ENOS), enquanto o terceiro capítulo apresenta a necessidade de irrigação suplementar e seu efeito na eficiência climática da cultura no RS. Já no quarto e quinto capítulos estão descritas análises agrometeorológicas em microescala. Com duas malhas pluviométricas instaladas no município de Piracicaba, SP, foi quantificada a variabilidade espaço-temporal da precipitação e, com base em modelos de crescimento de plantas, aferido seu efeito sobre a variabilidade espacial da produtividade de soja. Entretanto, como a ausência de estações meteorológicas é algo comum, no quarto capítulo foi explorado o uso de um produto do sensoriamento remoto, o índice vegetativo NDVI, como expressão das respostas da cultura da soja às condições meteorológicas, especialmente a disponibilidade hídrica. De forma geral, os resultados reforçam a influência meteorológica sobre a cultura da soja no Rio Grande do Sul, chegando-se ao custo hídrico e lâminas de irrigação necessárias para manter a estabilidade produtiva. As análises feitas em microescala descrevem a variabilidade espaço-temporal da precipitação em áreas que caracterizam as dimensões de talhões ou propriedades rurais, retratando como essa questão pode afetar a produtividade e, que na impossibilidade de mensurar a precipitação o uso do sensoriamento remoto pode ser útil, permitindo inferir sobre o efeito meteorológico a partir das alterações do padrão temporal do índice.

Palavras-chave: Soja; Precipitação; Deficiência hídrica; Modelos de crescimento de plantas; NDVI

ABSTRACT

Effect of water on yield and irrigation requirements for soybean crop

Agriculture is likely the main dependent economic activity by weather conditions. In Brazil, extreme weather events are the main uncertainty causes to the economy and county food security. Water availability is the most irregular and restrictive weather variable due to the rainfall distribution. Therefore, advancing in the knowledge of the dynamics of crop growth and development and their relationships with the weather are basic and necessary aspects for improving agricultural productivity. This study aimed to evaluate the weather effect on the soybean crop considering different spatial scale analysis. At macroscale, the first chapter was dedicated to the state of Rio Grande do Sul and highlighted the relationship between the weather variability and soybean yield, portraying the influence of El Niño Oscilação Sul (ENOS). The second chapter presented the irrigation requirements and the climatic efficiency of the soybean crop in the State of Rio Grande do Sul. In the third and fourth chapters, microscale agrometeorological analyzes were described. Based on two rain gauge networks installed in Piracicaba-SP-Brazil, the spatio-temporal rainfall variability was quantified and, based on process based crop models, its effect on the spatial variability of soybean yield was measured. Yet, the fourth chapter explored the use of a remote sensing data as an expression of soybean responses to agrometeorological conditions, especially soil water availability. In general, the results reinforce the meteorological influence on the soybean crop in Rio Grande do Sul, reaching the water cost and irrigation levels necessary to maintain productive stability. The microscale analyzes describe the rainfall spatio-temporal variability in areas that characterize the dimensions of plots or rural properties, portraying how this issue can affect productivity and that, informing how this issue can affect crop yield and that, in the impossibility of measuring rainfall, the use of remote sensed data as a replacement, allowing inferring about the meteorological effect from the changes in the index's temporal pattern.

Keywords: Soybean; Rainfall; Water déficit; Crop growth simulation models; NDVI

1. INTRODUÇÃO

Em todo o mundo a agricultura certamente é a atividade econômica mais dependente e influenciada pelas condições de clima e tempo. Apesar de todo avanço tecnológico e científico é o setor mais afetado por eventos meteorológicos extremos como granizo, precipitações intensas e longas estiagens, que são as principais causas de insucesso, trazendo incertezas à economia e segurança alimentar.

Para o Brasil, com quase 70 milhões de hectares produzindo grãos, 32 milhões de hectares ocupados com a cultura da soja, estatísticas assinalam que a maior parte da variabilidade produtiva se deve as condições meteorológicas. A disponibilidade hídrica, naturalmente variável devido à distribuição irregular da precipitação, é o fator mais restritivo.

O estado do Rio Grande do Sul, terceiro estado maior produtor de soja do Brasil, apesar de ter aptidão climática apresenta significativa variabilidade interanual da produção de soja devido à acentuada variabilidade climática, que está intimamente relacionada ao El Niño Oscilação Sul (ENOS). Vários estudos têm demonstrado as teleconexões entre ENOS e anomalias nos padrões sazonais de precipitação local, influenciando a colheita dos cultivos de primavera-verão, especialmente a soja. Ainda assim a relação entre a variabilidade do clima e a produtividade da soja na região precisa ser mais bem compreendida. Na conjuntura da alta influência hídrica a irrigação suplementar passa a ser uma prática fundamental e crescentemente adotada, permitindo a estabilidade produtiva. Portanto, para efeito prático, faz-se importante quantificar a necessidade de irrigação suplementar da cultura da soja no Rio Grande do Sul.

No contexto da variabilidade produtiva é do conhecimento técnico que em áreas agrícolas é possível encontrar subáreas com diferentes níveis de qualidade e, portanto, com diferentes potenciais produtivos, embora as práticas de manejo adotadas sejam aplicadas uniformemente. Em cada talhão de produção podem ser encontradas subunidades com distintas características químicas e físicas do solo, biológicas e microbiológicas e até mesmo distinções meteorológicas.

Esse conjunto de elementos impõem diferentes potenciais produtivos, e com o intuito de vislumbrar essas relações muitas pesquisas são conduzidas. Diversos trabalhos tentam relacionar a variabilidade produtiva aos caracteres de solo, encontrando normalmente coerências entre as variáveis, mas nunca explicando completamente a causa das desigualdades espaciais de produção. Outras pesquisas recaem sobre aspectos bióticos, também com parcial correlação entre causa-efeito. A grande lacuna científica até aqui está na avaliação da variabilidade espacial e temporal dos elementos meteorológicos dentro da unidade produtiva.

Sendo a precipitação um fenômeno meteorológico irregular, altamente variável no tempo e no espaço, torna-se complexo compreender a influência na produtividade agrícola. Para a quantificação direta da variabilidade da precipitação em alta resolução espaço-temporal é necessário estabelecer malhas pluviométricas em superfície ou adotar tecnologias que permitem estimar a chuva, como radares e satélites. Alternativamente podem ser utilizados produtos do sensoriamento remoto. Índices de vegetação, a exemplo do NDVI, ao revelarem informações relacionadas ao crescimento e desenvolvimento de cultivos agrícolas, possibilitam inferir sobre a ação dos fatores condicionantes da produção, dentre eles o meteorológico.

Com base no exposto, o objetivo geral da tese foi contribuir para a compreensão da influência água sobre a cultura da soja, com foco em precipitação e disponibilidade hídrica, por meio de análises em diferentes escalas espaciais. Os objetivos específicos de cada capítulo foram:

2. Para o estado do Rio Grande do Sul, dividir os efeitos do solo e do clima sobre a produtividade da cultura soja com base em simulações e dados de produção, avaliar o potencial e as lacunas de produtividade para diferentes valores de precipitação e regiões e avaliar a perda de produtividade da cultura da soja devido ao déficit hídrico em cada região do RS.
3. Quantificar a necessidade de irrigação suplementar e seu efeito na eficiência climática da cultura da soja no Rio Grande do Sul.
4. Caracterizar a variabilidade da precipitação medida por duas malhas pluviométricas, com áreas de domínio de 1000,0 ha e 36,0 ha em Piracicaba – SP, e caracterizar como modelos de crescimento de plantas podem ser usados para identificar a variabilidade espacial da produtividade de soja em função da variabilidade da precipitação mensurada por malhas pluviométricas.
5. Explorar o índice vegetativo NDVI como expressão das respostas da cultura da soja às condições agrometeorológicas, especialmente a disponibilidade hídrica.

2. IMPACTO DA VARIABILIDADE DAS PRECIPITAÇÕES NA PRODUTIVIDADE DA SOJA NO SUL DO BRASIL

Resumo

Terceiro estado produtor de soja no Brasil, o Rio Grande do Sul (RS) apresenta variabilidade interanual da produção de soja, causada principalmente pela disponibilidade de água. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos climáticos, com foco especial nas precipitações em 25 safras de soja e 11 regiões produtoras do Estado. Os locais foram divididos em três agrupamentos de acordo com a produtividade da soja e o efeito do El Niño Oscilação Sul (ENOS) foi considerado em associação com o balanço hídrico do solo. Fases neutras de ENOS ocorreram em 32% dos anos, enquanto El Niño e La Niña ocorreram em 36% e 32% dos anos, respectivamente. As estações sob o El Niño normalmente apresentam maior precipitação acumulada, enquanto as sob a La Niña apresentam uma redução. Sob a condição neutra os agrupamentos B e C parecem ser mais perturbados. Nenhuma estação teve diferença estatística de precipitação entre os agrupamentos em condição de neutralidade. O gradiente térmico no RS, de outubro a janeiro, beneficiou os locais do agrupamento A. A interação de solos com maior capacidade de armazenamento de água e temperatura mais amena reduz o consumo de água pela soja, ocasionando menores valores de deficiência hídrica. Uma *'boundary function'* relacionando a produtividade da soja e a precipitação mostra o limite de 800 mm para incrementos significativos de produtividade, e tais quantidades de precipitação só foram alcançadas nas estações do El Niño. O efeito combinado da precipitação e do tipo de solo na produtividade da soja, representado pela relação da produtividade da soja com o déficit hídrico, expressou o custo hídrico, de -3,7 a -15,2 kg mm⁻¹ ha⁻¹. A tomada de decisões sobre políticas públicas e investimentos na cadeia produtiva da soja pode ser embasada em nossos resultados, seja para um melhor planejamento dos investimentos nos sistemas de cultivo em função das previsões da fase ENSO, seja para reduzir os riscos de produção na região inerentes ao clima local.

Palavras-chave: *Glycine max.* L.; chuva; deficiência hídrica; El Niño Oscilação Sul

Abstract

As the third soybean-producer state in Brazil, Rio Grande do Sul (RS) presents a known year-on-year unevenness for soybean production, mainly due to water availability. This study aimed to assess the weather effects, with special focus on rainfall during 25 soybean growing seasons and 11 producing regions around the State. Sites were divided into three Clusters according to soybean yield and the effect of El Niño Southern Oscillation (ENSO) was considered in

association with soil water balance. Neutral ENSO phases occurred in 32% of the years, while El Niño and La Niña occurring in 36% and 32% of the years, respectively. Seasons under El Niño normally present higher accumulated rainfall, whereas those under La Niña present a reduction. Data from neutral-year sites of Clusters B and C seems to be more disturbed. No season had statistical difference of rainfall among Clusters under Neutral conditions. In addition, thermal gradient in RS from October to January benefited sites of Cluster A. Interaction of soils with higher water-storage capacity and cooler temperature reduces the water consumption by soybeans, causing lower values of water deficiency. A boundary function relating soybean yield and rainfall displays the limit of 800 mm for significant yield increments, and such amounts of rainfall were only achieved in El Niño seasons. The combined effect of rainfall and soil type on soybean yield, represented by the actual soybean yields-water deficit relationship, led to water propitiate from -3.7 to $-15.2 \text{ kg mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$. Decision-making on public policies and investments on the soybean industry can be supported from our results, either to better planning the investments on the soybean farming systems depending on the ENSO phase predictions, either to reduce the production risks in the region inherent to local weather.

Keywords: *Glycine max.* L.; rainfall; water deficit; El Niño South Oscillation

2.1. Introdução

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, produzindo 119,3 milhões de toneladas em 35 milhões de hectares na safra 2017/18 (Conab, 2018). No extremo sul do Brasil, o Rio Grande do Sul (RS) ocupa o terceiro lugar entre os estados produtores de soja, com 14,4% da produção brasileira (Conab, 2018). Embora o RS ofereça aptidão climática para a cultura da soja, o estado apresenta significativa variabilidade interanual de produção (Cunha et al., 1998; Battisti et al., 2013).

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2019), a produtividade média da soja nas últimas dez safras variou de 1,55 a 3,32 Mg ha^{-1} . Considerando todos os dados históricos do Brasil, desde 1976/77, a variabilidade da produtividade da soja é ainda maior, com valores abaixo de 1,0 Mg ha^{-1} em três safras: 0,91 Mg ha^{-1} (1978/79), 0,72 Mg ha^{-1} (1990/91) e 0,69 Mg ha^{-1} (2004/05).

A produtividade da soja é fortemente controlada pelas características de solo, especialmente as relacionadas à capacidade de retenção de água e a tecnologia dos sistemas agrícolas. Além disso, nesta região, é sabido que a principal causa da irregularidade da produtividade é a variabilidade do clima (Berlato & Fontana, 2003), que por sua vez está intimamente relacionada ao El Niño Oscilação Sul (ENOS) (Grimm et al., 2000; Grimm, 2004; Tedeschi et al., 2015).

Com base em dados de longo prazo de 28 estações meteorológicas no RS, Matzenauer et al. (2017) relatam que a precipitação média anual para os anos de El Niño (EL) é de 1.858 mm (ocorrendo em 26,8% dos anos), reduzida à 1.529 mm (49,2% dos anos) e 1.480 mm (24% dos anos) para anos Neutros e La Niña, respectivamente.

A influência do ENOS no clima do RS pode ser geograficamente diferente dentro do estado, dependendo diretamente da intensidade e do tipo do ENOS (Grimm et al., 2000; Grimm, 2004). Essa variabilidade espacial torna os impactos gerais do ENOS na produtividade da soja ainda incertos no estado (Berlato & Fontana, 1999; Matzenauer et al. 2018). Até onde sabemos a relação entre a variabilidade do clima e a produtividade da soja na região ainda não está bem definida. Para preencher a lacuna de conhecimento sobre o efeito do ENOS e da variabilidade do clima na produtividade da soja no estado do RS, e fornecer alguns *'insights'* de previsão para tomadores de decisão e produtores, analisamos um banco de dados meteorológico de longo prazo, contendo dados de 11 estações meteorológicas, juntamente com as fases do ENOS.

Os objetivos específicos foram: (i) dividir os efeitos do solo e do clima sobre a produtividade da cultura com base em simulações e dados de produção (ii) avaliar o potencial e as lacunas de produtividade para diferentes valores de precipitação e regiões e (iii) avaliar a perda de produtividade da cultura da soja devido ao déficit hídrico em cada região do RS.

2.2. Material e métodos

2.2.1. Área de estudo e condições climáticas e de solo

Para onze locais do Rio Grande do Sul (Figura 1), os dados de produtividade da soja e meteorológicos, também correlacionados com o ENOS, foram usados para analisar a variabilidade da produtividade da cultura. O conjunto oficial de dados de produtividade da soja é fornecido desde 1990 pelo Instituto Nacional de Geografia e Estatística (IBGE), e os dados meteorológicos são fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pela Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO) de 1991 a 2017. O clima no RS (Figura 1) é o subtropical úmido com chuvas anuais bem distribuídas entre 1220 mm a 1350 mm.

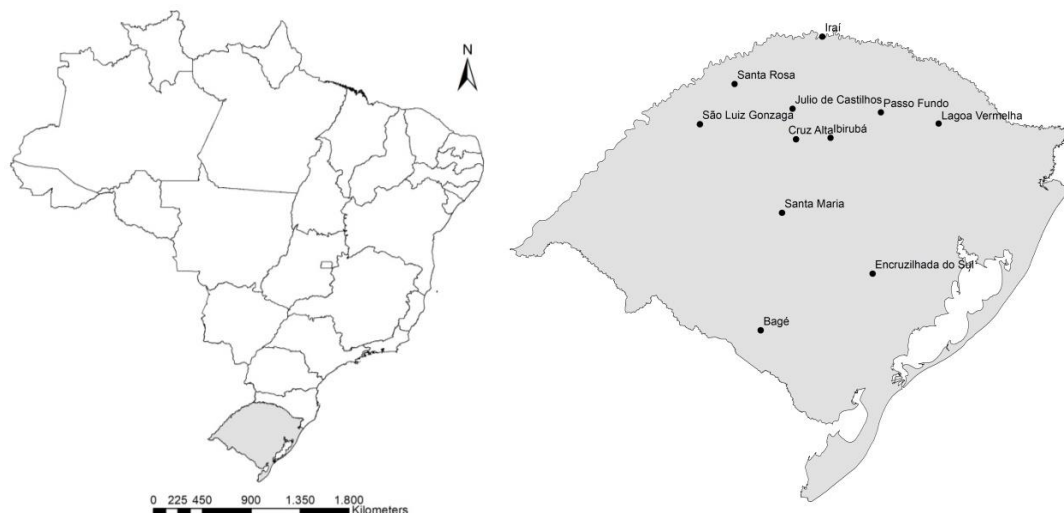


Figura 1. Localização do Estado do Rio Grande do Sul - Brasil e distribuição das estações meteorológicas consideradas nas análises no Estado.

Métodos de validação foram aplicados para identificar dados errôneos de medições dos sensores meteorológicos (Estévez et al. 2011). As análises foram baseadas em três classes de testes de consistência: *range test*, *step test* e *internal consistency test* (Tabela 1). A qualidade dos dados meteorológicos foi examinada em busca de *'outliers'* quando comparados a outros anos e aos observados em estações vizinhas. Por inspeção visual não encontramos quaisquer *outliers* após os testes estatísticos (Tabela 1) serem aplicados aos conjuntos de dados. Com base nas regiões climáticas do Estado do Rio Grande do Sul (Maluf & Caiaffo, 2001) e nas zonas climáticas homogêneas descritas por van Wart et al. (2013), a densidade da rede de estações meteorológicas utilizada proporcionou uma cobertura adequada para o estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 1. Procedimentos de controle de qualidade de dados aplicados à rede de estações meteorológicas do Rio Grande do Sul.

Métodos de validação	Temperatura do ar (°C)	Precipitação (mm)
Range test	-30 < Tmax;Tm;Tmin < 50 (Shafer et al., 2000)	0 ≤ P ≤ P _{HIGH}
	T _{LOW} < Tmax;Tm;Tmin < T _{HIGH} (AEMET, 2008)	
Step test	Tm – Tm _(d-1) < 25 (WMO, 2008)	Não aplicado
Internal consistency test	Tmax _(d) > Tm _(d) > Tmin _(d) ; Tmax _(d) > Tm _(d-1) ; Tm _(d) ≤ Tmax _(d-1) (Reek et al., 1992; Feng et al., 2004)	Não aplicado

Tm: temperatura média diária (°C); Tmax: temperatura máxima diária (°C); Tmin: temperatura mínima diária (°C); T_{LOW}: temperatura mínima absoluta (°C) and T_{HIGH}: temperatura máxima absoluta (°C); P: precipitação diária (mm); P_{HIGH}: precipitação máxima absoluta (mm); d e (d-1) significam dia e dia anterior.

As anomalias da temperatura da superfície do Oceano Pacífico Tropical, referentes aos trimestres Outubro-Novembro-Dezembro (OND) à Março-Abril-Maio (MAM) de cada ano/safra, foram obtidas da Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (NOAA, 2018).

O solo típico de cada local (Figura 1) foi definido com base em referências, descrevendo a taxonomia do solo, características do perfil, granulometria e densidade do solo (Tabela 2 e Tabela 3). A partir de dados de conteúdo de areia, silte e argila, densidade do solo e profundidade dos horizontes A e B do solo – perfil ocupado pelo sistema radicular (Z) da soja, limitando a 1,2 m, a disponibilidade máxima de água (θ_{AW}) foi calculada por meio de funções de pedotransferência (Reichert et al. 2009) (Equações 1, 2 e 3):

$$\theta_{fc} = 0,037 + 0,38(\text{argila} + \text{silte}) \quad (1)$$

$$\theta_{pwp} = 0,236 + 0,045 \text{ argila} - 0,21 \text{ areia} \quad (2)$$

$$\theta_{AW} = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) Z ds \quad (3)$$

Onde θ_{cc} é a umidade do solo em capacidade de campo (kg kg^{-1}); θ_{pmp} é a umidade do solo em ponto de murcha permanente (kg kg^{-1}); conteúdo de argila, silte e areia (kg kg^{-1}); ds é a densidade do solo (kg m^{-3}); e θ_{AW} é a disponibilidade máxima de água (mm).

A partir de uma análise de agrupamentos realizada por Melo et al. (2004) com o método de Ward, utilizando a distância euclidiana e dados de 210 municípios de produção de soja no RS, os 11 locais (Figura 1) foram divididos em três Agrupamentos de acordo com a produtividade da soja (Mg ha^{-1}), produção de soja (toneladas) e dados de porcentagem de área

cultivada com soja (relação entre a área de soja e a área total do município) como: A – alta produtividade, B - média produtividade e C – baixa produtividade (Tabela 2).

Tabela 2. Locais, coordenada geográfica da estação meteorológica, agrupamento, classe de solo e fontes de informações.

Local	Lat (°)	Long (°)	Alt. (m)	Agrupamento	Classe de solo	Fontes inform.
Ibirubá	-28,61	-53,11	433,0	A	Latossolo vermelho	Divisão de Pedologia e Fertilidade do Solo. Ministério da Agricultura (1962); Pötter (1980)
Julio de Castilhos	-28,20	-53,65	440,0	A	Argissolo vermelho	Divisão de Pedologia e Fertilidade do Solo. Ministério da Agricultura (1962); Zalamena (2008)
Lagoa Vermelha	-28,41	-51,58	772,0	A	Latossolo Bruno à Roxo	Divisão de Pedologia e Fertilidade do Solo. Ministério da Agricultura (1962)
Passo Fundo	-28,25	-52,40	639,0	A	Latossolo bruno à roxo	Divisão de Pedologia e Fertilidade do Solo. Ministério da Agricultura (1962); Vieira and Klein (2007)
Cruz Alta	-28,63	-53,60	429,0	B	Latossolo vermelho	Divisão de Pedologia e Fertilidade do Solo. Ministério da Agricultura (1962); Secco et al. (1997); Secco et al. (2004); Nunes and Cassol (2008); Genro Junior et al. (2009)
Iraí	-27,18	-53,23	262,0	B	Cambissolo	Cunha et al. (2010)
Santa Rosa	-27,85	-54,47	308,0	B	Latossolo vermelho	Nicoloso et al. (2008)
Bagé	-31,33	-54,10	215,0	C	Luvissolo	Macedo (1984); Giarola et al. (2002)
Encruzilhada do Sul	-30,53	-52,52	427,7	C	Argissolo vermelho-amarelo	Giarola et al. (2002); Cunha et al. (2005)
Santa Maria	-29,67	-53,80	191,0	C	Podzólico vermelho amarelo	Giarola et al. (2002); Reinert et al. (2008)
São Luiz Gonzaga	-28,42	-54,96	245,0	C	Latossolo vermelho	Divisão de Pedologia e Fertilidade do Solo. Ministério da Agricultura (1962)

Tabela 3. Local, frações de argila, silte e areia, densidade do solo (ds), profundidade máxima explorável do solo (Z), potencial hídrico na capacidade de campo (θ_{cc}) e em ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) e máxima disponibilidade de água (θ_{AW}).

Site	Clay (kg kg ⁻¹)	Silt (kg kg ⁻¹)	Sand (kg kg ⁻¹)	ds (kg m ⁻³)	Z (m)	θ_{cc} (kg kg ⁻¹)	θ_{pmp} (kg kg ⁻¹)	θ_{AW} (mm)
Ibirubá	0,560	0,240	0,200	1110	1,00	0,341	0,219	134,0
Júlio de Castilhos	0,330	0,200	0,470	1480	0,80	0,238	0,152	102,0
Lagoa Vermelha	0,736	0,210	0,046	1080	1,20	0,396	0,260	177,0
Passo Fundo	0,450	0,310	0,240	1430	1,20	0,326	0,206	206,0
Cruz Alta	0,477	0,173	0,350	1240	1,00	0,284	0,184	124,0
Iraí	0,200	0,420	0,372	1500	0,40	0,273	0,167	63,0
Santa Rosa	0,641	0,312	0,047	1430	1,00	0,399	0,255	206,0
Bagé	0,120	0,420	0,510	1370	0,40	0,242	0,134	59,0
Encruzilhada do Sul	0,298	0,260	0,441	1490	0,50	0,249	0,157	69,0
Santa Maria	0,140	0,300	0,560	1400	0,55	0,204	0,125	61,0
São Luiz Gonzaga	0,580	0,370	0,050	1430	0,80	0,398	0,252	167,0

2.2.2. 'Boundary function' para análises de lacunas de produtividade da soja

Para identificar a lacuna de produtividade da soja, uma 'boundary function' (Equação 4) foi ajustada, relacionando a produtividade e a precipitação total no ciclo de produção (van Ittersum et al. 2013). Zanon et al. (2016) obtiveram uma 'boundary function' para Rio Grande do Sul a partir de dados de produção experimental e a disponibilidade sazonal de água, para soja irrigada e de sequeiro cultivadas durante quatro safras no estado. Essa função foi adotada e considerada como um rendimento atingível (Y_w) porque o limite superior de produtividade correspondeu a aqueles obtidos para as dez cultivares mais produtivas em cada colheita e local (2008/09 a 2016/17) relatado pelo ensaio nacional de cultivares de soja (ECR 2017).

$$Y_w = a + b [1 - \exp(-cx)] \quad (4)$$

onde x é a disponibilidade hídrica sazonal (precipitação, mm) e a, b e c são parâmetros do modelo.

Em relação aos 11 locais, um tratamento prévio dos dados de produtividade da soja teve que ser feito. O melhoramento genético e as práticas agrícolas ao longo dos 25 anos, em média causaram um aumento anual de 52,9 kg ha⁻¹ de soja no RS (CONAB, 2018). Assim foi necessário corrigir estatisticamente a série temporal de produção de soja a fim de remover esses fatores e isolar a ação do clima. Portanto, a tendência de incremento da produtividade da soja foi removida usando regressão linear (Goldblum, 2009).

2.2.3. Balanço hídrico da soja

Como uma análise complementar para definir o papel da água na cultura da soja, foram ajustadas as relações entre a produtividade da soja e o déficit hídrico, integrando características do solo e da planta e dados climáticos considerando o El Niño, La Niña ou condição de Neutralidade. Por meio dessa metodologia, cada unidade de déficit hídrico foi avaliada para diferentes agrupamentos de produção. Para contabilizar o déficit hídrico, os balanços hídricos (BH) foram calculados usando o conceito de Thornthwaite & Mather (1955). O máximo de água disponível (θ_{AW}) refletiu a simulação de profundidade do sistema radicular (RSD), considerando, portanto, a disponibilidade máxima de água [CAD_r (%)] para cada subperíodo de desenvolvimento da soja (Tabela 4).

Tabela 4. Subperíodos de desenvolvimento (Fehr e Caviness 1977), tempo médio por subperíodo (dias) e conteúdo relativo de água em relação à capacidade máxima de água disponível no solo (CAD_r) para a cultura da soja.

Subperíodo de desenvolvimento	Dias ¹	CAD_r (%)
Estabelecimento (S-V1)	15	30
Vegetativo (V2-R1)	40	75
Floração/Formação dos grãos (R1-R5.5)	35	90
Maturação (R6-R8)	30	100

¹Battisti (2013)

Para cada local e ano/safra (Figura 1) foram calculados três balanços hídricos de cultura, em escala diária, considerando as seguintes datas de semeadura: 15 de outubro, 15 de novembro e 15 de dezembro, recomendados pelo MAPA (2018). Para representar as cultivares do grupo de maturidade relativa 5-6, recomendados para a macrorregião 1 da soja (microrregiões 101, 102 e 103), foi fixado um ciclo de 120 dias (Alliprandini et al. 2009, MAPA, 2018).

A evapotranspiração da soja (ET_c) foi calculada multiplicando a evapotranspiração de referência (ET_o) (Hargreaves e Samani 1985, Eq 5) pelo coeficiente de cultura (K_c). O K_c acompanhou o desenvolvimento da soja (Martorano 2007) (Eq.6):

$$ET_o = 0,0023 \left(\frac{Q_o}{2,45} \right) (T_{max} - T_{min})^{-0,5} (T_m + 17,8) \quad (5)$$

onde $Q_o/2,45$ é a radiação solar extraterrestre ($mm \text{ dia}^{-1}$); T_{max} é a temperatura máxima do ar ($^{\circ}C$); T_{min} é a temperatura mínima do ar ($^{\circ}C$); T_m é a temperatura média do ar ($^{\circ}C$).

$$K_c = -0,0001(DAE)^2 + 0,0168(DAE) + 0,4269 \quad (6)$$

onde DAE significa dias após a emergência da planta.

As análises estatísticas de comparação de médias foram realizadas usando o teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

2.3. Resultados e discussão

Os dados de temperatura do ar não foram analisados em relação aos fenômenos El Niño, La Niña ou condição neutra (Tabela 5, Figura 2). Uma análise simples e comparativa apresenta as nuances térmicas entre os locais a fim de identificar sua influência na evapotranspiração da soja e conseqüentemente nos resultados do balanço hídrico e produtividade da cultura.

De outubro a janeiro, enquanto as lavouras de soja estão predominantemente em estágios de desenvolvimento vegetativo, além das diferenças térmicas entre os locais, essencialmente devido ao relevo, o Rio Grande do Sul também apresenta um gradiente térmico distinto (Tabela 5 e Figura 2). Os sítios do Cluster A (Ibirubá, Júlio de Castilhos, Lagoa Vermelha e Passo Fundo), áreas de cultivo com maior altitude e menor temperatura do ar RS, são os que apresentam menor incremento térmico temporal. Dessa forma, essas áreas parecem não ser termicamente adequadas para a soja, visto que a faixa de temperatura ótima para o cultivo da soja está entre 20 e 30°C (Silva et al., 2015). No entanto, há uma aparente inconsistência, visto que esses são os locais de maior produtividade de soja do RS.

Essa questão foi avaliada por Melo et al. (2004) enfatizando que em locais do Cluster A a condição térmica poderia restringir o desenvolvimento da soja por conta da redução da estação de crescimento da cultura. Segundo autores, a temperatura do ar parece ter maior influência no ciclo da cultura do que na produtividade final de grãos. Portanto, nesses locais a data de semeadura deve ser bem ajustada para aproveitar o clima, utilizando variedades precoces adaptadas às condições térmicas. Isso foi apresentado por Melo et al. (2004) e Nória Júnior et al. (2020) que também apontam o risco de ocorrência de eventos de baixa temperatura e geada tardia, coincidindo com a fase vegetativa devido a uma possível antecipação da semeadura para setembro.

Além disso, sobre os efeitos do ENOS na temperatura do ar no Rio Grande do Sul, Puchalsky (2000), Berlato & Althaus (2010) e Cordeiro et al. (2016) descrevem que há uma maior influência do La Niña, quando são registrados os menores valores médios de temperatura mínima. Este distúrbio ENSO é muito importante para locais de altitude mais elevada (Cluster A) devido aos riscos aumentados de geada tardia para a cultura da soja. O El Niño, por outro lado, aumenta a nebulosidade e a precipitação (Fontana e Berlato, 1997; Berlato e Fontana, 2003;

Custódio et al., 2009) interferindo no balanço das ondas longas, reduzindo as perdas e portanto elevando a temperatura mínima.

Tabela 5. Temperatura mínima absoluta (T_{LOW} , °C), temperatura máxima absoluta (T_{HIGH} , °C), temperatura média (T_m , °C) para cada sítio. Dados provenientes de longas séries de observações meteorológicas.

Site	Agrupamento	T_{LOW} (°C)	T_{HIGH} (°C)	T_m (°C)
Ibirubá	A	-4,0	40,6	18,7
Júlio de Castilhos	A	-5,8	38,4	18,5
Lagoa Vermelha	A	-5,3	34,2	17,3
Passo Fundo	A	-3,5	36,3	18,0
Cruz Alta	B	-3,0	37,5	18,8
Iraí	B	-5,3	39,2	20,4
Santa Rosa	B	-4,6	40,1	20,8
Bagé	C	-3,9	39,9	17,7
Encruzilhada Do Sul	C	-4,0	40,6	17,3
Santa Maria	C	-2,9	40,2	19,4
São Luiz Gonzaga	C	-1,8	39,9	20,9

Períodos das séries de dados: Santa Rosa (1922-1949); Julio de Catilhos (1915-1949), outros locais (1981-2010).

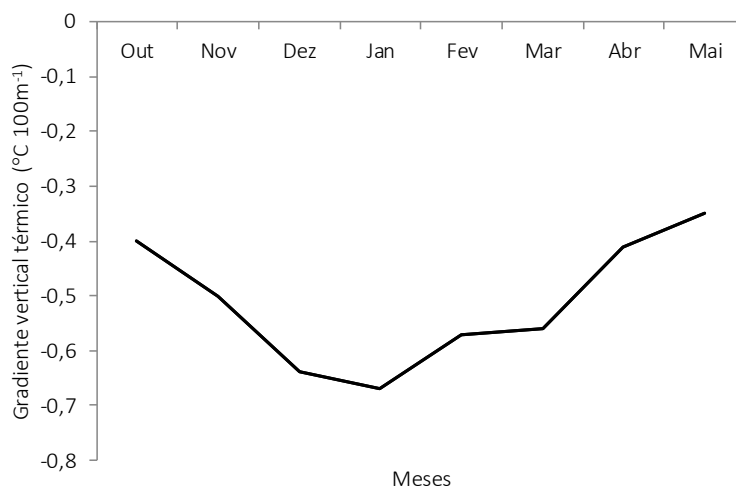


Figura 2. Gradiente térmico vertical (°C 100m⁻¹) de outubro a maio entre todas as estações meteorológicas.

Na região norte do RS, onde se concentra a maior parte da área de produção de soja do estado, como o agrupamento A, há solos predominantemente argilosos, com horizontes profundos A e B com pelo menos 0,8m, resultando em disponibilidade máxima de água variando de 102 a 206 mm (Tabela 3). Nos sítios do Cluster B, os solos são argilosos e também mais profundos, exceto Iraí (Tabela 3).

Os locais dos agrupamentos A e B diferem principalmente pela altitude e temperatura do ar (Tabela 2). Conforme destacado anteriormente (Tabela 5, Figura 2) os locais em A (maior altitude) possuem temperatura mais baixa que os locais em B, uma questão importante em relação à evapotranspiração da soja, que é minimizada, reduzindo as ocorrências de deficiência hídrica e assim, favorecendo a produção (Pilau et al. ., 2018).

Os locais do agrupamento C estão em áreas de solos menos argilosos e também mais rasos, com menor capacidade de retenção de água (Tabela 3). Além disso, representam as áreas de baixa altitude e altas temperaturas (T_{HIGH}) do Rio Grande do Sul (Figura 2). Nestes locais, como uma amostra de como o ENOS pode influenciar, com base na temperatura média mensal ao longo da safra de soja, a literatura mostra que na região central do Estado (Santa Maria, ver Fig. 1) a taxa de evaporação classe A do tanque (ECA) e umidade do ar (UR) são fortemente influenciadas pelo ENOS (Streck et al., 2008). Esses autores encontraram valores mais baixos de ECA e valores mais altos de UR durante os anos de El Niño, e valores mais altos de ECA e valores mais baixos de UR durante os anos de La Niña.

Embora os resultados possam contradizer os aspectos térmicos descritos por Puchalsky (2000) sobre a influência do ENOS, esses resultados também estão ligados à nebulosidade e ao número de dias chuvosos, ambos com desvios positivos nos anos de El Niño em relação a neutralidade, o que geralmente resulta em ganho de produtividade sob El Niño e perdas de rendimento sob La Niña (Berlato e Fontana, 1999).

Além disso, Gelcer et al. (2013) através do Índice de Referência Agrícola para Seca (ARID) e Cordeiro et al (2018) usando a evapotranspiração relativa (taxa de evapotranspiração real/potencial) descreveram a influência do ENOS para o Rio Grande do Sul, mostrando eventos El Niño determinando menor estresse hídrico, e o contrário para eventos La Niña. Eles também mostraram que no sul do estado (representado por Bagé e Encruzilhada do Sul na Figura 1), houve uma maior frequência de eventos de estresse hídrico, principalmente de novembro a janeiro durante eventos La Niña. Esses resultados corroboram a falta de disponibilidade hídrica no sul do estado para as safras de sequeiro de primavera-verão, que podem ser utilizadas para subsidiar decisões de manejo de safras baseadas em previsões de El Niño ou La Niña.

Em síntese, nossos resultados em conjunto com a literatura mostram que o fenômeno ENOS também pode ter influência na condição térmica da atmosfera, influenciando principalmente no consumo de água das lavouras de primavera-verão no estado (Tabela 5; Figura 2). Ainda assim, considerando que a precipitação média durante a primavera e verão no Rio Grande do Sul é geralmente insuficiente para atender às necessidades de água da soja (Ávila et al. 1996), a redução das taxas de evapotranspiração observada principalmente nas estações El Niño (Gelcer et al. ., 2013; Cordeiro et al., 2018) pode favorecer a cultura.

Em relação às precipitações no RS, as influências do fenômeno ENOS coincidem principalmente com a safra da soja no estado (Tabela 6). O primeiro momento de interferência da fase quente, El Niño, é no final do ano do fenômeno, principalmente durante o trimestre OND com repique no final do verão - outono do ano seguinte (+) (MAM). Para os anos La Niña, há dois eventos coincidentes com os da fase quente (Matzenauer et al. 2017). A primeira, de outubro a novembro (OND), coincidindo com a semeadura e o desenvolvimento vegetativo da soja, podendo prejudicar a semeadura, retardando o estabelecimento da cultura. O segundo está relacionado ao aumento da frequência e intensidade das precipitações de abril a junho (MAM), o que pode favorecer ou prejudicar a produtividade e o andamento da colheita.

Em relação às 25 safras consideradas em nosso estudo (Tabela 6), oito foram classificadas como Neutras, nove como El Niño e oito como fases La Niña. Para a anomalia do El Niño, destacaram-se dois anos/safras: 1997/1998 (ΔT_{avg} 1,9°C) e 2015/16 (ΔT_{avg} 2,1°C). A precipitação acumulada ultrapassou 1000 mm no ciclo da cultura, não diferindo entre os agrupamentos. Sob a influência de um El Niño fraco, a temporada de 1994/95 foi a única a mostrar diferença estatística de precipitação acumulada entre os agrupamentos, mantendo a similaridade entre os agrupamentos A e B com maior precipitação acumulada, mas não diferindo B de C.

Para La Niña, apenas dois casos foram diferentes entre os agrupamentos. Em 2008/09 (La Niña fraca), o agrupamento C teve menor precipitação do que o agrupamento A. Em 2010/11 (La Niña moderada), novamente os locais do agrupamento C se destacaram negativamente, porém diferindo do agrupamento B em vez de A (Tabela 6). Nenhum ano/safra teve diferença estatística de precipitação entre os agrupamentos A, B e C (Tabela 5) com condição Neutra.

Os resultados (Tabela 6) concordam com Matzenauer et al. (2017), identificando maiores volumes de chuvas no norte e noroeste do RS, onde se configuram os agrupamentos A e B, principalmente nos meses de primavera. Da mesma forma, o centro-sul do RS (agrupamento C), sob a influência de La Niña, teve menor precipitação também no mesmo período do ano (Grimm et al. 1998; Grimm et al. 2000). É importante destacar que, embora a precipitação média seja menor durante a La Niña, houve vários anos em que a precipitação foi menor durante a fase Neutra (Tabela 6).

Dados recentes mostram que distintos tipos de ENOS influenciam os campos atmosféricos de forma diferente. O sul do Brasil apresenta anomalias positivas de precipitação durante o El Niño Oriental (EEN), e que não ocorrem no El Niño Central (CEN) (Tedeschi et al. 2015). Além disso, as mudanças relacionadas ao ENOS na frequência de eventos extremos de chuva são geralmente coerentes com as mudanças nas quantidades totais de chuva mensal. No

entanto, mudanças significativas em extremos são muito mais extensas do que as mudanças correspondentes na precipitação mensal, porque a maior sensibilidade ao ENOS parece estar na faixa extrema da precipitação diária, afetando especialmente bacias com predominância de áreas agrícolas (Chagas e Chaffe 2018).

Sobre a fase La Niña, Grimm et al. (2000) relataram seca predominante em novembro sobre o sul do Brasil, desencadeando déficit hídrico na época de semeadura da soja, enquanto em dezembro e janeiro as chuvas são quase normais. As anomalias negativas retornam em fevereiro (Grimm e Tedeschi 2008), desta vez coincidindo com os estádios de floração / formação de vagens e grãos de soja.

Tabela 6. Anomalia da temperatura da superfície do Oceano Pacífico Tropical de outubro-novembro-dezembro (OND) a março-abril-maio (MAM), valor médio da anomalia da temperatura da superfície do Oceano Pacífico Tropical (T_{avg}), descrição do fenômeno e precipitação média durante a safra de soja para cada agrupamento (A, B e C).

Safra	Anomalia temperatura oceano (°C)						ΔT_{avg} (°C)	Fenômeno	Precipitação (mm)		
	OND	NDJ	DJF	JFM	FMA	MAM			Agrup. A	Agrup. B	Agrup. C
1991/92	1,2	1,6	1,7	1,6	1,5	1,3	1,5	El Niño	587,35a	663,78a	664,88a
1992/93	-0,3	0,1	0,1	0,3	0,5	0,7	0,2	Neutral	680,55a	589,69a	629,37a
1993/94	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1	Neutral	658,92a	722,64a	752,25a
1994/95	1,0	1,1	1,0	0,7	0,5	0,3	0,8	El Niño	833,42a	713,99ab	583,37b
1995/96	-1,0	-1,0	-0,9	-0,8	-0,6	-0,4	-0,8	La Niña	650,73a	585,33a	644,99a
1996/97	-0,4	-0,5	-0,5	-0,4	-0,1	0,3	-0,3	Neutral	581,91a	581,46a	516,10a
1997/98	2,4	2,4	2,2	1,9	1,4	1,0	1,9	El Niño	1024,15a	1083,12a	1161,51a
1998/99	-1,5	-1,6	-1,5	-1,3	-1,1	-1,0	-1,3	La Niña	538,69a	454,99a	461,59a
1999/00	-1,5	-1,7	-1,7	-1,4	-1,1	-0,8	-1,4	La Niña	639,15a	521,01a	499,52a
2000/01	-0,7	-0,7	-0,7	-0,5	-0,4	-0,3	-0,6	La Niña	676,08a	674,58a	690,68a
2001/02	-0,3	-0,3	-0,1	0,0	0,1	0,2	-0,1	Neutral	572,11a	445,11a	557,77a
2002/03	1,3	1,1	0,9	0,6	0,4	0,0	0,7	El Niño	915,77a	988,99a	961,49a
2003/04	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	Neutral	713,33a	676,21a	617,63a
2004/05	0,7	0,7	0,6	0,6	0,4	0,4	0,6	El Niño	457,39a	448,32a	420,13a
2005/06	-0,6	-0,8	-0,8	0,7	-0,5	-0,3	-0,4	Neutral	557,98a	506,28a	426,94a
2006/07	0,9	0,9	0,7	0,3	0,0	-0,2	0,4	El Niño	724,41a	628,42a	702,76a
2007/08	-1,5	-1,6	-1,6	-1,4	-1,2	-0,9	-1,4	La Niña	638,68a	526,69a	453,82a
2008/09	-0,6	-0,7	-0,8	-0,7	-0,5	-0,2	-0,6	La Niña	566,51a	530,56ab	491,47b
2009/10	1,3	1,6	1,5	1,3	0,9	0,4	1,2	El Niño	1041,19a	809,80a	1093,33a
2010/11	-1,7	-1,6	-1,4	-1,1	-0,8	-0,6	-1,2	La Niña	618,77ab	790,94a	484,73b
2011/12	-1,1	-1,0	-0,8	-0,6	-0,5	-0,4	-0,7	La Niña	463,04a	366,10a	355,87a

2012/13	0,0	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,3	Neutral	786,15a	866,18a	667,39a
2013/14	-0,2	-0,3	-0,4	-0,4	-0,2	0,1	-0,2	Neutral	819,71a	654,17a	722,59a
2014/15	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,8	0,7	El Niño	959,22a	897,52a	834,05a
2015/16	2,5	2,6	2,5	2,2	1,7	1,0	2,1	El Niño	1011,58a	1194,84a	968,02a

Os valores nas linhas seguidas pela mesma letra não diferem significativamente a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

De acordo com os dados de precipitação média de cada agrupamento (Tabela 7), sob condição Neutra ou influência do ENOS, a precipitação no agrupamento A foi estatisticamente diferente de acordo com a fase do ENOS. Para o La Niña foi 8% menor do que em condições Neutras, apesar da igualdade estatística entre os dados, e 31% menor do que a média para o El Niño.

Os resultados do agrupamento B apresentaram a mesma descrição estatística do agrupamento A (Tabela 7), com precipitação média ao longo do ciclo da soja muito semelhante para cada condição climática. Para o agrupamento C, as análises estatísticas apontaram dados de precipitação para o El Niño superiores e distintos das outras duas condições.

Esses resultados (Tabelas 6 e 7) corroboram com a distribuição espacial reportada por Fontana & Berlato (1997) para o RS, destacando a porção oeste como a mais afetada, com reduções de 80 a 120 mm na maior parte do estado. As diferenças aumentam na direção leste-oeste também evidenciando o efeito do El Niño na temperatura do ar, precipitação e produtividade da soja (Iizumi et al. 2014).

Os resultados também mostraram que as maiores precipitações acumuladas nos anos de El Niño estão nas regiões Norte e Nordeste (Cruz Alta, Ibirubá, Lagoa Vermelha, Júlio de Castilhos e Passo Fundo), posição geográfica do agrupamento A. Dados de menor precipitação aparecem nas áreas do Noroeste e Planalto Superior, parte da Depressão Central e da Campanha e ao extremo oeste no Vale Baixo do Uruguai. Volumes ainda menores cobrem uma parte oriental do estado no Litoral Norte passando pela região da Depressão Central (Santa Maria – agrupamento C), a região Sudeste (Encruzilhada do Sul – agrupamento C), avançando em direção à região da Campanha (Bagé - agrupamento C) (Matzenauer et al. 2017).

A partir dos dados de precipitação média de cada agrupamento (Tabela 7) é definido que, em condição neutra, a precipitação total (dentro do período de produção de soja) é maior no agrupamento A do que em B e C (estatisticamente não definidos), e que sob a influência de El Niño tem valores muito mais próximos. Portanto, os locais B e C parecem ser mais beneficiados pelo fenômeno (Figura 3). Mesmo assim, o déficit hídrico é menor nos locais do agrupamento A, basicamente devido ao solo (retenção de água) (Tabela 3) e à temperatura do ar (mais adequado ao cultivo) (Figura 2). Sob eventos La Niña, os locais dos agrupamentos B e C

novamente parecem ser mais vulneráveis a mudanças, naqueles casos com sinais negativos, porque a precipitação total na época de produção de soja permanece abaixo do agrupamento A (Tabela 7).

Nossos resultados concordam com Grimm et al. (2000) ao destacar o Sul do Brasil, e principalmente o estado do Rio Grande do Sul, como a região com o sinal mais forte no evento El Niño no Sul da América do Sul (Tabela 6; Tabela 7). Durante esses eventos, as anomalias de precipitação são consistentemente positivas de novembro do ano de evento quente (El Niño) até fevereiro do ano seguinte, o que também foi enfatizado por Grimm et al. (1998) e Matzenauer et al (2017). No Rio Grande do Sul, em média, há mais precipitação nos eventos El Niño, menos nos eventos La Niña e quantidade intermediária em anos Neutros (Tabela 7) para todos os agrupamentos, apesar da precipitação média acumulada para Neutro e La Niña serem estatisticamente iguais. Ao longo da estação de cultivo da soja, os episódios de El Niño e La Niña têm impactos amplos e consistentes sobre as chuvas e foram em geral estatisticamente significativos durante novembro (Pscheidt & Grimm 2009).

Apesar das diferenças em precipitação e deficiência hídrica média, nesse caso considerando os solos de cada agrupamento, em relação às fases ENSO, os resultados mostraram que não houve diferença significativa do rendimento médio de grãos de soja, removido o incremento por tendência tecnológica, na comparação entre os eventos ENSO (Tabela 7). Em relação aos dados de produtividade média o mesmo foi verificado por Matzenauer et al. (2018).

Tabela 7. Valores médios de precipitação, deficiência hídrica e produção de soja de acordo com as fases ENSO nos agrupamentos A, B e C.

Fase	Precipitação (mm)	Deficiência hídrica (mm)	Produtividade (Mg ha ⁻¹)
Cluster A			
Neutro	705,76ab	96,83a	2,83a
La Niña	579,94b	117,81a	2,72a
El Niño	840,13a	86,40a	3,03a
Cluster B			
Neutro	656,18ab	192,92ab	2,31a
La Niña	550,72b	243,99a	2,19a
El Niño	839,35a	171,18b	2,53a
Cluster C			
Neutro	630,81b	241,54ab	1,87a

La Niña	501,07b	289,37a	1,69a
El Niño	850,77a	192,24b	1,91a

Os valores nas colunas seguidas pela mesma letra não diferem significativamente a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Além das diferenças estatísticas das precipitações nas safras da soja, foram observadas diferenças entre os dados pluviométricos em relação a uma mesma condição de acordo com a intensidade do fenômeno ENOS (Tabela 6). A relação entre precipitação acumulada e ΔT_{avg} para cada agrupamento mostra a influência distinta do fenômeno devido à sua intensidade (Figura 3). Coeficientes lineares indicam precipitação média para condição de neutralidade de 702 mm para o agrupamento A, 672 mm para o agrupamento B e 648 mm para o agrupamento C, todos abaixo dos 800 mm necessários para maximizar o rendimento da soja com base no atendimento total da necessidade de água (Figura 4).

Os resultados exaltam ainda mais a La Niña, especialmente importante devido ao seu efeito negativo (Figura 3). Os coeficientes angulares do ajuste linear (Figura 3) os distinguem entre os agrupamentos. Os locais do agrupamento A confirmam ser os menos influenciados pelo ENOS, devido à maior estabilidade da disponibilidade de água para a cultura da soja. Por outro lado, os locais do agrupamento C ($\pm 158 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1}$) são os mais perturbados, caracterizando-os com maior risco climático de perda de produtividade (MAPA 2018). A associação de solos com maior disponibilidade hídrica (Tabela 3) e temperatura mais baixa (Figura 2) reduz o consumo de água da soja, resultando em menores valores de deficiência hídrica (Tabela 7). Portanto, na maioria dos anos/safra de soja, mesmo com totais de precipitação próximas aos locais dos agrupamentos B e C especialmente em condição neutra (Tabela 7), o agrupamento A parece ser o mais adequado e de menor risco para a produção de soja no RS (Figura 3).

Além do tipo de solo (devido à disponibilidade máxima de água - O_{AW}) (Tabela 3), uma questão importante relacionada ao aumento/diminuição da precipitação em relação ao ΔT_{avg} (Figura 3) é a capacidade de drenagem da água (não apresentada). Esta última questão é extremamente importante em áreas do agrupamento C, como Bagé, Encruzilhada do Sul e Santa Maria, onde os solos apresentam drenagem limitada com lençol freático muito superficial. Como esses locais são altamente influenciados pela fase positiva do ENOS (El Niño) (Figura 3), muitas vezes com chuvas intensas acima do normal (Tabela 5), essas áreas são mais suscetíveis a danos não só por deficiência hídrica, mas também causados por inundações (Zanon et al., 2015).

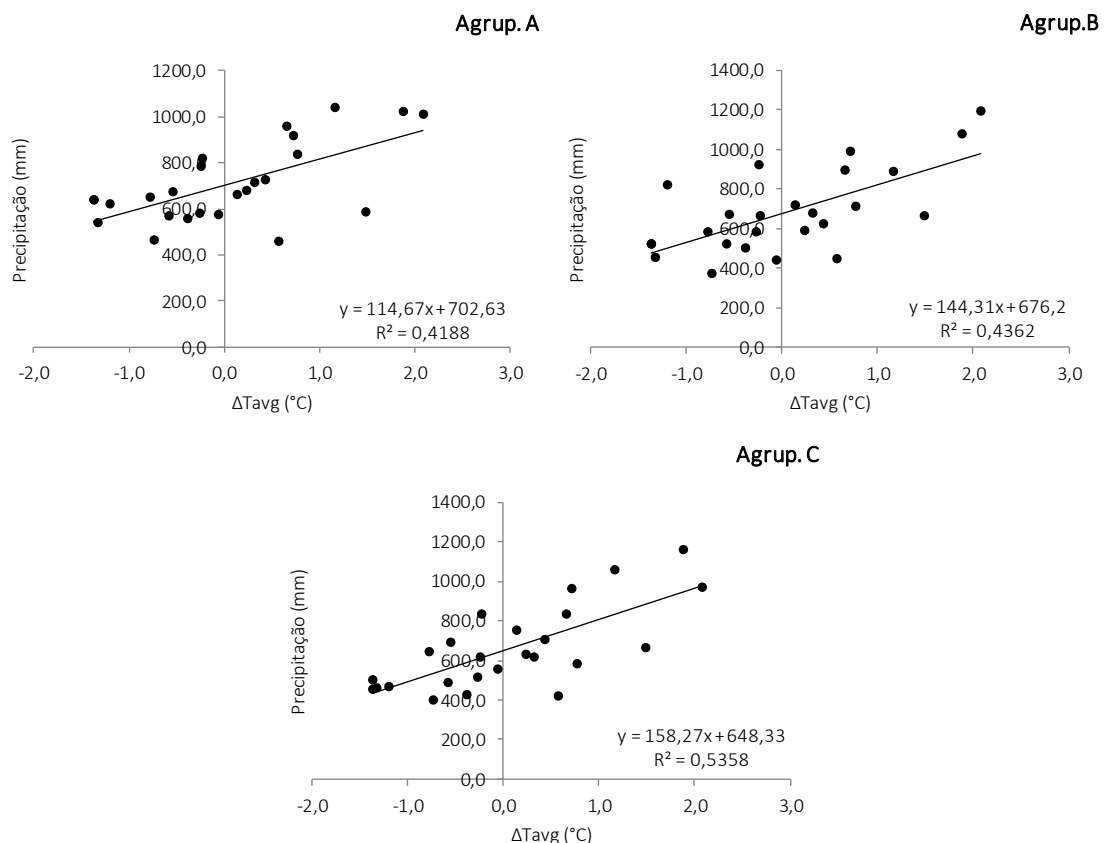


Figura 3. Relação entre a precipitação média acumulada (mm) e o desvio médio da temperatura da superfície do Oceano Pacífico Equatorial Central (°C) (estações OND à MAM).

Uma *'boundary function'* relacionando a produtividade da soja e a precipitação (Figura 4) exibe o limite de 800 mm para incrementos de produtividade. Então, tomando esse limiar, de acordo com ajustes lineares (Figura 3) em todos os locais, essa condição só é alcançada sob a influência do El Niño. Assim, o limiar de 800 mm só é alcançado com um ΔT_{avg} de pelo menos $+0,85^{\circ}\text{C}$ em comparação com os agrupamentos A e B e de $+0,95^{\circ}\text{C}$ para o agrupamento C.

Da mesma forma, Zanon et al. (2016) não observaram nenhum aumento na produção além de 800 mm de chuva, com $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ sendo o ponto máximo de Ya. Isso foi consolidado por dados experimentais de ensaios de campo (Figura 4), onde a produtividade da soja variou de 0,3 a $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$. Para o Cinturão do Milho dos EUA, Grassini et al. (2015) não encontraram nenhum aumento de rendimento além dos 650 mm, pois isso deve ser suficiente para satisfazer os requisitos de água da cultura para os maiores rendimentos em tais condições climáticas.

A *'boundary function'* sugerida por Zanon et al. (2016) teve um declive (produtividade atingível) de $9,1 \text{ kg grão mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$, maior do que a média de $6,1 \text{ kg grão mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ de dados municipais de produtividade de soja (Figura 4). Diferença praticamente igual foi observada ao analisar os $9,9 \text{ kg mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ determinados por Grassini et al. (2015). Em relação ao intercepto x de 183 mm também descrito por Zanon et al. (2016), a *'boundary function'* ajustada indicou

maior consumo de água através da evaporação sazonal, de 255 mm (cerca de 40% maior). Em comparação com a interceptação $x = 73$ mm para o cinturão do milho dos EUA (Grassini et al. 2015), Zanon et al. (2016) também expõe uma quantidade média sazonal de evaporação do solo muito maior para o RS.

Portanto, de acordo com o abastecimento de água sazonal (limite de 800 mm) e rendimento atingível máximo de grãos ($\sim 6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$), na macroanálise - escala municipal, haveria uma lacuna de produtividade de soja de $1,88 \text{ Mg ha}^{-1}$ no RS, que expõe diferenças de manejo e tecnologias empregadas na produção da soja.

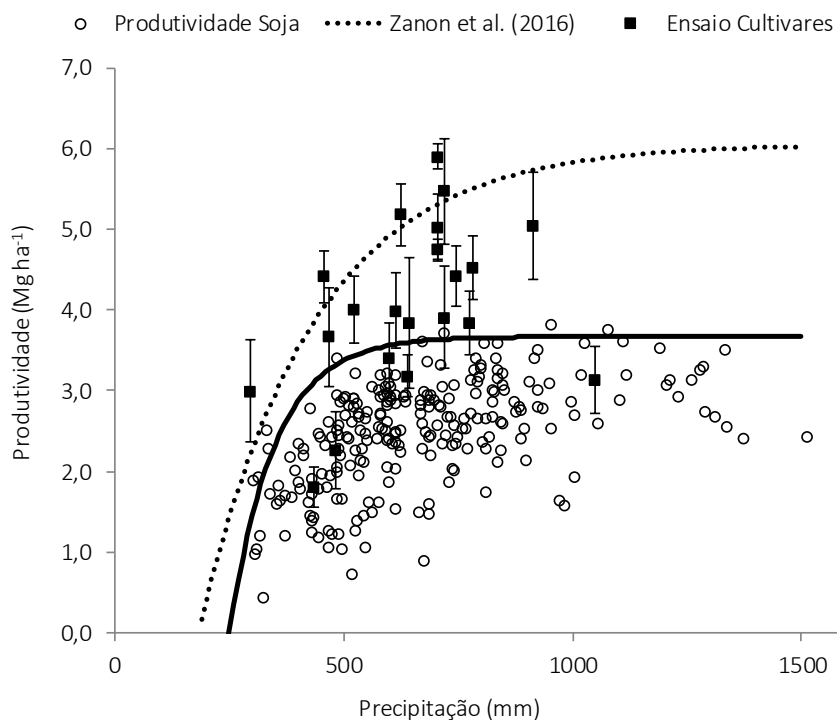


Figura 4. Correlação entre a produtividade da soja e a precipitação, *'boundary layer'* para produtividade atingível (Y_w) e dados de produtividade de soja de ensaios de cultivares.

Com base nos 800 mm encontrados como limiar (Figura 4), pode-se inferir que 80,8% dos anos/safras foram limitados por água (88% dos anos neutros e 94% dos anos de La Niña) (Tabela 6 e Figura 4).

Os resultados em relação à El Niño (61%) (Tabela 6) destacam que, mesmo diante de um fenômeno de grande escala, considerado geralmente positivo para a produção, pois traz aumentos pontuais das precipitações, muitas vezes há restrições para a cultura da soja, conforme descrito por Cirino et al. (2015). Da mesma forma, Calviño e Sadras (1999) indicaram que a disponibilidade de água estava limitando a produtividade agrícola em 54% dos anos nos pampas argentinos e também nas áreas de soja do RS, sugerindo que a rentabilidade desse

sistema de cultivo pode ser substancialmente aumentada com práticas e cultivares visando no aumento da água disponível e da eficiência do uso da água.

Conforme estabelecido por Purcell e Specht (2004), a disponibilidade de água para a planta não depende apenas da quantidade e distribuição temporal das precipitações e seus distúrbios causados por fenômenos como o ENSO (Figura 3), mas indiscutivelmente do tipo de solo – capacidade de armazenamento de água (Tabela 3), bem como o estágio de desenvolvimento da cultura e variação da energia disponível - radiação solar e temperatura. Todos esses mostram variabilidade natural, mesmo em pequenas extensões de terra. Considerando essas variáveis, o balanço hídrico pode disponibilizar a deficiência hídrica como um índice alternativo a ser correlacionado com a produção de soja (Figura 5).

Por meio da análise individual de cada local, o efeito combinado da precipitação + solo na produtividade da soja pode ser visto na Figura 5. Os ajustes lineares entre a produtividade da soja e o déficit hídrico podem apoiar a valoração da água a partir do coeficiente angular (a) e projetar a produtividade atingível (município) a partir do coeficiente linear (b). Embora no agrupamento A o déficit hídrico tenha sido inferior a 200 mm (Figura 5), os locais menos influenciados pelos fenômenos ENOS (Figura 3) e com alta retenção de água no solo (Tabela 3) (Júlio de Castilhos, Lagoa Vermelha, Passo Fundo e Ibirubá) apresentaram o maior custo com água ($-15,2 \text{ kg mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$). Esses locais foram incluídos nos de maior produtividade e produção do RS (Melo et al. 2004) e estavam na zona preferencial para a cultura da soja, quando analisados em relação à perda do potencial de produtividade por déficit hídrico (Cunha et al. 2001).

É clara a combinação do clima predisposto pelo fenômeno ENOS (Figura 3), aliado a solos menos adequados para o cultivo da soja (Tabela 3), que tornam os locais menos produtivos e, portanto, menos onerosos em relação à deficiência hídrica (Figura 5), deixando o agrupamento B com perda média de $-7,4 \text{ kg mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ e o agrupamento C com $-3,7 \text{ kg mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$.

A partir da identificação das colheitas correspondentes às condições meteorológicas Neutras, La Niña ou El Niño (Figura 5), é o El Niño que normalmente leva a ganhos de produtividade, principalmente em eventos extremos pelo aumento das precipitações (Figura 3) e assim atingindo o limite para maximizar o rendimento (Figura 4). A razão para a resposta positiva da produtividade da soja de sequeiro é que há um aumento nas precipitações em relação aos anos Neutros, que já são limitantes para atender às necessidades hídricas da lavoura, e aos anos La Niña, em que há uma condição ainda pior para a soja em termos de disponibilidade de água.

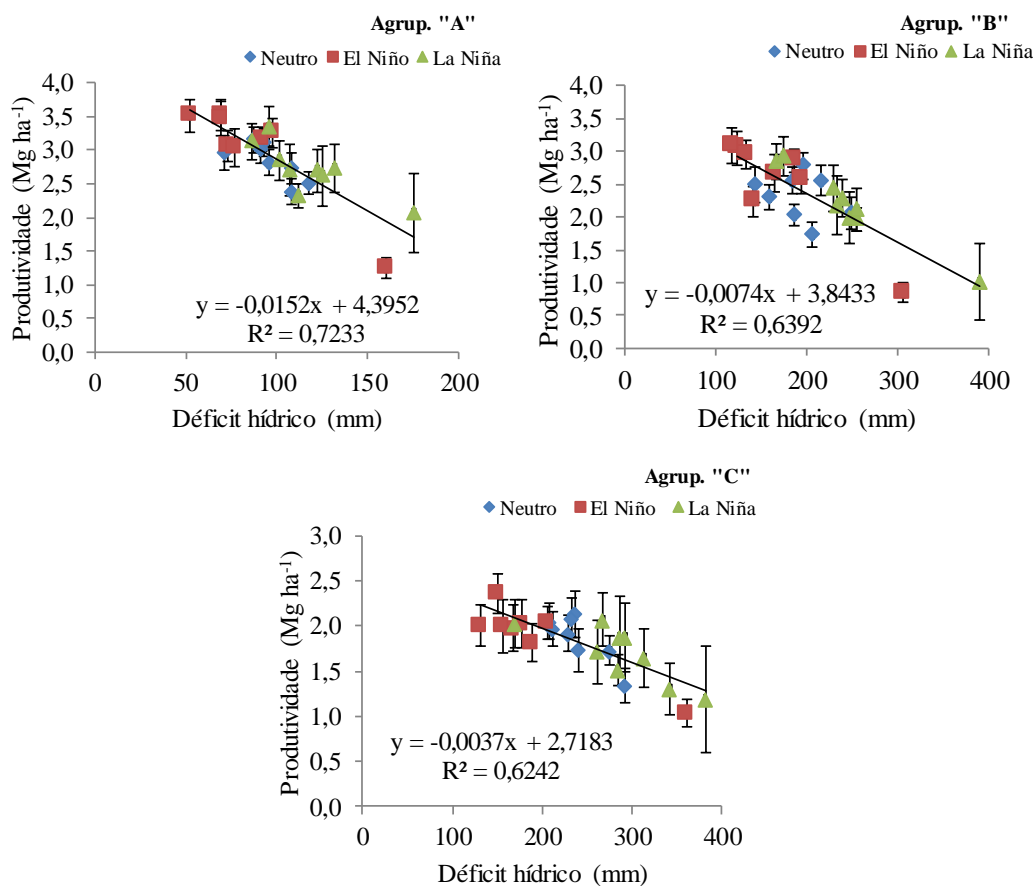


Figura 5. Relação entre a produtividade da soja e o déficit hídrico (mm) para as diferentes fases do ENOS (Neuro, El Niño e La Niña) para os Agrupamentos A, B e C.

2.4. Conclusões

Neste artigo, exploramos o papel do clima, ENOS e solos na produtividade da soja no sul do Brasil. Onze locais, distribuídos em três agrupamentos (A, B e C) apresentaram distinção de solo, principalmente devido à capacidade de retenção de água, geralmente maior no agrupamento A. Os dados diários de precipitação de 1991 a 2017, relativos aos meses de outubro a maio, nos ajudam a compreender a atuação do fenômeno ENOS no Rio Grande do Sul. Comparando locais em anos neutros, os agrupamentos B e C têm menos precipitação (em média -49 mm e -75 mm, respectivamente) do que o agrupamento A. Além disso, com precipitação semelhante entre agrupamentos sob El Niño e distinto (desvios negativos) sob a fase ENOS oposta, indicam locais dos agrupamentos B e C como mais seriamente perturbados pelo fenômeno ENOS. A relação entre a produtividade da soja e a precipitação para cada ano de produção de soja (1991 a 2017) e os locais apontaram a precipitação de 800 mm como necessária para maximizar a produtividade da soja. As diferenças entre a produtividade atingível (Y_w) e os rendimentos médios dos locais estabelecem quantitativamente a lacuna produtiva da

soja no RS, e destacam a variabilidade entre as regiões produtoras em termos de investimento, tecnologia e sistemas de cultivo. Uma relação inversa entre deficiência hídrica da soja e produtividade reforça a menor qualidade do solo para a produção de soja e os efeitos negativos ainda mais pronunciados em anos Neutros e de La Niña, com precipitação abaixo do necessário para garantir altos níveis de produtividade. Identificamos o agrupamento A como beneficiado pelo regime térmico afetando positivamente o crescimento, desenvolvimento e uso da água da soja. A tomada de decisões sobre políticas públicas e investimentos na indústria da soja pode se apoiar em nossos resultados, seja para reduzir a variabilidade temporal da produção na região e os riscos inerentes ao clima local.

2.5. Referências

AEMET (2008) Resumen de extremos climatológicos en España. <http://www.aemet.es/documentos/es/divulgacion/resumen_efemerides/Resumen_extremos.pdf. Accessed 02 March 2019

Alexandersson H (1986) A homogeneity test applied to precipitation data. **Journal of Climatology** 6:661-675.

Alliprandini LF, Abatti C, Bertagnolli PF, Cavassim JE, Gabe HL, Kurek A, Matsumoto MN, Oliveira MAR de, Pitol C, Prado C, Steckling C (2009) Understanding soybean maturity groups in Brazil: environment, cultivar classification, and stability. **Crop Science** 49:801-808. doi: 10.2135/cropsci2008.07.0390

Ávila AMH de, Berlato MA, Silva JB da, Fontana DC (1996). Probabilidade de ocorrência de precipitação pluvial mensal igual ou maior que a evapotranspiração potencial para a estação de crescimento das culturas de primavera-verão no estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha** 2(2):149-154.

Battisti, R. **Épocas de semeadura da cultura da soja com base no risco climático e na rentabilidade líquida para as principais regiões produtoras do Brasil**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

Battisti R, Sentelhas PC, Pilau FG, Wollmann CA (2013) Eficiência climática para as culturas da soja e do trigo no estado do Rio Grande do Sul em diferentes datas de semeadura. **Ciência Rural** 43:390-396. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782013000300003>

Battisti R, Sentelhas PC, Boote KJ (2018) Sensitivity and requirement of improvements of four soybean crop simulation models for climate change studies in Southern Brazil. **Int. Jour. of Biom** 62(5):823-832. <http://dx.doi.org/10.1007/s00484-017-1483-1>

- Berlato MA, Fontana DC (1999) Variabilidade interanual da precipitação pluvial e rendimento da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 7(1):119-125
- Berlato MA, Fontana DC (2003) El Niño e La Niña: Impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul: Aplicações de previsões climáticas na agricultura. UFRGS (ed)
- Calvino PA, Sadras VO (1999) Interannual variation in soybean yield: Interaction among rainfall, soil depth and crop management. **Field Crops Research** 63:237-246. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00040-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00040-4)
- Chagas VBP, Chaffe PLB (2018) The role of land cover in the propagation of rainfall into streamflow trends. **Water Resources Research** 54:5986-6004.
- Cirino PH, Féres JG, Braga MJ, Reis E (2015) Assessing the Impacts of ENSO-related weather effects on the Brazilian Agriculture. **Procedia Economics and Finance** 24:146-155. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)00635-8](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)00635-8)
- Conab - Companhia Nacional de Abastecimento (2018) Acomp. safra bras. grãos, v. 12 Safra 2017/18 - Décimo segundo levantamento, Brasília, 1-148, ISSN 2318-6852
- Conab - Companhia Nacional de Abastecimento (2019). Série Histórica das Safras. <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Accessed 6 May 2019.
- Cordeiro A P A, Berlato M A, Alves R de C M (2018). Tendência do índice hídrico sazonal do Rio Grande do Sul e sua relação com El Niño e La Niña. **Anuário do Instituto de Geociências** 41(3): 216-226. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_216_226
- Cunha GR, Haas JC, Dalmago GA, Pasinato A (1998) Perda de rendimento potencial em soja no Rio Grande do Sul por deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia** 6(1):111-119
- Cunha GR, Haas JC, Maluf JRT, Caramori PH, Assad ED, Braga HJ, Jullo Jr J, Lazzarotto C, Gonçalves S, Wrege M, Brunetta D, Dotto, SR, Pinto HS, Brunini O, Thomé VMR, Zampieri SL, Pasinato A, Pimentel MBM, Pandolfo C (2001) Zoneamento agrícola e época de semeadura para trigo no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia** 9:400-414
- Cunha NG da, Silveira RJ da C, Koester E, Oliveira LD de, Alba JMF, Costa FA da, Terres VC, Lopes RT (2010) Estudos de Solos do Município de Iraí. RS. Circular Técnica 104. Embrapa (ed) ISSN 1516-8832
- Cunha NG da, Silveira RJ da C, Severo CRS, Pinto LFS, Mendes RG, Silva JB da, Duarte LR, Schumacher RL (2005) Estudo de Solos do Município de Encruzilhada do Sul – RS. Circular Técnica 45. Embrapa (ed). ISSN 1516-8832
- Diniz F de A, Ramos AM, Rebello ERG (2018) Brazilian climate normals for 1981–2010. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 53(2):131-143. doi: 10.1590/S0100-204X2018000200001

Divisão de Pedologia e Fertilidade do Solo (1962) Ministério da Agricultura. Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul. Primeira etapa. Planalto Rio-grandense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 2:71-209

ECR (2017) Ensaio de Cultivares em Rede. <http://cultivares.com.br/cultivares2/cultivares.php>. Accessed 10 March 2018

Estévez J, Gavilán P, Giráldez JV (2011) Guidelines on validation procedures for meteorological data from automatic weather stations. **Journal of hydrology** 402(1-2):144-154.

Fehr WR, Caviness CE (1977) Stages of soybean development. Ames, Yowa: Yowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, 11 p. (Special Report, n. 80)

Feng S, Hu Q, Qian Q, (2004) Quality control of daily meteorological data in China, 1951–2000: a new dataset. **International Journal of Climatology** 24:853-870.

Fontana DC, Berlato MA (1997) Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia** 5(1):127-132.

Genro Junior AS, Reinert DJ, Reichert JM, Albuquerque JA (2009) Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. **Ciência Rural** 39(1):65-73. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782009000100011>

Giarola NFB, Silva AP, Imhoff S (2002) Relações entre propriedades físicas e características de solos da região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 26:885-893.

Giménez L, Paredes P, Pereira LS (2017) Water use and yield of soybean under various irrigation regimes and severe water stress. Application of AquaCrop and SIMDualKc Models. **Water** 9:393-411. <http://dx.doi.org/10.3390/w9060393>

Goldblum D, (2009) Sensitivity of Corn and Soybean Yield in Illinois to Air Temperature and Precipitation: The Potential Impact of Future Climate Change. **Physical Geography** 30(1):27-42.

Grassini P, Torrion J, Cassman K, Yang HS, Specht JE (2014) Drivers of spatial and temporal variation in soybean yield and irrigation requirements in the western US Corn Belt. **Field Crops Research** 163:32-46. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.04.005>

Grassini P, Torrion JA, Yang HS, Rees J, Andersen D, Cassman KG, Specht JE (2015) Soybean yield gaps and water productivity in the Western U.S. Corn Belt. **Field Crops Research** 179:150-163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2015.04.015>

Grimm AM (2004) How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil? **Climate Dynamics** 22, 123 – 138.

Grimm AM (2011) Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. **Stoch Environ Res Risk Assess** 25:537-554.

- Grimm AM, Ferraz SET, Gomes J (1998) Precipitation anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate** 11:2863-2880.
- Grimm AM, Tedeschi RG (2009) ENSO and Extreme Rainfall Events in South America. **Journal of Climate** 22:1589-1609.
- Grimm, AM, Barros VR, Doyle ME (2000) Climate variability in Southern South America associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate** 13:35-58.
- Hargreaves GH, Samani ZA (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture** 1(2):96-99
- Iizumi T, Luo JJ, Challinor AJ, Sakurai G, Yokozawa M, Sakuma H, Brown ME, Yamagata T (2014) Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops. **Nature Communications** 5(3712):1-7.
- Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet). Normais Climatológicas do Brasil 1981-2010. Edição digital. Brasília, 2018. 766p.
- Macedo W (1984). Levantamento de reconhecimento dos solos do Município de Bagé. Documentos. 1. EMBRAPA-UEPAE (ed).
- Machado FP (1950) Contribuição ao Estudo do Clima do Rio Grande do Sul. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Conselho Nacional de Geografia. Serviço Gráfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio De Janeiro. 91p.
- Maluf JRT, Caiaffo MRR (2001) Regiões ecoclimáticas do Estado do Rio Grande do Sul. In: Congresso Brasileiro De Agrometeorologia, 12. / Reunião Latino-Americana De Agrometeorologia, 3., 2001, Fortaleza. Água e agrometeorologia no novo milênio 151-152.
- MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2018). Portarias de zoneamento agrícola de risco climático. <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-seguro/risco-agropecuário/portarias/safra-vigente/rio-grande-do-sul>. Accessed 15 August 2018
- Martorano, LG. **Padrões de resposta da soja a condições hídricas do campo sistema solo-planta-atmosfera observados no campo e simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT**. 2007. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- Matzenauer R, Berlatto MA, Sampaio M dos R, Trindade JK da (2008). Efeitos do fenômeno Enos sobre a evapotranspiração de referência na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha** 14(1):67-70.
- Matzenauer R, Radin B, Maluf JRT (2017) O fenômeno ENSO e o regime de chuvas no Rio Grande do Sul. **Agrometeoros** 25(2):323-331

- Matzenauer, R, Radin, B, Cargnelutti Filho, A (2018). Rendimento de grãos de soja e de milho, no Rio Grande do Sul, não difere entre eventos El Niño Oscilação Sul. **Agrometeoros** 26(1):123-129. DOI: <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v26i1.26376>
- Melo RW de, Fontana DC, Berlato, MA (2004) Indicadores de produção de soja no Rio Grande do Sul comparados ao zoneamento agrícola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 39(12):1167-1175.
- Nicoloso R da S, Amado TJC, Schneider S, Lanzasova ME, Girardello VC, Bragagnolo JE (2008) Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:1723-1734. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000400037>
- Nielsen DC, Ma L, Ahuja LR, Hoogenboom G (2002) Simulating soybean water stress effects with RZWQM and CROPGRO models. **Agronomy Journal** 94:1234-1243
- NOAA (2018) National Weather Service. Cold & warm episodes by season. origin.pcp.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Accessed 26 April 2018
- Nunes MCM, Cassol EA (2008) Estimativa da erodibilidade em entressulcos de latossolos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:2839-2845. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000700030>
- Pötter RO, Hochmüller DP (1980) Levantamento detalhado de área piloto para conservação de solos no município de Ibirubá. RS. Rio de Janeiro. Boletim Técnico. 68. EMBRAPA/SNLCS (ed).
- Pscheidt I, Grimm AM (2009). Frequency of extreme rainfall events in Southern Brazil modulated by interannual and interdecadal variability. **International Journal of Climatology** 29:1988-2011.
- Purcell LC, Specht JE (2004) Physiological traits for ameliorating drought stress. In: Boerma HR, Specht JE (eds), Soybeans: Improvement, production, and uses, 3rd ed. Agron. Monogr. 16. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. pp 569-620. <http://dx.doi.org/10.2134/agronmonogr16.3ed.c12>
- Reek T, Doty SR, Owen TW (1992) A deterministic approach to the validation of historical daily temperature and precipitation data from the Cooperative Network. **Bulletin of the American Meteorological Society** 73:753-762.
- Reichert JM, Albuquerque JA, Kaiser DR, Reinert DJ, Urach FL, Carlesso R (2009) Estimation of water retention and availability in soil of Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 33:1547-1560. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000600004>
- Reinert DJ, Albuquerque JA, Reichert JM, Aita C, Andrada MMC (2008) Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:1805-1816. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000500002>

- Secco D, Da Ros CO, Fiorin JE, Pautz CV, Pasa L (1997) Efeito de sistemas de manejo nas propriedades físicas de um latossolo vermelho-escuro. **Ciência Rural** 27(1):57-60. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84781997000100011>
- Secco D, Reinert DJ, Reichert JM, Ros CO da (2004) Produtividade de soja e propriedades físicas de um latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 28:797-804. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000500001>
- Shafer MA, Fiebrich CA, Arndt DS, Fredrickson SE, Hughes TW, (2000) Quality assurance procedures in the Oklahoma Mesonet. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology** 17:474-494.
- Streck NA, Rosa HT, Walter LC, Bosco LC, Lago I, Heldwein AB (2008) O fenômeno El Niño Oscilação Sul e a variabilidade interanual da evaporação do tanque Classe A e da umidade relativa do ar em Santa Maria, RS. **Ciência Rural** (38)5:1452-1455.
- Tedeschi, RG, Grimm AM, Cavalcanti IFA, (2015) Influence of Central and East ENSO on extreme events of precipitation in South America during austral spring and summer. **International Journal of Climatology** 35:2045-2064.
- Thorntwaite CW, Mather JR (1955) The water balance. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology. Publications in Climatology, vol. VIII, n.1
- Van Ittersum MK, Cassman KG, Grassini P, Wolf J, Titttonell P, Hochmand Z (2013) Yield gap analysis with local to global relevance - A review. **Field Crops Research** 143:4-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
- Vieira ML, Klein VA (2007) Propriedades físico-hídricas de um latossolo vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 31:1271-1280. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000600006>
- World Meteorological Organization (2008) Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observations. WMO-No.8, Geneva, Switzerland.
- Zalamena, J. **Impacto do uso da terra nos atributos químicos e físicos de solos do rebordo do Planalto – RS**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2008.
- Zanon AJ, Streck NA, Grassini P (2016) Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal** 108(4):1447-1454. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2015.0535>
- Zanon, AJ, Winck, JEM, Streck, NA, Richter, GL, Rocha, TSM, Cera, JC (2015) Development of soybean cultivars as a function of maturation group and growth type in high lands and in lowlands. (In Portuguese, with English abstract.) **Bragantia** 74:400–411. doi:10.1590/1678-4499.0043

3. REQUERIMENTO DE IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR E EFICIÊNCIA CLIMÁTICA PARA A CULTURA DA SOJA NO RIO GRANDE DO SUL

Resumo

A variabilidade interanual da produção de soja no Rio Grande do Sul tem como principal causa a deficiência hídrica e a irrigação suplementar é uma das alternativas para estabilizar a produção. Assim, o objetivo deste trabalho foi quantificar a demanda de irrigação suplementar e a eficiência climática para a soja no estado do Rio Grande do Sul. A demanda de irrigação suplementar (NI, mm) foi quantificada a partir de balanços hídricos para 33 safras, datas de semeadura de 15/10, 15/11 e 15/12, e capacidade máxima de água disponível no solo (CAD) de 30mm, 50mm e 70mm para 10 locais, usados para extrapolar os resultados para o estado. As simulações consideraram ciclo de 120 dias entre semeadura e maturação. O limite de 50% da CAD foi utilizado como referencial para realizar a irrigação. Com o modelo da Zona Agroecológica foi determinada a eficiência climática com o uso da irrigação (ECI). A suplementação hídrica simulada manteve uma ECI mínima de 0,76. Para as principais zonas de produção as NI são menores para semeadura tardia. No cenário mais otimista, lavouras semeadas em 15/12, em solos com CAD de 70 mm, terão NI máximas de 160 mm em 75% dos anos.

Termos para indexação: *Glycine max*, déficit hídrico, data de semeadura, CAD do solo.

Abstract

The water deficit is the main cause of production variability between growing seasons in the state of Rio Grande do Sul, Brazil, and irrigation is an alternative to make the soybean production more stable. Thus, the aim of this research was to quantify the requirement of supplemental irrigation (IR) and climatic efficiency for soybean in the state of Rio Grande do Sul. The IR was quantified using water balance for 33 growing seasons, for sowing date at 15/Oct, 15/Nov and 15/Dec, and with a total soil water availability (TSW) of 30, 50 and 70 mm for 10 sites used to extrapolated results for the state. The simulations were performed considering a crop cycle of 120 days between sowing and maturity. The irrigation was applied when 50% of TSW has been reached. Agro-Ecological zone model was used to quantify the climatic efficiency under irrigation management (CEi). The use of IR keep CEi above 0.76. The IR were lower for later sowing dates for the main production regions in the state. In the best scenario, being sowing date in 15/Dec with TSW of 70 mm, the IR was higher than 160 mm for 75% of the growing seasons.

Keywords: *Glycine max*, water deficit, sowing date, total soil water availability.

3.1. Introdução

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, com 35 milhões de hectares e 119,3 milhões de toneladas produzidas na safra 2017/18 (Conab 2018). O estado do Rio Grande do Sul (RS) ocupa o terceiro lugar entre os estados produtores, responsável por 14,4% da soja brasileira (Conab 2018).

Apesar da aptidão climática à cultura da soja, o RS exibe uma marcante variabilidade interanual de produção (Cunha et al., 1998; Battisti et al., 2013). Conforme Ávila et al. (1996), a probabilidade da precipitação pluvial superar a evapotranspiração potencial nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, em praticamente todo o RS, é inferior a 60%, o que determina uma alta frequência de ocorrência de deficiências hídricas e consequentes quebras de safras das culturas de primavera-verão.

Intrínseco a isso, no Rio Grande do Sul, as condições meteorológicas são acentuadamente influenciadas por um fenômeno natural de escala global, que provoca alterações no clima no mundo inteiro, denominado de El Niño/Oscilação Sul (ENOS). No Estado, o fenômeno ENOS provoca, sobretudo, variabilidade na precipitação pluvial em relação à média climatológica, com desvios positivos em anos de El Niño, e negativos nos anos de La Niña (Fontana & Berlato, 1997).

As relações entre clima e planta, com ênfase no ENOS e cultura da soja, continuam sendo avaliadas. De forma geral aumentos pontuais de precipitação pluvial (El Niño) normalmente favorecem a cultura. Ao contrário, as estiagens em anos de La Niña provocam perdas produtivas consideráveis (Cunha et al., 1998; Berlato & Fontana, 1999). Estima-se que, para a soja, 93% das perdas na safra ocorram em razão do déficit hídrico (Berlato & Fontana, 2003).

De acordo com os dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2014), somente nas últimas dez safras de soja (2004/05 à 2013/14), aceitando como um potencial de produção a safra de 2010/11 (média de 2.845 kg ha^{-1}), o Rio Grande do Sul deixou de produzir 27,8 milhões de toneladas de soja. Isso, de acordo com a média anual de produção de soja desse mesmo período (9 milhões de toneladas ano⁻¹), representaria uma perda total de 3,1 safras, basicamente causadas por deficiência hídrica. Esses eventos ficam bem caracterizados por safras como as de 1990/91 (Matzenauer et al., 2002) e 2004/05, quando a produtividade média estadual foi de 720 kg ha^{-1} e 698 kg ha^{-1} de soja, respectivamente.

Neste contexto, a irrigação suplementar da soja no Rio Grande do Sul é uma prática fundamental para a estabilidade produtiva (Sentelhas et al., 2015; Battisti et al., 2018). Mota et al. (1996) fazem essa constatação a partir de balanços hídricos gerados para oito localidades, informação corroborada especificamente para as regiões das Missões e do Planalto Médio

(Franke & Dorfman, 1997; Franke & Dorfman, 2000; Vivan, 2010), e para os municípios de Santa Maria, Cruz Alta, Passo Fundo, São Luiz Gonzaga e São Borja, como representantes das regiões agroecológicas da Depressão Central, Planalto Inferior, Planalto Médio, Missões e Baixo Vale do Uruguai (Petry, 2004).

Com base no exposto, o objetivo do trabalho foi quantificar a necessidade de irrigação suplementar e seu efeito na eficiência climática da cultura da soja no Rio Grande do Sul, utilizando para isso os modelos propostos por Thornthwaite e Matter (1955) e Doorenbos & Kassam (1994).

3.2. Material e Métodos

Para estimar a necessidade de irrigação para a cultura da soja no estado do Rio Grande do Sul, foram utilizadas as séries de dados meteorológicos diários, coletados entre janeiro/1961 e março/2014 nas estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2014), em 10 municípios do Estado (Figura 1). Períodos com ausência ou dados inconsistentes foram desconsiderados (Tabela 1).

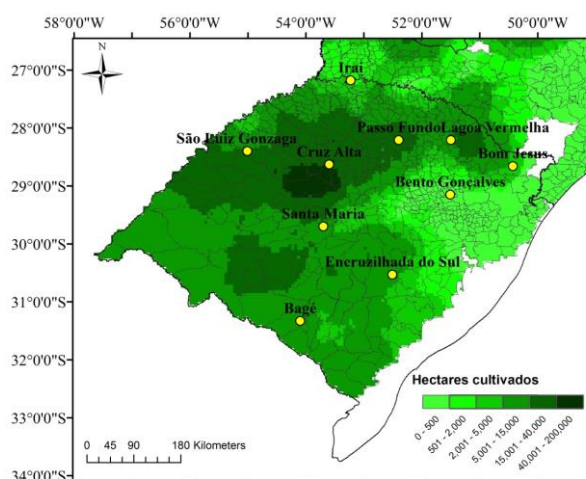


Figura 1. Localização geográfica das estações meteorológicas e área cultivada com a cultura da soja a nível municipal no estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 1. Estações e série de dados meteorológicos utilizados, em consonância às safras da cultura da soja no estado do Rio Grande do Sul.

Est. Meteor./ Total de safras	Safras	Est. Meteor. / Total de safras	Safras
Bagé / 33	1961-1977	Irai / 39	1961-1969
	1979-1983		1971-1977
	1991-1999		1979-1980
	2002-2013		1991-1999
	2002-2013		2002-2013
Bento Gonçalves / 39	1961-1983	Lagoa Vermelha / 30	1961-1969
	1988		1971-1977
	1994-1997		1984
	2002-2012		2001-2013
Bom Jesus / 34	1969-1978	Passo Fundo / 45	1961-1977
	1981-1982		1979-1983
	1991-1999		1988
	2001-2013		1991-1999
	2001-2013		2002-2013
Cruz Alta / 42	1961-1971	São Luiz Gonzaga / 39	1961-1978
	1973-1976		1991-1999
	1978-1980		2002-2013
	1982		1991-1999
	1988		2002-2013
	1991-1999		2002-2013
	2001-2013		2002-2013
Encruzilhada do Sul / 41	1962	Santa Maria / 38	1961-1966
	1964-1978		1968-1978
	1981-1982		1991-1999
	1988		1991-1999
	1991-1999		2002-2013
	2001-2013		2002-2013

Para determinar a necessidade e quantificar a lâmina de irrigação foram simulados balanços hídricos (BH) para a cultura da soja (Pereira et al., 2002). Nessas simulações, a irrigação foi efetivada sempre que o conteúdo de água disponível no solo alcançasse 50% da

capacidade máxima de água disponível no solo (CAD), ou seja, adotando-se um valor de Água Facilmente Disponível (AFD) de:

$$AFD = p \text{ CAD} \quad (1)$$

em que: $p = 0,5$ (Doorenbos & Kassam, 1994) e CAD é a capacidade máxima de água disponível no solo (mm).

Foram adotados três valores máximos de CAD para simular o BH, de 30 mm, 50 mm e 70 mm. Cada valor máximo de CAD foi, ao longo do ciclo da soja, corrigido conforme a estimativa de desenvolvimento e profundidade do sistema radicular (Tabela 2).

Tabela 2. Subperíodos de desenvolvimento, tempo médio por subperíodo, profundidade do sistema radicular (PSR) e conteúdo relativo de água em relação à capacidade máxima de água disponível no solo (CADr) para a cultura da soja.

Subperíodo de desenvolvimento	Dias ³	PSR (m)	CADr (%)
Estabelecimento (S-V1) ⁴	15	0,15 ¹	30
Vegetativo (V2-R1) ⁴	40	0,38 ²	75
Floração/Formação dos grãos (R1-R5.5) ⁴	35	0,45 ²	90
Maturação (R6-R8) ⁴	30	0,50 ²	100

¹Fietz & Rangel (2008); ²Estimado a partir da recomendação de Cunha et al. (2001) de crescimento exponencial, com crescimento até a fase de final enchimento de grão (R5.5), conforme apresentado por Neumaier et al. (2000); ³Battisti (2013). ⁴S é a semeadura, V1 é folhas unifolioladas completamente desenvolvidas, V2 é primeira folha trifoliolada completamente desenvolvida, R1 é o início do florescimento, R5.5 é o fim do enchimento do grão, R6 é grão cheio ou completo, e R8 é a maturação plena (Neumaier et al. (2000).

Para estimar a evapotranspiração de referência (ETo) foi usada a equação proposta por Priestley & Taylor (1972):

$$ETo = \frac{\alpha W(Rn-G)}{2,45} \quad (2)$$

em que: α é o parâmetro de Priestley & Taylor, igual a 1,26; Rn o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) obtido por Pilau et al. (2012); G o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), considerado zero neste caso; 2,45 é calor latente de vaporização da água (MJ kg^{-1}); W o fator de ponderação, função da temperatura média do ar (T , °C), obtido por:

$$W = 0,407 + 0,0147T; \text{ para } 0 < T < 16^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$W = 0,483 + 0,0100T; \text{ para } 16,1 < T < 32^\circ\text{C} \quad (4)$$

A partir da ETo e do coeficiente de cultura (Kc) foi determinada a evapotranspiração da cultura da soja (ETc). Os valores de Kc foram calculados em função do desenvolvimento da cultura (Martorano, 2007):

$$Kc = -0,0001(\text{DAE})^2 + 0,0168(\text{DAE}) + 0,4269 \quad (5)$$

em que: DAE significa dias após a emergência da cultura.

Para cada uma das 10 localidades (Tabela 1; Figura 1) foram anualmente simulados três balanços hídricos de cultura por CAD, em escala diária, considerando as datas de semeadura de 15 de outubro, 15 de novembro e 15 de dezembro, conforme indicação do zoneamento agrícola de risco climático da soja (MAPA, 2014). Para representar as cultivares dos grupos de maturação 5 e 6, indicados para a Macrorregião Sojícola 1 (microrregiões 101, 102 e 103, que compõem as áreas de produção do RS) (Embrapa, 2012), foi adotado um ciclo médio de 120 dias (Embrapa, 2010) (Tabela 1).

A irrigação foi considerada necessária sempre que, pelo BH, a água facilmente disponível do dia anterior (AFD_t) tivesse chegado próximo ao limite crítico, ou seja, $AFD \cong$ zero. Nesse caso a lâmina de irrigação foi calculada pela diferença entre a AFD e a AFD_t , obtendo-se a água facilmente disponível do próximo dia (AFD_i) (Pereira et al., 2002).

Após determinar a necessidade de irrigação (NI) para cada safra, data de semeadura e tipo de solo (CAD), foram definidos os limites dos percentis de 25 e 75. A partir dos dados de (NI), por análise de regressão múltipla, foram obtidas as equações para a realização da interpolação ao longo do estado com base nas estações disponíveis em função das variáveis de latitude, longitude e altitude:

$$NI = a + b\phi + c\lambda + d\xi + e\phi^2 + f\lambda^2 + g\xi^2 \quad (6)$$

em que: NI é a necessidade de irrigação da soja (mm); ϕ a latitude (graus e décimos); λ a longitude (graus e décimos); ξ a altitude (m); a é o ponto de intersecção e b, c, d, e, f e g são os coeficiente angulares de ajuste da equação. Os percentis de 25 e 75 representam o valor limite máximo de NI para 25% e 75% dos anos com menor e maior demanda de irrigação, respectivamente.

Com as equações de NI (equação 6), um SIG (ArcGIS) e modelos digitais de elevação para o RS (*Shuttle Radar Topography Mission* - SRTM), foram gerados os mapas de NI para o Rio Grande do Sul.

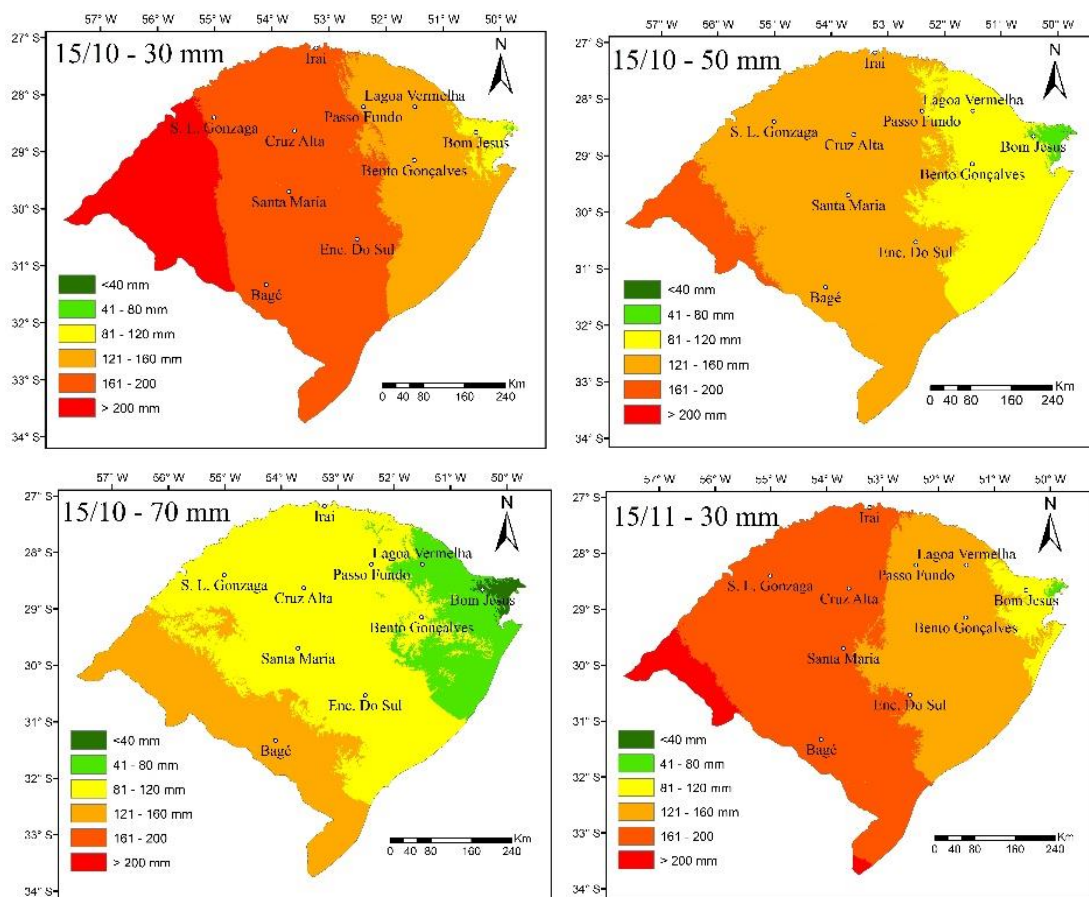
Para ponderar sobre a eficiência da referida proposta de determinação da NI na sustentação de um nível produtivo mínimo, a partir do modelo da Zona Agroecológica (Doorenbos & Kassam, 1994) calibrado (Battisti & Sentelhas, 2014), foram calculadas a produtividade potencial (PP) e a produtividade atingível (PA) com irrigação, para cada localidade e safras (Tabela 1), datas de semeadura e CADs. A partir da razão PA/PP foi determinada a eficiência climática acrescida de suplementação hídrica (ECI). A razão PA/PP foi lograda pela álgebra de mapas de PA e PP. Os mapas de PA e PP foram obtidos com equações de regressão múltipla, como segue, e mapas de elevação digital para o Rio Grande do Sul, da mesma forma que para a NI:

$$PA \text{ ou } PP = a + b\phi + c\lambda + d\xi + e\phi^2 + f\lambda^2 + g\xi^2 \quad (7)$$

onde: PA é a produtividade atingível com irrigação; PP é a produtividade potencial; ϕ a latitude (graus e décimos); λ a longitude (graus e décimos); ξ a altitude (m); a é o ponto de intersecção e b, c, d, e, f e g são os coeficiente angulares de ajuste da equação.

3.3. Resultados e Discussão

Para auxiliar no planejamento das lavouras de soja no Rio Grande do Sul, definida(s) a(s) CAD(s) do solo e a(s) época(s) de semeadura para cada localidade, tem-se disponível a necessidade de irrigação suplementar para a cultura da soja com foco nos percentis 25% e 75% (Figuras 2 e 3). Todas as regiões do Rio Grande do Sul exibem necessidade de irrigação suplementar, variável com data de semeadura e CAD do solo, mesmo restrito aos anos meteorologicamente mais favoráveis à cultura da soja (Figura 2).



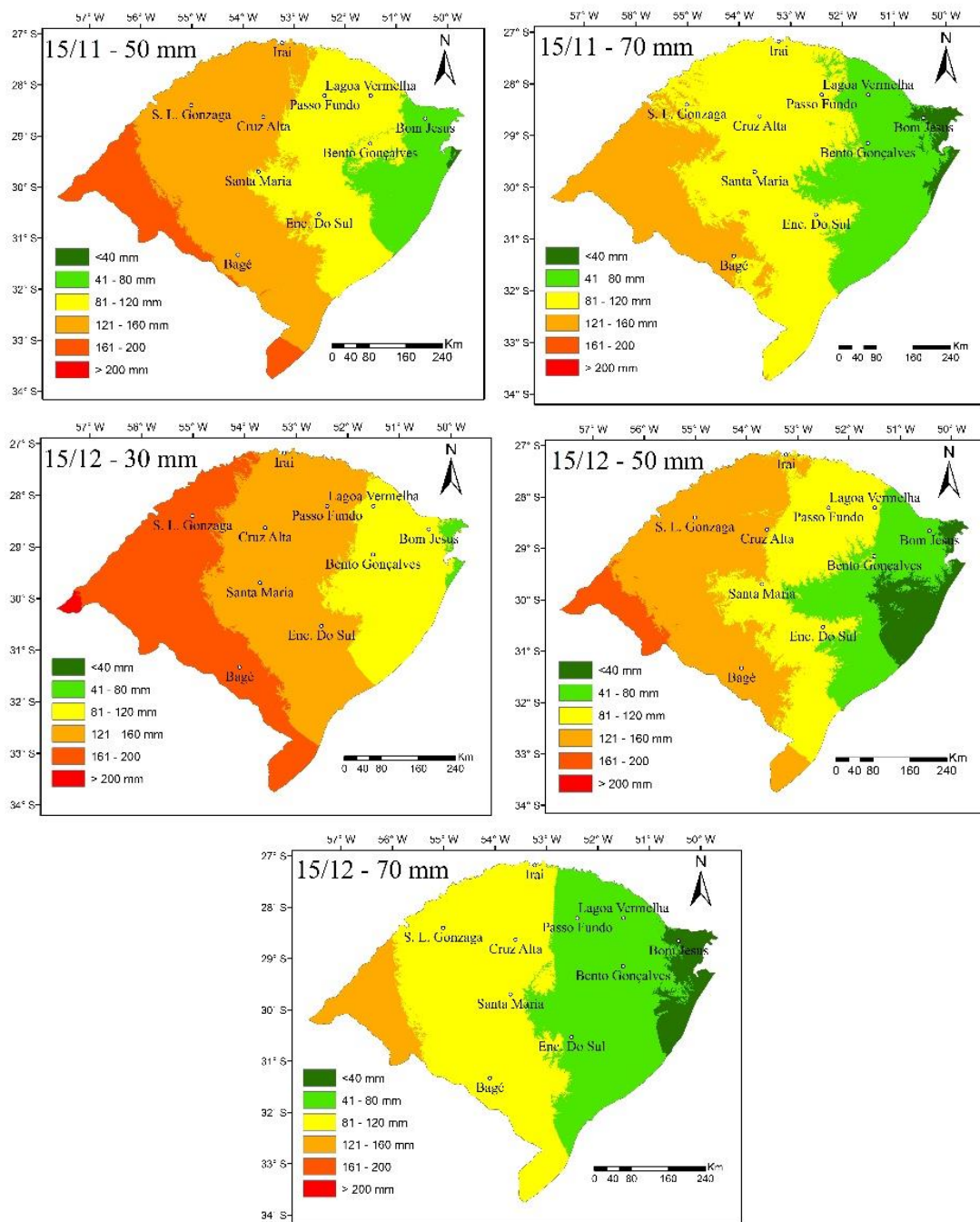
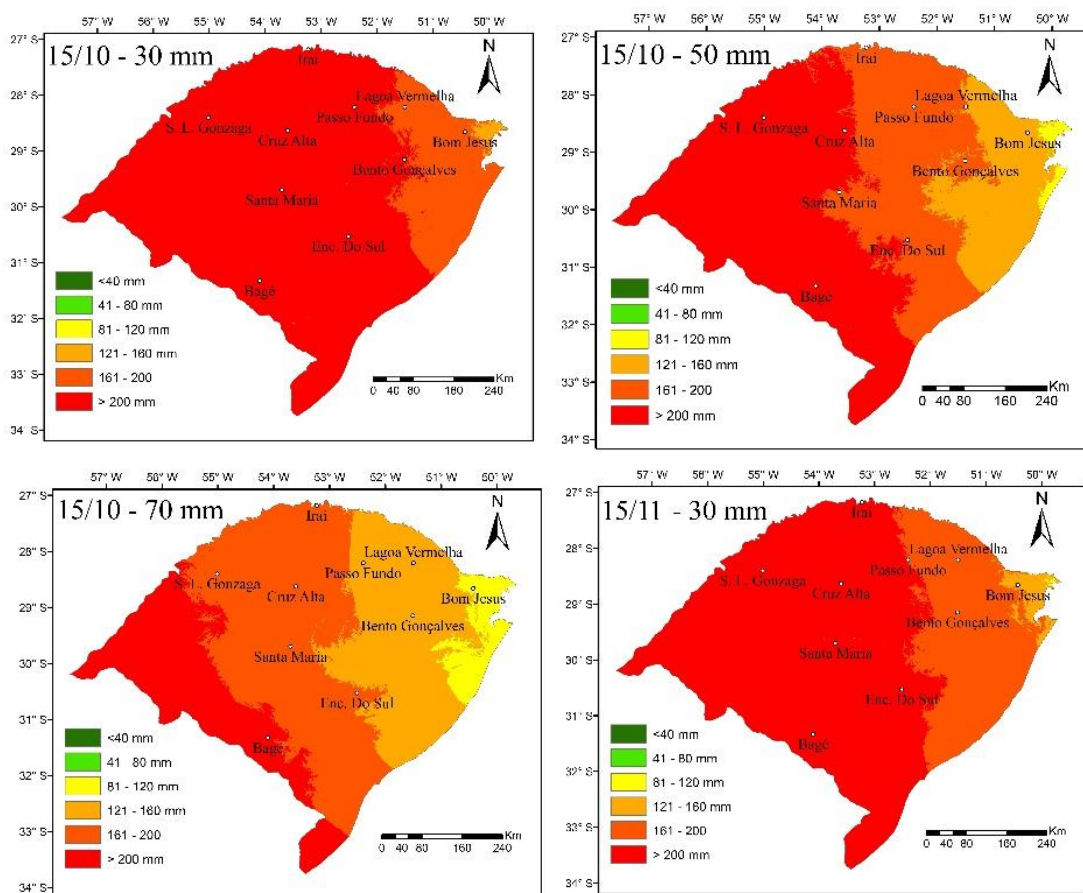


Figura 2. Necessidade de irrigação suplementar para a cultura da soja no estado do Rio Grande do Sul, referente 25º percentil, para as referidas datas de semeadura (15/10, 15/11 e 15/12) e capacidades máximas de água disponível no solo (CAD de 30 mm, 50 mm e 70 mm).

O Rio Grande do Sul exibe precipitação pluvial crescente de leste a oeste, com uma divisão latitudinal, próxima aos 30°, que delimita maiores acumulados anuais nas latitudes menores (Buriol et al, 2004). Acrescido a isso, Fontana & Berlato (1997) mencionam que, quando há influência do fenômeno La Niña, registram-se reduções de 80 a 120 mm sobre grande parte do Estado, de ordem crescente de leste para oeste nesses períodos, atenuando o

gradiente longitudinal. Além disso, a característica térmica do RS é condicionada pela latitude e altitude, demarcando decréscimos térmicos de norte para sul, fazendo da região nordeste a mais fria e, contrariamente, as áreas da depressão central e fronteira oeste as mais quentes do Estado (Brasil, 1992). Dessa forma, áreas da metade norte do RS, com exceção da região nordeste, mais quentes e com maior demanda atmosférica (ETo) têm os maiores volumes de chuva, enquanto mais ao sul do Estado, onde temperatura do ar e ETo são inferiores, tem-se também menores acumulados de chuva. Essas combinações térmicas e hídricas acabam amortecendo as diferenças latitudinais, deixando mais evidentes as divisões longitudinais que estratificam o Estado quanto às necessidades de irrigação suplementar à cultura da soja, com aumentos de leste para oeste (Figuras 2 e 3).



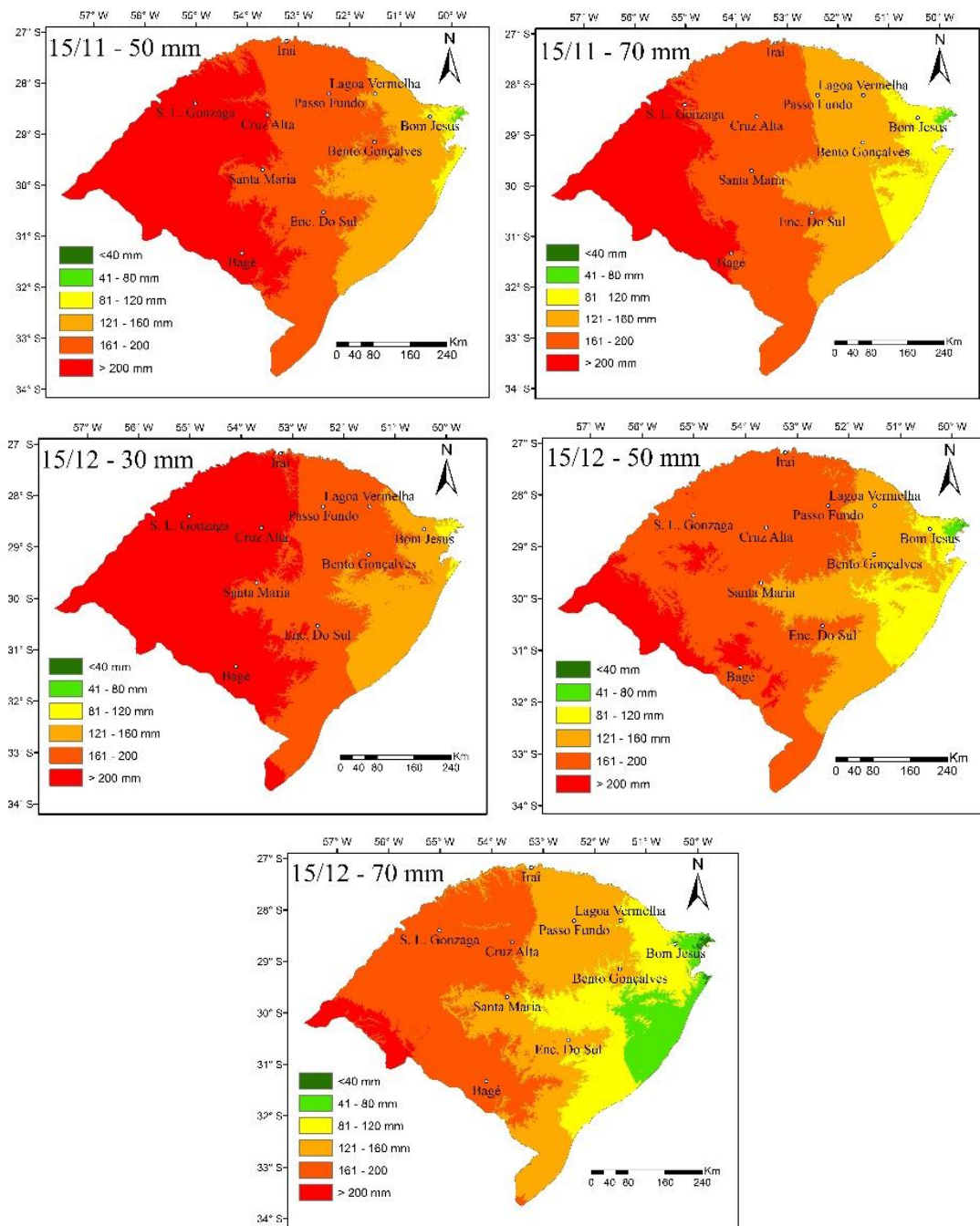


Figura 3. Necessidade de irrigação suplementar para a cultura da soja no estado do Rio Grande do Sul, referente 75° percentil, para as referidas datas de semeadura (15/10, 15/11 e 15/12) e capacidades máximas de água disponível no solo (CAD de 30 mm, 50 mm e 70 mm).

Para semeaduras feitas em 15/12, em solo com CAD de 30 mm, o RS apresenta três zonas longitudinais distintas em relação aos dados do percentil 25%. Uma região central, demandando de 121 a 160 mm e outra a oeste necessitando de 161 a 200 mm demarcam a maior parte das áreas de produção de soja do estado (Figuras 1 e 2). Para a mesma data, mas em solos com CAD de 50 mm, grande parte das áreas de produção necessitam menos de 120

mm, sobretudo em Passo Fundo, condição essa melhorada para CAD de 70 mm, com a quase totalidade necessitando também de menos de 120 mm (Figura 2).

Em relação às principais zonas de produção de soja do RS (Figura 1) e percentil 75%, mais uma vez a necessidade de irrigação diminui com o atraso da semeadura (Figura 3). Para semeaduras de 15/12, em solos com CAD de 70 mm, a suplementação hídrica é de 121 a 160 mm nas regiões de Passo Fundo, Lagoa Vermelha e Iraí, assim como em Santa Maria e Encruzilhada do Sul. Em direção ao oeste do RS a NI aumenta, superando os 160 mm nas regiões de Cruz Alta, São Luiz Gonzaga e Bagé (Figura 3).

Para lavouras também semeadas em 15/12, a NI passa dos 160 mm para as localidades previamente citadas, com exceção de Lagoa Vermelha, chegando aos 200 mm no oeste do Estado, quando a CAD é de 50mm. Resultados para CAD de 30 mm confirmam necessidade de irrigação suplementar ainda maior, podendo suplantar os 200 mm em praticamente toda a metade oeste do RS (Figura 3).

Nas principais áreas de produção de soja do RS (Figura 1), semeaduras realizadas em 15/10, em solo com CAD de 30 mm, teriam uma NI de mais de 200 mm (Figura 3). Para a mesma data, em solo com CAD de 50 mm, haveria a necessidade de mais de 200 mm na metade oeste do RS. Apenas as regiões de Passo Fundo, Iraí e proximidades de Santa Maria teriam demanda pouco menor, entre os 161 e 200 mm.

A diminuição da necessidade de irrigação a partir do atraso da semeadura também foi observada por Vivan (2010), especificamente para o Planalto Médio. Ao quantificar as diferenças em necessidade de irrigação entre datas de semeadura para os meses de outubro a dezembro, os resultados apontaram que áreas semeadas em 15/12 necessitam menor lâmina de irrigação suplementar (Figura 3) ao redor dos 170mm. Da mesma forma, Franke & Dorfman (2000) para as condições edafoclimáticas do Planalto Médio e Missões completam que as necessidades de irrigação suplementar foram máximas na semeadura de 15 de outubro, e os menores valores foram encontrados para 15 de dezembro, destacando ainda que as necessidades de irrigação suplementar foram maiores para áreas das Missões que para o Planalto Médio, em acordo com aumento longitudinal de leste para oeste do RS (Figuras 2 e 3). A coincidência da ocorrência do máximo índice de área foliar da soja, com a máxima demanda evaporativa da atmosfera em final de dezembro e início de janeiro, explica a maior parte da máxima necessidade de irrigação suplementar em semeaduras precoces.

Ao avaliarem a eficiência climática para a soja no RS, Battisti et al. (2013) verificaram que a produtividade atingível (PA) aumenta com o atraso da semeadura, de 01/10 até 21/12, um indicativo de que semeaduras tardias resultam em menores déficits hídricos e, portanto, menor necessidade de irrigação suplementar durante o ciclo da cultura.

Além disso, segundo Matzenauer et al. (2017) no RS os eventos ENOS tem maior influência nos meses de outubro a janeiro, coincidindo exatamente com a produção de soja no estado. De acordo com seus resultados, sob influência do fenômeno La Niña a precipitação pluvial média para o RS (1961-1990) apresenta-se crescente em relação as datas de semeadura de 15/10, 15/11 e 15/12. Totais nessa condição meteorológica são de aproximadamente 460mm, 490mm e 520mm, respectivamente. Sob efeito da fase ENOS oposta, de El Niño, para as mesmas datas, os resultados de Matzenauer et al. (2017) apontam para totais de chuva maiores, decrescendo com atraso da semeadura, de 630mm (15/10), 605mm (15/11) e 585mm (15/12). Mesmo nessa condição meteorológica mais favorável a precipitação pluvial acumulada é inferior aos 800 mm safra⁻¹ necessários para maximizar o rendimento da soja (Zanon et al., 2016). As diferenças entre o limite (800 mm) e os acumulados descritos por Matzenauer et al (2017), ainda que sucintamente relacionados a precipitação pluvial, corroboram para com a necessidade e lâminas de água suplementares à cultura da soja (Figuras 2 e 3).

Para a data de semeadura de 15 de outubro, têm-se a menor área com $ECl \geq 0,8$, delimitando o nordeste do Estado, onde as áreas e produção de soja são pequenas (Figuras 1 e 2). Todas as outras regiões do Rio Grande do Sul apresentaram uma ECI menor, mas acima dos 76%. O aumento das áreas com $ECl \geq 0,8$ coincidiu com o atraso da semeadura da cultura. Apesar disso, as principais áreas de produção do Estado seguiram com ECI entre 0,76 a 0,79.

Nessas áreas de produção pode-se elevar a ECI a partir de ajustes no manejo da irrigação. De acordo com Gava (2014), para soja, o déficit hídrico aplicado apenas no subperíodo de floração-formação do grão (R1-R5) afetou a produtividade tal como se o déficit tivesse ocorrido no ciclo todo, condição também observada por Dogan et al. (2007). Quando aplicado em subperíodos vegetativos ou de maturação, a escassez hídrica não reduziu a produtividade, comparativamente ao tratamento com irrigação plena. Portanto, mudanças no manejo da irrigação em relação à proposta de suplementação hídrica constituída, devem ser preferencialmente feitas para o subperíodo R1-R5 da cultura.

Cabe destacar que a produtividade atingível (PA), em $kg\ ha^{-1}$, não tem relação direta com os resultados decimais de ECI (Figura 2), pois a produtividade potencial (PP) é variável entre datas de semeadura e locais. Portanto, áreas com $ECl < 0,8$ poderão ter produtividade igual ou superior àquelas que apresentam índice ECI superior. Como média das datas de semeadura e CADs, a PP média é de $5314\ kg\ ha^{-1}$ e a PA média de $4230\ kg\ ha^{-1}$.

Mesmo em 25% dos anos, aqueles meteorologicamente mais favoráveis (Figura 2), há a necessidade de irrigação para soja no RS, a fim de se sustentar uma ECI de pelo menos 0,76 (Figura 4), independente da CAD, a partir o atraso da semeadura. Isso confirma que em anos neutros e de La Niña (Matzenauer et al., 2017) há a necessidade de irrigação suplementar à

cultura da soja, a qual será dispensada apenas em anos de El Niño, dependendo da intensidade do fenômeno.

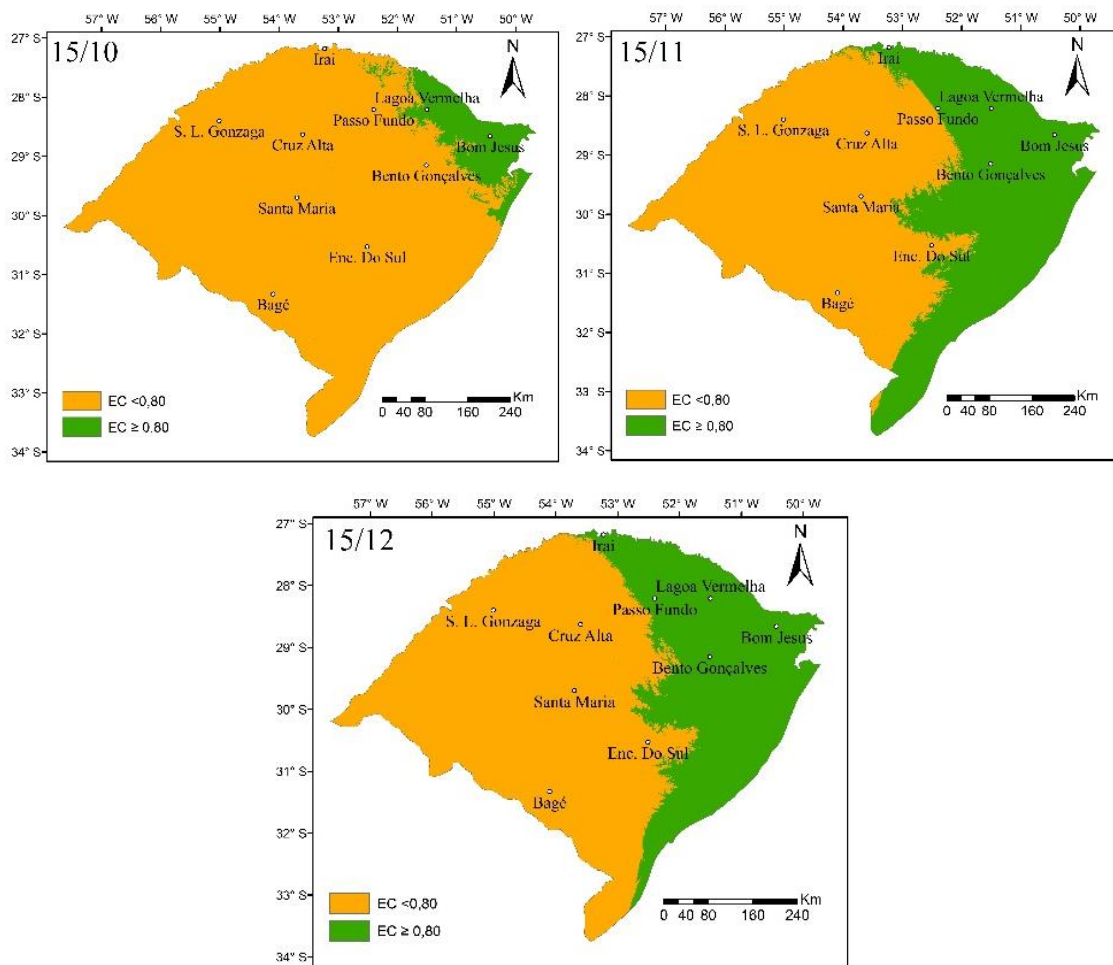


Figura 4. Eficiência climática para a cultura da soja com manejo de irrigação suplementar para as datas de semeadura de 15 de outubro (15/10), 15 de novembro (15/11) e 15 de dezembro (15/12).

3.4. Conclusões

Em função da climatologia do Rio Grande do Sul, a necessidade de irrigação suplementar para a cultura da soja apresenta variação espacial no sentido longitudinal, com aumento das lâminas de irrigação no sentido leste à oeste do Estado. Nos solos predominantemente utilizados para a produção de soja no RS (CAD de 70 mm), para que a irrigação suplementar possa ser plenamente executada em pelo menos 75% dos anos, são necessários de 121 mm a 200 mm safra⁻¹. O manejo proposto para irrigação suplementar mantém a eficiência climática em no mínimo 76%.

3.5. Referências

- Battisti R. **Épocas de semeadura da cultura da soja com base no risco climático e na rentabilidade líquida para as principais regiões produtoras do Brasil**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.
- Battisti R, Sentelhas PC (2014) Drought tolerance of brazilian soybean cultivars simulated by a simple agrometeorological yield model. **Experimental Agriculture** 51(2):285-298.
- Battisti R, Sentelhas PC, Parker PS, Nendel C, Câmara GMS, Farias JRB, Basso CJ (2018) Assessment of crop-management strategies to improve soybean resilience to climate change in Southern Brazil. **Crop & Pasture Science** 69:154-162.
- Battisti R, Sentelhas PC, Pilau FG (2012) Eficiência agrícola da produção de soja, milho e trigo no estado do Rio Grande do Sul entre 1980 e 2008. **Ciência Rural** 42:24-30.
- Battisti R, Sentelhas PC, Pilau FG, Wollmann CA (2013) Eficiência climática para as culturas da soja e do trigo no estado do Rio Grande do Sul em diferentes datas de semeadura. **Ciência Rural** 43:390-396.
- Berlato MA, Fontana DC (2003) El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul; aplicações de previsões climáticas na agricultura. Porto Alegre: UFRGS, 110p.
- Berlato MA, Fontana DC (1999) Variabilidade interanual da precipitação pluvial e rendimento da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia** 7(1):119-125.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária (MARA). Normais Climatológicas (1961-1990). Brasília, Brasil, 1992.
- Buriol GA, Estefanel V, Chagas AC De (2004) Distribuição geográfica da precipitação pluviométrica no estado do Rio Grande do Sul. **Vidya** 41:133-145.
- Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Safras: séries históricas. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 03 nov. 2014.
- Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Acomp. safra bras. grãos, v. 12 Safra 2017/18 - Décimo segundo levantamento, Brasília, 1-148, 2018. ISSN 2318-6852
- Cunha GR, Haas JC, Dalmago GA, Pasinato A (1998) Perda de rendimento potencial em soja no Rio Grande do Sul por deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia** 6(1):111-119.
- Cunha GR, Haas JC, Maluf JRT, Caramori PH, Assad ED, Braga HJ, Jullo Jr J, Lazzarotto C, Gonçalves S, Wrege M, Brunetta D, Dotto SR, Pinto HS, Brunini O, Thomé VMR, Zampieri SL, Pasinato A, Pimentel MBM, Pandolfo C (2001) Zoneamento agrícola e época de semeadura para trigo no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia** 9:400-414.

Dogan E, Kirnak H, Copur O (2007) Deficit irrigations during soybean reproductive stages and CROPGRO-Soybean simulations under semi-arid climatic conditions. **Field Crops Research** 103:154-159.

Doorenbos J, Kassam AM (1994) Efeito da água no rendimento das culturas. Estudos FAO – Irrigação e Drenagem n.33. 306p. (Traduzido por Gheyi, H.R. et al. – UFPB).

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Cultivares de Soja - Regiões Sul e Central do Brasil, 2010/2011. 2010. 62p. Embrapa Soja, Londrina, PR.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Indicações Técnicas para a Cultura da Soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, safras 2012/2013 e 2013/2014. In. XXXIX Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul. (Embrapa Trigo. Documentos, 107). Disponível em: http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/soja/indicacoes_soja2012-2013.pdf. Acesso em: 03 nov. 2014.

Fietz CR, Rangel MAS (2008) Época de semeadura da soja para a região de Dourados – MS, com base na deficiência hídrica e no fotoperíodo. **Engenharia Agrícola** 28:666-672.

Fontana DC, Berlato MA (1997) Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia** 5(1):127-132.

Franke AE, Dorfman R (1997) Análise probabilística das necessidades de irrigação suplementar no Rio Grande de Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** 2(2):109-121.

Franke AE, Dorfman R (2000) Necessidades de irrigação suplementar em soja nas condições edafoclimáticas do Planalto Médio e Missões, RS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 35(8):1675-1683.

Gava R (2014) Os efeitos do estresse hídrico na cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill). 123p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

Martorano LG (2007) Padrões de resposta da soja a condições hídrica do campo sistema solo-planta-atmosfera, observados no campo e simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 151 p.

Matzenauer R, Bergamaschi, H, Berlato, MA, Maluf JRT, Barni NA, Bueno AC, Didone IA, Anjos CS, Machado FA, Sampaio MR (2002) Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Fepagro, 105p. (Boletim FEPAGRO, 10).

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Portarias de zoneamento agrícola de risco climático. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/zoneamento-agricola>. Acesso em: 03 nov. 2014.

Mota FS Da, Agendes MO De O, Alves EGP et al. Análise agroclimática da necessidade de irrigação da soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia** 4(1):133-138.

Neumaier N, Nepomuceno AL, Farias JRB, Oya T (2000) Estádios de desenvolvimento da cultura da soja. In: BONATTO, E.R. (Ed.). Estresses em soja. Passo Fundo: Embrapa Trigo; Passo Fundo, cap.1. p.19-44.

Pereira AR, Angelocci LR, Sentelhas PC (2002) Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. 478p. Guaíba: Agropecuária.

Petry MT (2004) Simulação da necessidade de irrigação no estado do Rio Grande do Sul para compensar perdas por deficiência hídrica de milho, soja e feijão. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 146p.

Pilau FG, Battisti R, Somavilla L, Righi EZ (2012) Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência nas localidades de Frederico Westphalen e Palmeira das Missões, RS. **Ciência Rural** 42(2):283-290.

Priestley CHB, Taylor RJ (1972) On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review** 100:8192.

Sentelhas PC, Battisti R, Câmara GMS, Farias JRB, Hampf AC, Nendel C (2015) The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science** 153:1-18.

Vivan, GA. **Resposta da irrigação suplementar em diferentes cenários para a cultura da soja na microrregião de Passo Fundo, RS.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

Zanon AJ, Streck NA, Grassini P (2016) Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal** 108(4):1447-1454.

4. VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO MEDIDA EM MALHAS PLUVIOMÉTRICAS E EFEITOS SOBRE PRODUTIVIDADE ESTIMADA DA SOJA

Resumo

O Brasil é um dos maiores produtores soja do mundo, no entanto ainda se encontram lacunas de rendimentos nas lavouras, atreladas principalmente as condições climáticas. Com base nisso, o objetivo do trabalho foi avaliar a variabilidade espaço-temporal da precipitação pluvial, medida em malhas, e analisar a influência na produtividade atingível (Y_a) da soja. O estudo foi realizado para a região de Piracicaba, SP, e compreendeu dois períodos de observações com malhas pluviométricas distintas. O primeiro, de 1993 a 1994, com 10 pluviômetros na malha de 1000 ha e o segundo, de 2016 a 2018, com 9 pluviômetros amostrando 36 ha. Para a malha de 1000 ha, o coeficiente de variação apresentou valores de até 169,3% no acumulado diário e 51,7% no mensal. Para a segunda malha (36 ha) a variabilidade foi de até 300% para os 9 pontos no acumulado diário, e 8,71% no acumulado mensal. Em ambas as malhas a variabilidade da precipitação apresentou uma relação inversa com acumulados de precipitação e com a distância entre pluviômetros. Para avaliar a influência da variabilidade da precipitação na produtividade da soja utilizou-se uma simulação multi-modelos, com três modelos de crescimento de culturas (FAO, DSSAT e MONICA). A perda produtiva relativa ($Y_{g,rel.}$, em %) causada por deficiência hídrica foi simulada para 3 datas de semeadura e para cada ponto de amostragem de precipitação. Os resultados mostraram que variabilidade espacial da precipitação influenciou diretamente a produtividade atingível. No entanto, a ordem de grandeza da variabilidade da precipitação não se replica diretamente em produtividade. Já a variabilidade temporal, entre as diferentes épocas de semeadura apresentou maior influência na produtividade da soja.

Palavras-chave: chuva; agricultura de precisão; *Glycine max* L.; modelagem de crescimento e plantas.

Abstract

Brazil is one of the largest soybean producers in the world, however there are still yield gaps in crops, mainly linked to weather conditions. Based on it, this paper quantifies the spatial variability of rainfall based on two dense networks of rain gauges, and analyzes the influence on the attainable productivity (Y_a) of soybean crop. The study was carried out in Piracicaba, SP. For the first rain gauge network a measuring campaign was conducted from 1993 to 1994, with 10 gauges distributed in 1,000.0 ha. The second rain gauge network the measuring campaign was conducted from 2016 to 2018, with 9 gauges sampling 36.0 ha. In the 1,000.0 ha area the

coefficient of variation was 169.3% for daily and 51.7% for monthly scales. In the 36.0 ha area variability was 300% for daily and 8.71% in the monthly scales. Both rainfall measurements campaigns presented an inverse relationship with accumulated precipitation and the distance between gauges. To evaluate the influence of rainfall spatial variability on soybean yield a multi-model (FAO, DSSAT and MONICA) simulation was used. The relative production loss (Y_{grel}, In%) caused by water deficiency was simulated for 3 sowing dates and for each rainfall sampling point. The results showed that the spatial variability of precipitation have directly influence on the attainable productivity (Y_a). However, the magnitude of rainfall variability is not directly replicated on the productivity. The temporal variability, between the different sowing times, had the major influence on soybean productivity.

Keywords: rainfall; precision agriculture; *Glycine max* L.; crop modelling.

4.1. Introdução

Os agricultores brasileiros que adotam a agricultura de precisão, frequentemente mapeiam a produtividade em suas lavouras, o que tem revelado variabilidade na maioria das áreas (Amado et al., 2007; Mattioni et al., 2011; Bottega et al., 2017). A variabilidade espacial da produção resulta de interações complexas entre fatores.

Em relação a isso, apesar da crescente adoção de técnicas que permitem vislumbrar as distinções químicas, físicas (Faraco et al., 2008; Mattioni et al., 2013; Dalchiavon et al., 2017), biológicas e microbiológicas do solo (Lamb & Brown, 2001; Monquero et al., 2008) das áreas de produção, correcionáveis à variabilidade produtiva, ainda é tímida a análise dos elementos meteorológicos, em especial a precipitação (Mesas-Carrascosa et al., 2015; Keswani et al., 2019).

Para determinar a variabilidade temporal e espacial da precipitação têm-se os radares meteorológicos. Lenzi et al. (1990), Venäläinen & Heikinheimo (2002) e Gleason et al. (2008) são pesquisas que destacam a alta resolução espaço-tempo dos dados, com capacidade de localizar áreas de chuva em tempo quase real, com destaque às causadas por sistemas convectivos de pequena escala, que estão entre os fenômenos mais elusivos para redes de estações meteorológicas. No Brasil, entretanto, por conta da indisponibilidade dos dados, o uso agrícola de dados de radares meteorológicos ainda é limitado.

Como alternativa aos radares meteorológicos tem-se produtos de satélites, como o TRMM (Huffman et al., 2007), CHIRPS (Funk et al., 2015), GPM (Huffman et al., 2019), GSMaP (Mega et al., 2014), PERSIANN (Ashouri et al., 2015), dentre outros, apropriados à análise da variabilidade espaço-temporal da precipitação, ainda que a resolução espacial seja superior a 0,05° x 0,05° (Mashingia et al., 2014). Lobell (2013) destaca que os dados de satélite, em

combinação com outros dados e modelos, permitem identificar o potencial produtivo das culturas, surgindo como oportunidade para superar os desafios de dimensionamento espacial e temporal e, portanto, melhorar a compreensão das lacunas de rendimento das culturas.

Apesar dessas fontes de informações meteorológicas, nem sempre disponíveis ou prontas ao uso, a alocação de malhas de pluviômetros em propriedades agrícolas no Brasil não é incomum. Trata-se do método frequentemente usado por agricultores para quantificar a precipitação e identificar presença de variabilidade tempo-espaço em suas lavouras. A adoção desse tipo de monitoramento meteorológico é crescente, não apenas no Brasil, por conta da ampliação dos métodos que provém conectividade também às áreas rurais, e aumento da oferta de sensores, como estações meteorológicas/plataformas web/APPs (Pierce & Elliott, 2008; Jayaraman et al., 2016).

Em relação aos resultados originados de malhas pluviométricas, Stol (1972), Schilling (1991), Graef & Haigis (2001), Jensen & Pedersen (2005), Pedersen et al. (2010), Emmanuel et al. (2012), Gires et al. (2014), Tokay et al. (2014), Emmanuel et al. (2015), obtidos para diversos países, assim como aqueles feitos para o Brasil por Reichardt et al. (1995), Camargo & Hubbard (1999); Krajewski et al. (2003), Bega et al. (2005), Camargo et al. (2005), Chierice & Landim (2014), Almeida et al. (2016), Siciliano et al. (2016) e Souza & Nascimento (2020), em comum destacam a capacidade de detecção da variabilidade temporal e espacial da precipitação, que aumenta com a predominância de sistemas convectivos, e que características do ambiente como orografia, vegetação, bacias hidrográficas ou a presença de corpos hídricos contribuem para a irregularidade

Reiterando o destacado por O'Neal et al. (2002), Lobell (2013) e Lobell et al. (2015) sobre a variabilidade da precipitação e lacunas produtivas, medidas de precipitação feitas com malhas pluviométricas, à nível de fazenda, já agregam informação para análise das lacunas de produtividade das áreas. Todavia, se combinadas a modelos de crescimento de plantas (Doorenbos & Kassam, 1979; Boote et al., 1998, 2003; Jones et al., 2003; Denner et al., 1998; Robertson e Camberry, 1998, Nendel et al., 2011) podem potencializar a compreensão da variabilidade de produção, permitindo separar as causas em fatores meteorológicos e de manejo.

O objetivo geral do artigo foi realizar uma análise agrometeorológica com foco na variabilidade da precipitação. Como objetivos específicos tem-se (i) caracterizar a variabilidade da precipitação medida por duas malhas pluviométricas, com áreas de domínio de 1000,0 ha e 36,0 ha e, (ii) caracterizar como modelos de crescimento de plantas podem ser usados para identificar a variabilidade espacial da produtividade de soja em função da variabilidade da precipitação mensurada por malhas pluviométricas.

4.2. Material e métodos

4.2.1. Área experimental

Para quantificar a variabilidade da precipitação foram usados dados de duas malhas pluviométricas. A primeira malha pluviométrica (MP1) foi instalada por Reichardt et al. (1995) em 1993, para mensurar a variabilidade diária da chuva em uma escala local de 1000 ha. A segunda malha de pluviômetros (MP2) foi instalada em 2016, em uma área experimental da Fazenda Areão (ESALQ/USP), com o objetivo de quantificar a variabilidade de precipitação em uma área menor, de 36 hectares (Figura 1). As malhas pluviométricas MP1 e MP2 estavam localizadas no município de Piracicaba, estado de São Paulo, em área pertencente à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (ESALQ/USP) (Figura 1).

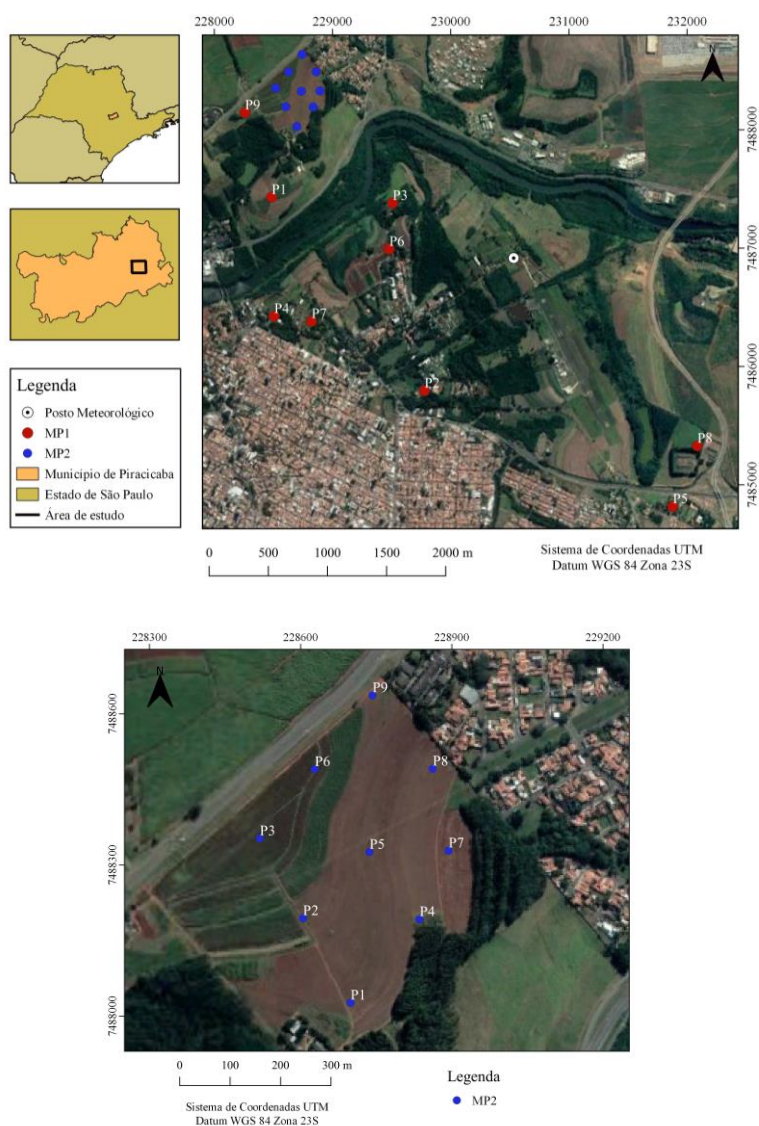


Figura 1. Localização de Piracicaba, estado de São Paulo, da área de estudo no município e posicionamento das duas malhas pluviométricas (MP1 e MP2) na área da ESALQ/USP.

Segundo a classificação de Köppen, Piracicaba (SP) tem clima Cwa- Tropical úmido, com chuvas concentradas entre os meses de outubro a março e período seco no outono-inverno (Alvares et al., 2013). De acordo com dados históricos a precipitação anual de Piracicaba (SP) é de 1350 mm ano⁻¹.

Para a MP1, a partir da descrição dos locais de instalação dos pluviômetros (Reichardt et al., 1995), foram determinados o posicionamento geográficos de cada um. No momento de instalação dos pluviômetros da malha MP2, a posição geográfica de cada equipamento foi demarcada com receptores de sinal GNSS (*Garmin*, modelo GPSMap® 62s). O mesmo equipamento foi usado para demarcar as coordenadas da MP1. Todos os dados possuem coordenadas geográficas e coordenadas plano-retangulares do tipo UTM (projeção UTM), tendo como referência espacial o sistema WGS 84, zona 23S.

4.2.2. Medida da precipitação

Os nove pluviômetros que formaram a malha pluviométrica MP1 (Reichardt et al., 1995) foram aleatoriamente distribuídos na área da ESALQ/USP. A menor distância entre os pontos de medida era de 640 m, enquanto a maior ficou em 4406 m.

As medições foram feitas entre os meses de novembro de 1993 até outubro de 1994, na escala diária, somando 364 dias de registros pluviométricos. Os equipamentos eram manuais, com área de coleta de 300 cm² e precisão de medição é de 0,1 mm. Os pluviômetros foram instalados a 1,5 m acima da superfície do solo, nivelados e livres de obstáculo em um círculo de pelo menos 20 m de raio. Um décimo ponto de coleta foi o pluviômetro do posto meteorológico “Professor Jesus Marden dos Santos” da ESALQ/USP (Figura 1).

Na área experimental da ESALQ/USP, denominada Fazenda Areão, foi instalada a segunda malha pluviométrica (MP2). Nove pluviômetros foram distribuídos com distância de aproximadamente 200 m entre si de, com exceção do P7 (Figura 1), formando uma malha quadrangular (Figura 1). Para essa malha foram coletados dados de 08 de novembro de 2016 a 22 de janeiro de 2018. Um décimo pluviômetro também foi instalado no Posto Meteorológico “Professor Jesus Marden dos Santos” da ESALQ/USP, distante 2250 m do centro da MP2. O mínimo e máximo distanciamento entre pares de pluviômetros da MP2 eram respectivamente de 157 m e 612 m.

Os pluviômetros da MP2 eram do modelo “*Tipping Bucket*” (Vaisala), com superfície de coleta de 380 cm². Os equipamentos, previamente calibrados, foram instalados a 1,5 m acima da superfície, nivelados e ligados a sistemas de aquisição de dados (Log Chart II), armazenando medidas a cada minuto.

4.2.3. Análise dos dados de precipitação

As séries de dados de precipitação da MP1 (Reichardt et al., 1995) e MP2 foram avaliadas, a fim de identificar dados errôneos e falhas de medição. Como as malhas eram compostas por nove pluviômetros, além dos pluviômetros instalados no Posto Meteorológico da ESALQ/USP (MP1 e MP2), foi possível estimar a incerteza das medições de cada instrumento a partir dos desvios da média obtida dos pluviômetros em operação. Um método de validação também foi aplicado para identificar dados errôneos (Estévez et al. 2011). A análise foi baseada no teste de consistência denominado “range test” (Eq. 1).

$$0 \leq P \leq P_{MAX} \quad (1)$$

Onde P é a precipitação diária (mm) medida por cada pluviômetro e P_{MAX} é o valor máximo de precipitação diária proveniente de dados históricos para Piracicaba, SP.

A variabilidade da precipitação, para as escalas diária e mensal, foi quantificada a partir do desvio padrão (Eq. 2) e do coeficiente de variação (Eq. 3).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

onde σ é o desvio padrão da amostra (mm), n é o tamanho da amostra e \bar{x} é a média aritmética (mm).

$$CV = 100 \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (3)$$

sendo CV o coeficiente de variação de Pearson (%), σ o desvio padrão (mm) e \bar{x} a média aritmética (mm) da precipitação entre os pluviômetros.

Também foi avaliada a correlação de Pearson (ρ) (Eq. 4) em relação às distâncias entre os pluviômetros da MP1 e MP2 (Camargo et al., 2005).

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{var(X) \cdot var(Y)}} \quad (4)$$

em m que ρ é a correlação de Pearson, \bar{x} e \bar{y} são as médias aritméticas de cada variável, n é o tamanho da amostra, $cov(X,Y)$ é a covariância entre as duas variáveis e $var(X,Y)$ é a variância da amostra.

Dados de precipitação registrados em áreas que variam de alguns metros quadrados a 8 km são escalas típicas para produtos de radar utilizados em aplicações hidrológicas. Em tais escalas locais, os dados das chuvas podem ser consideravelmente distorcidos e, portanto, devem ser transformados (Habib et al, 2001). O teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965) foi escolhido para análise da normalidade dos dados de precipitação. Para o cálculo da correlação de Pearson (ρ) os dados foram normalizados com a transformação de Box-Cox (BOX; COX, 1964), amplamente usada para transformar dados hidrológicos em aproximadamente

gaussianos (Thyer et al., 2002). Para determinação da transformação dos dados aplica-se a Eq. 5:

$$y^{(\lambda)} = \frac{y^\lambda - 1}{\lambda} \quad \lambda \neq 0$$

$$y^{(\lambda)} = \log y \quad \lambda = 0$$

(5)

Para essas análises foram utilizados apenas registros diários com pelo menos seis pluviômetros em operação, sem qualquer imputação de dados faltantes (Figura 2). Dos 364 dias de medição da MP1, 353 dias tiveram seis ou mais pluviômetros em operação, correspondendo a 96,9% do período. Já para a MP2, por 419 dias, seis ou mais pluviômetros estavam funcionando normalmente. Os pluviômetros instalados na área do Posto Meteorológico da ESALQ/USP, pela MP1 e MP2, não apresentaram falhas de dados.

4.2.4. Dados históricos de precipitação de Piracicaba (SP)

Dados de precipitação diária coletados entre 01 de janeiro de 1917 e 31 de dezembro de 2018, no Posto Meteorológico “Professor Jesus Marden dos Santos” da ESALQ/ USP, foram usados para elaborar a base histórica de precipitação mensal para Piracicaba (SP).

4.2.5. Falhas de dados de precipitação

A fim de proceder à análise da influência da variabilidade da precipitação sobre a produtividade da soja, através de modelos de crescimento de plantas, três segmentos de dados de precipitação de cada malha pluviométrica foram usados (MP1 e MP2), com 130, 120 e 110 dias cada, respectivamente contados a partir de 15 de novembro de 1993 e 2016, 15 de dezembro de 1993 e 2016 e 15 de janeiro de 1994 e 2017.

O método adotado no preenchimento de falhas foi o da regressão linear múltipla (Mello et al., 2017). Na regressão múltipla as informações pluviométricas do posto Y são correlacionadas com as correspondentes observações de vários pluviômetros vizinhos, por meio da Eq. 6:

$$y_c = x_1i + a_1 x_2i + \dots + a_{n-1} x_{ni} + a_n \quad (6)$$

Onde n = o número de pluviômetros considerados, ao, a1, ..., an = os coeficientes a serem estimados e x1i, x2i, ..., xni = as observações correspondentes registradas nos pluviômetros vizinhos.

4.2.6. Modelos e simulação da produtividade da Soja

Com a finalidade de reduzir as incertezas nas simulações foi utilizada a abordagem do conjunto de modelos (Asseng et al., 2013; Martre et al., 2015), recentemente validada para a cultura da soja em várias regiões do Brasil (Battisti et al., 2017). Assim, a partir dos modelos FAO

– Zona Agroecológica (Doorenbos & Kassam, 1979), do Modelo para nitrogênio e carbono em agro-ecossistemas v.2.11 (Nendel et al., 2011) denominado MONICA e do CropSystem Model – CROPGRO – Soybean v. 4.6.1 presente na plataforma Decision Support System for Agrotechnology Transfer (Boote et al., 1998, 2003; Jones et al., 2003) denominado DSSAT, previamente calibrados e validados para a região de Piracicaba, SP (Battisti et al. 2017), foram estimadas as produtividade potencial (PP, kg ha⁻¹), a produtividade atingível (PA, PP, kg ha⁻¹) e a perda produtiva relativa (Yg, em %) (Eq. 7)

$$Yg = \left(1 - \frac{PA}{PP}\right) 100 \quad (7)$$

O conjunto multi-modelo foi então obtido a partir da média aritmética dos rendimentos simulados pelos três modelos.

Para as malhas pluviométricas (MP1 e MP2) as simulações usaram dos três segmentos de dados de precipitação de cada malha pluviométrica, com 130, 120 e 110 dias contados a partir das de semeadura: 15 de outubro, 15 de novembro e 15 de dezembro, seguindo recomendação do Zoneamento de Risco Climático para a Cultura da Soja (MAPA, 2020). Assim, as simulações para cada uma das três datas de semeadura foram processadas para cada ponto amostral de precipitação das malhas (Figura 1), incorporando a variabilidade da precipitação.

Todos os demais elementos meteorológicos exigidos como dados de entrada pelos modelos usados foram obtidos a partir do Posto Meteorológico “Prof. Jesus Marden dos Santos”, da ESALQ/USP, e considerados uniformes para todos os pontos de simulação.

As simulações buscaram avaliar a produtividade potencial (PP) e atingível (PA) de uma cultivar de GMR 6.5, a exemplo da BRS 284 que foi usada para calibrar os modelos testados por Battisti et al. (2017).

A partir de uma amostra indeformada de solo, coletada no ponto (P4) da MP2, foi obtida a curva de retenção de água do solo (van Genuchten, 1980). Assumindo homogeneidade do solo dentro das áreas da MP1 e MP2, com intuito de analisar tão somente o efeito da precipitação sobre a produtividade, a partir da umidade em capacidade de campo (θ_{cc}), de 0,338 cm³ cm⁻³ e em ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) de 0,249 cm³ cm⁻³, e da profundidade máxima do sistema radicular (z) de 0,85m, obteve-se a capacidade máxima de armazenamento de água no solo (CAD) (Eq. 8), de 75,0 mm.

$$CAD = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) z \quad (8)$$

4.3. Resultados e discussão

4.3.1. Dados pluviométricos das malhas MP1 e MP2

Dados de precipitação mensal registrados pela MP1, comparados aos dados médios históricos (1917-2018), caracterizaram um período de anomalias negativas de precipitação entre os meses de novembro de 1993 e fevereiro de 1994 (Figura 2). Os meses de novembro de 1993 e setembro de 1994, por terem um ou mais dias de medição com menos de 50% dos pluviômetros em funcionamento, não são comparáveis à média histórica.

Dezembro e janeiro de 1993 foram meses mais secos, com 32,5% e 42,4% a menos de precipitação que a média histórica. Já os meses de março e abril de 1994, ao contrário, apresentaram acumulados superiores, com desvios de +56% e +47%. Após, meses da estação seca (maio a agosto de 1994) acumulando no máximo 53,5mm (maio de 1994), apresentaram pequenas diferenças em relação aos dados médios históricos. Em agosto de 1994 não houve registro de chuva. Em relação ao último mês analisado, outubro de 1994, com 131,8 mm acumulados, caracterizou a retomada das chuvas com volume acumulado superando a média histórica em 20,9% (Figura 2).

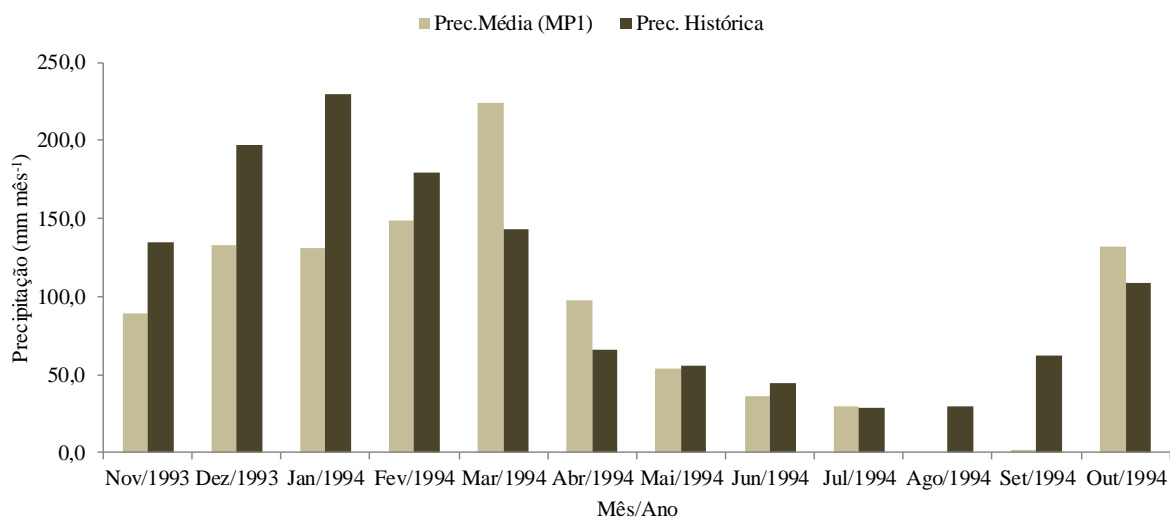


Figura 2. Precipitação média mensal para a MP1 e precipitação média histórica (1917-2018) em Piracicaba, SP.

Dados de precipitação coletados pela MP2 também apresentaram diferenças em comparação aos dados históricos de Piracicaba (1917-2018) (Figura 3). Os meses de janeiro, fevereiro, abril, junho, julho, agosto, setembro, outubro e dezembro de 2017, que tiveram registros pluviométricos diários completos e nenhum dia com menos de cinco pluviômetros operacionais, apresentaram diferenças de 82,3 mm mês⁻¹ (janeiro de 2017) a -104,6 mm mês⁻¹ (dezembro de 2017) em relação aos dados históricos.

Diferenças observadas entre os demais meses e dados históricos não devem ser considerados como anomalias, pois esses períodos apresentam um dia (dezembro de 2016 e março, maio e novembro de 2017 e janeiro de 2018) com ausência de dados de precipitação (Figura 3).

Ressalta-se ainda que a campanha de coleta de dados da MP2 foi iniciada e finalizada em meado dos meses de novembro de 2016 e janeiro de 2018. Portanto, as diferenças entre os dados de precipitação desses meses também não caracterizam desvio em relação ao dado histórico (Figura 3).

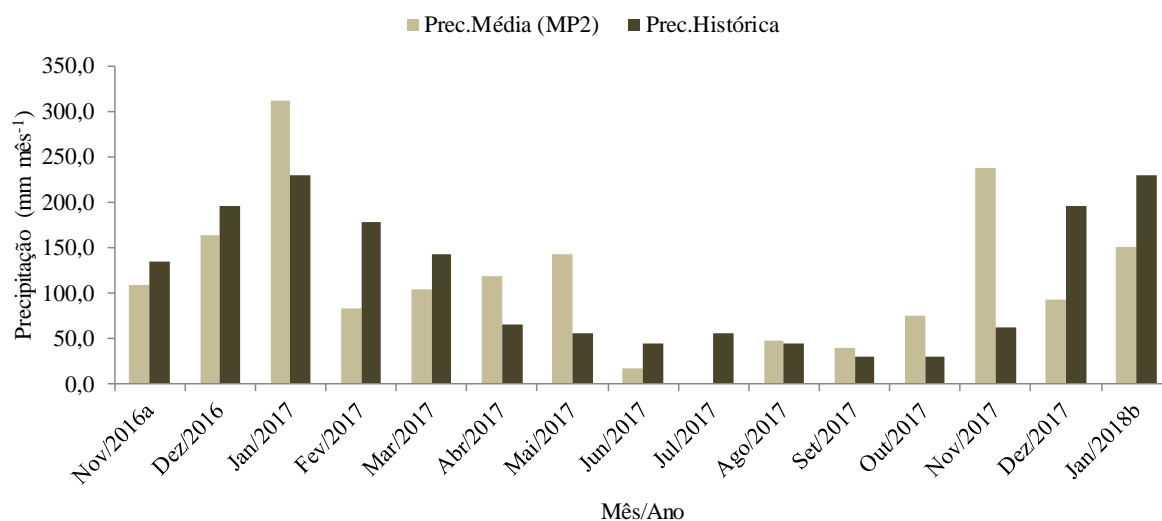


Figura 3. Precipitação média mensal para a MP2 e precipitação média histórica (1917-2018) em Piracicaba, SP.

As correlações entre os dados de precipitação das malhas MP1 e MP2, considerando apenas os meses com séries completas (no mínimo dados de cinco pluviômetros por dia), revelou que precipitação acumulada mensal da MP1 ficou mais próxima da média histórica (Figura 4). Para a MP1 a correlação indicou volume médio acumulado 15,4% inferior à média histórica. Para a MP2, incluindo apenas os meses com registros completos, a análise indicou 19,4% menos precipitação que a média histórica de Piracicaba, SP.

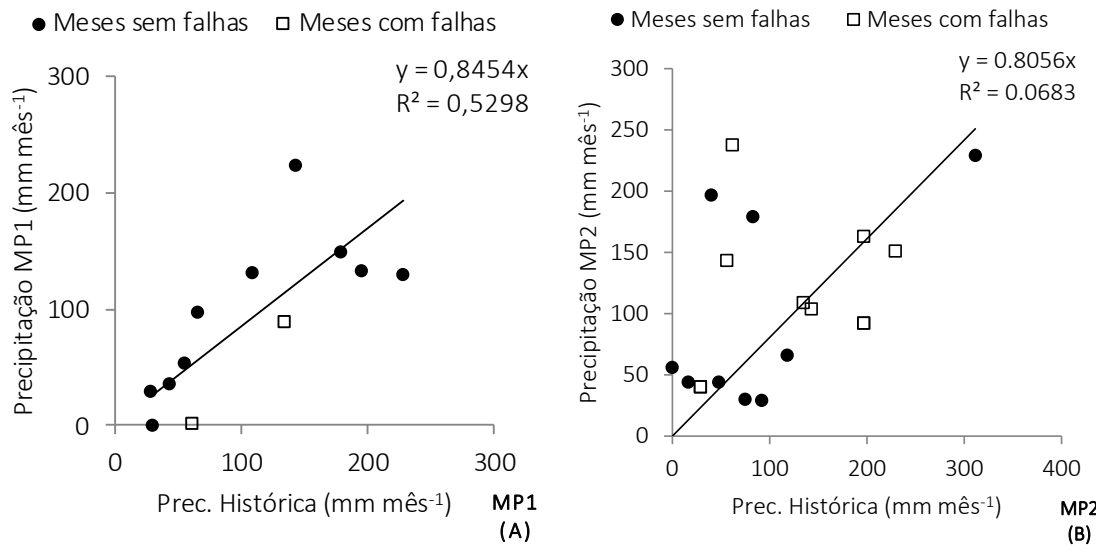


Figura 4. Correlação entre a precipitação mensal média das malhas MP1 (A) e MP2 (B) e a precipitação mensal histórica (1917-2018) de Piracicaba, SP.

As causas das diferenças em relação à precipitação média mensal histórica podem ser diversas, podendo estar relacionadas a fenômenos atmosféricos de escalas planetárias, como mudanças na temperatura dos oceanos (Pampuch et al., 2016). Vale destacar que para o ano de 1993 não foi registrado a presença do fenômeno El Niño Oscilação Sul - ENSO (NOAA, 2019) e, que no ano de 2017, esse também era o cenário na avaliação feita até o trimestre agosto-setembro-outubro. Após, do trimestre setembro-outubro-novembro a novembro-dezembro-janeiro teve-se a presença da fase fria do fenômeno, a La Niña (-0,6 a -0,7°C).

Em relação a uma possível influência do ENSO no regime pluviométrico local, ao comparar os dados médios dos meses de outubro de 2017 (sem falhas de dados diários) e novembro de 2017 (com um dia de informação faltante) da MP2 aos dados históricos, têm-se diferenças de +44,8 mm mês⁻¹ para o primeiro e de +175,9 mm mês⁻¹ para o segundo mês. Porém, em dezembro de 2017, mês com apenas um dia (31/12/2017) de dado faltante da malha amostral MP2, mas que coincidiu com o registro de 33,0mm no pluviômetro locado no posto meteorológico, a média pluviométrica da MP2 foi de 60,9mm a menos que a média histórica. A característica do trimestre parece evidenciar a fraca influência do ENSO sobre o regime de precipitação no estado de São Paulo (Liebmann et al., 2001).

4.3.2. Análise da precipitação entre pontos de medida das malhas pluviométricas

Para avaliar as diferenças de precipitação mensurada pelos pluviômetros de cada uma das malhas pluviométricas, MP1 e MP2 (Figura 1), todos os dados faltantes foram identificados, a fim de excluir dados de pluviômetro(s), em qualquer contabilidade temporal, para análise da variabilidade da precipitação (Tabelas 1 a 4).

Durante os 364 dias de medição da precipitação, por meio dos nove pluviômetros da MP1, foram contabilizados 98% de dados consistentes. O mês de novembro de 1993, primeiro período de coleta da MP1, foi o que apresentou o maior número de falhas de medição, com 11,5% de dados faltantes. Após, as falhas de coleta foram reduzidas a menos de 1,9% em setembro de 1994 e 1,4% observado para os meses de dezembro de 1993 e março de 1994. Todos os demais meses tiveram falhas inferiores a 1,2%, cinco deles (abril a agosto de 1994) sem qualquer dado faltante (Tabelas 1 e 2).

Tabela 1. Precipitação mensal dos pluviômetros da malha pluviométrica MP1, de novembro de 1993 a outubro de 1994.

Mês	Posto Met.	Precipitação (mm mês ⁻¹)								
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Nov/93	91,6	83,7	63,8	64,8	95,3	44,1	59,8	64,4	22,6	26,6
Dez/93	146,1	127,4	96,9	113,0	119,1	181,3	129,9	118,4	172,0	129,7
Jan/94	133,3	121,9	127,8	76,9	124,1	137,4	127,3	131,4	132,5	144,1
Fev/94	154,8	130,3	125,2	145,0	153,1	153,9	158,7	160,9	172,8	116,6
Mar/94	222,2	244,8	126,3	229,9	206,4	197,9	231,4	232,0	223,5	192,7
Abr/94	114,2	89,5	78,2	115,7	94,5	96,4	107,5	83,9	118,6	91,0
Mai/94	55,8	49,2	54,9	55,1	60,3	52,7	56,8	50,5	52,9	49,5
Jun/94	36,7	35,3	36,0	38,2	35,7	38,7	37,1	34,0	35,5	37,3
Jul/94	24,7	17,9	22,1	41,5	41,1	24,6	36,8	35,4	22,4	27,6
Ago/94	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Set/94	0,5	1,2	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,5	1,7
Out/94	125,6	127,4	104,5	140,2	144,7	118,1	129,5	128,0	125,8	140,5

Dados achurados indicam que o valor de precipitação integra dias do referido mês com ausência de medida da malha MP1. Dados achurados não compõem a média, desvio padrão e coeficiente de variação (Tabela 2).

Tabela 2. Falhas de registros de dados (%), precipitação máxima e mínima mensal (mm m-1), amplitude máxima mensal (mm m-1), precipitação média mensal (mm m-1), desvio padrão (mm m-1) e coeficiente de variação (%) entre os pluviômetros da malha pluviométrica MP1.

Mês	Falhas (P1-P9) (%)	Precipitação máxima (mm m-1)	Precipitação mínima (mm m-1)	Amplitude máxima (mm m-1)	Precipitação média (mm m-1)	DP (mm m-1)	CV (%)
Nov/93	11,5	95,3	83,7	11,6	89,5	8,2	9,2
Dez/93	1,4	172,0	118,4	53,6	132,8	19,9	15,0
Jan/94	0,4	144,1	121,9	22,2	130,8	7,3	5,6
Fev/94	1,2	172,8	116,6	56,2	148,9	18,0	12,1
Mar/94	1,4	244,8	197,9	46,9	223,7	16,2	7,2
Abr/94	0,0	118,6	78,2	40,4	97,3	13,9	14,3
Mai/94	0,0	60,3	49,2	11,1	53,5	3,6	6,8
Jun/94	0,0	38,7	34,0	4,7	36,4	1,5	4,1
Jul/94	0,0	41,5	17,9	23,6	29,9	8,9	29,7
Ago/94	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Set/94	1,9	1,7	0,5	1,2	1,2	0,5	42,9
Out/94	0,7	144,7	118,1	26,6	131,8	9,1	6,9

Falhas %: quantidade de dados diários ausentes em relação ao total de medidas dos nove pluviômetros da MP1. Precipitações máximas e mínimas correspondem ao maior e menor valores mensais da malha. Amplitude máxima corresponde a diferença entre os valores máximo e mínimo mensais. A precipitação média mensal (Prec.med.) é composta pelos pluviômetros que apresentaram sempre a mesma sequência de medições corretas.

Para os 441 dias consecutivos (08 de novembro de 2016 à 22 de janeiro de 2018) de dados coletados pela MP2, considerando os nove pluviômetros locados na área experimental da Fazenda Areão, foram acumulados 11% de dados falhos (Tabela 2). Na MP2 em 62,3% dos dias todos os pluviômetros estiveram em funcionamento. Os meses de novembro e dezembro de 2016 e fevereiro e março de 2017 foram os que tiveram as maiores falhas de registro de dados, todos com mais de 20%. Somente no mês de julho de 2017 teve-se funcionamento e coleta realizada pelos nove pluviômetros durante todos os dias. De junho a dezembro de 2017 a porcentagem de dados falhos ficou abaixo dos 10% (Tabelas 3 e 4).

Tabela 3. Precipitação e falhas de registro de dados (%) mensal e precipitação média, desvio padrão e coeficiente de variação entre os pluviômetros para cada mês da MP2.

Período	Precipitação (mm mês ⁻¹)									
	Posto Met	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Nov/2016 ^a		103,8	110,5	108,8	112,2	108,0	111,3	109,8	110,2	105,6
Dez/2016		159,2	99,8	168,5	159,6	161,3	164,0	159,1	166,5	165,6
Jan/2017		317,0	20,6	94,4	299,4	317,0	315,2	311,1	319,6	289,4
Fev/2017		82,8	26,7	0,0	0,0	84,6	87,5	84,2	81,9	77,0
Mar/2017		115,0	92,5	7,6	9,5	107,4	61,7	103,2	101,6	91,7
Abr/2017		69,2	3,3	75,9	95,2	131,8	69,5	128,3	135,1	126,2
Mai/2017		146,4	1,3	147,8	144,2	143,8	1,2	139,1	145,9	136,8
Jun/2017		0,0	0,8	15,7	16,6	16,8	8,3	16,6	8,9	17,0
Jul/2017		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ago/2017		49,4	0,0	49,3	49,5	47,8	47,4	45,6	46,5	43,4
Set/2017		34,1	0,0	41,5	41,7	41,7	44,0	40,3	38,6	38,9
Out/2017		68,7	89,2	77,7	71,2	74,4	75,8	70,8	9,8	70,8
Nov/2017		237,9	222,0	234,3	270,6	232,9	226,2	224,0	20,7	192,0
Dez/2017		94,6	73,7	92,0	87,6	99,1	96,5	86,6	61,3	90,7
Jan/2018 ^b		65,6	165,9	139,7	78,1	151,6	144,3	72,7	131,6	153,1

Dados achurados indicam que o valor de precipitação integra dias do referido mês com ausência de medida da malha MP2. Dados achurados não compõem a média, desvio padrão e coeficiente de variação (Tabela 4).

Tabela 4. Falhas de registros de dados (%), precipitação máxima e mínima mensal (mm m-1), amplitude máxima mensal (mm m-1), precipitação média mensal (mm m-1), desvio padrão (mm m-1) e coeficiente de variação (%) entre os pluviômetros da malha pluviométrica MP2.

Mês	Falhas (P1-P9) (%)	Precipitação máxima (mm m-1)	Precipitação mínima (mm m-1)	Amplitude máxima (mm m-1)	Precipitação média (mm m-1)	DP (mm m-1)	CV (%)
Nov/2016 ^a	0,0	112,2	103,8	8,4	108,9	2,7	2,5
Dez/2016	9,7	168,5	159,1	9,4	163,0	3,7	2,3
Jan/2017	14,0	319,6	289,4	30,1	311,5	11,2	3,6
Fev/2017	23,0	87,5	77,0	10,4	83,0	3,5	4,2
Mar/2017	19,7	115,0	91,7	23,3	103,8	8,5	8,2
Abr/2017	12,6	135,1	126,2	8,8	118,2	3,9	3,3
Mai/2017	10,0	147,8	136,8	11,0	143,4	4,2	2,9
Jun/2017	6,7	17,0	15,7	1,4	16,5	0,5	3,1
Jul/2017	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ago/2017	3,2	49,5	45,6	3,9	47,9	1,5	3,2
Set/2017	0,7	44,0	34,1	9,9	40,1	3,0	7,4
Out/2017	2,9	89,2	68,7	20,4	74,8	6,5	8,7
Nov/2017	8,9	270,6	224,0	46,6	237,7	16,9	7,1
Dez/2017	1,4	99,1	86,6	12,4	92,1	4,9	5,3
Jan/2018 ^b	11,6	165,9	139,7	26,2	150,9	10,0	6,6

Falhas %: quantidade de dados diários ausentes em relação ao total de medidas dos nove pluviômetros da MP2. Precipitações máximas e mínimas correspondem ao maior e menor valores mensais da malha. Amplitude máxima corresponde a diferença entre os valores máximo e mínimo mensais. A precipitação média mensal (Prec.med.) é composta pelos pluviômetros que apresentaram sempre a mesma sequência de medições corretas.

Krajewski et al. (2003), Jensen & Pedersen (2005) e Pedersen et al. (2010) são alguns dos trabalhos que destacam as dificuldades impostas quando são utilizados pluviômetros, principalmente por conta do entupimento do coletor e, especialmente no caso de sensores automáticos, problemas relacionados ao fornecimento de energia ao sistema de coleta. Isso justifica porque malhas compostas por sensores autônomos, assim como a MP2 (Tabelas 3 e 4), podem apresentar maior quantidade de dados falhos se comparado ao uso de sensores manuais, como feito na MP1 (Tabelas 1 e 2).

Com relação à variabilidade da precipitação mensal entre os nove pontos de coleta da cada uma das malhas (Tabelas 1 a 4), a malha MP1 apresentou maiores valores de desvio

padrão entre os pontos, comparativamente à MP2, essencialmente pelas maiores distâncias entre os pluviômetros dessa malha (Figura 1), condição também observada por Camargo & Hubbard (1999), Krajewski et al. (2003) e Mendoza-Resendiz et al. (2013) ao relacionarem dados de pares de pluviômetros com diferentes distâncias entre si.

A maior diferença observada entre os acumulados médios mensais, ou seja, diferença entre a máxima (P8) e mínima (P9) precipitação acumulada por ponto de medida foi de 56,2 mm mês⁻¹, registrado em fevereiro de 1994 (Tabela 2). Nesse mês a precipitação média da malha foi de 148,9mm mês⁻¹, com desvio padrão de 18 mm mês⁻¹ e coeficiente de variação (CV) de 12,1%. Esses dados destacam o quão amplo pode ser a variação da precipitação em uma área de 1000 ha, em Piracicaba - SP.

Em geral, para meses com registro de precipitação, o desvio padrão da MP1 variou de 0,5 mm mês⁻¹ (setembro de 1994) a 19,9 mm mês⁻¹ (dezembro de 1993) (Tabela 2). O coeficiente de variação ficou entre os 4,1% e os 42,9%. Reichardt et al. (1995) já haviam analisado a variabilidade espacial da série de dados para acumulados diários e anuais da MP1. Os resultados assinalaram coeficientes de variação entre de 2,2% a 169,3% para acumulados diários, valor máximo superior ao obtido para a análise mensal (Tabela 2), e um CV de 3,06% em relação aos valores de precipitação acumulada na escala anual. Dados de precipitação diária, coletados em diferentes pontos de uma malha amostral, ao serem integrados em escalas temporais sucessivamente maiores, como mensal e anual, acabam por compensar diferenças instantâneas entre pontos de coleta e minimizar as diferenças de medição (Habib et al., 2001).

Análises e tendências similares são descritas por Pedersen et al. (2010), a partir de dados de precipitação acumulados a cada 5 minutos. Para essa escala temporal os resultados apontaram coeficiente de variação de até 212%, em uma área de apenas 25 ha. Villarini et al. (2008) analisando dados de 50 pluviômetros durante seis anos, em uma área de 135 km², também relataram uma diminuição da variabilidade à medida que se acumula a precipitação no tempo. Esses autores ressaltam que, para locais em que a geografia exerce influência acentuada sobre a variabilidade da precipitação, essa compensação ao longo do tempo nos acumulados de precipitação pode não ocorrer e a variabilidade se manter.

Na MP1 os meses de julho e setembro de 1994 foram os que apresentaram maiores valores de CV, de 29,7% e 42,9%, respectivamente. Em julho, a média mensal entre os pluviômetros foi de 29,9 mm mês⁻¹, com desvio padrão de 8 mm mês⁻¹. Já em setembro, apesar do valor alto de CV, os acumulados mensais registrados não chegaram aos 2 mm mês⁻¹, com desvio padrão de 0,6 mm mês⁻¹ (Tabela 2).

Da mesma forma, os dados de precipitação coletados pela MP2 entre os meses de novembro de 2016 e janeiro de 2018 apresentam variabilidade entre os nove pontos (Tabela 3).

Ressalta-se que essa segunda malha, compreendendo apenas 36 ha, corresponde a apenas 3,6% dos 1000 ha da MP1. Mesmo assim, na MP2, foram observadas diferenças entre os pontos de medição. Para o mês de novembro de 2017, a precipitação média mensal da malha foi de 237,8 mm mês⁻¹ e o desvio padrão de 16,9 mm mês⁻¹, gerando em um coeficiente de variação de 7,1 %. Esses resultados evidenciam as diferenças expressivas de precipitação no acumulado mensal mesmo em distâncias menores que 1 km. Coeficientes de variação (CV) maiores do que 5% foram observados para os meses de março, setembro, outubro e novembro de 2017 e janeiro de 2018 (Tabela 4).

4.3.3. Variabilidade da precipitação na escala diária

A variabilidade da precipitação diária entre pontos de medição das malhas (Figuras 5 e 6), como esperado, foi maior do que na escala mensal (Tabelas 1 a 4). A MP1 (Figura 5) outra vez apresentou maior variabilidade da precipitação em comparação à MP2 (Figura 6), definida por valores de desvio padrão e de coeficiente de variação maiores (Figuras 5, 6 e 7).

Para a MP1 a máxima diferença entre dados de precipitação diária foi de 42,8 mm dia⁻¹ (Figura 5) verificado entre os pontos P2 e P8 (Figura 1), pluviômetros distantes 1,89 km entre si. Essa diferença foi registrada em 03 de dezembro de 1993. Nessa malha o desvio padrão máximo foi de 13,5 mm dia⁻¹, medido no dia 9 de fevereiro de 1994 (Figura 5), quando a precipitação variou entre 31,8mm (P6) e 1,3mm (P9). A precipitação média em 9 de fevereiro de 1994 foi de 19,3 mm dia⁻¹.

Em geral, na MP1, para volumes médios maiores que 30 mm dia⁻¹ o desvio variou de 2,8 mm dia⁻¹ a 10,2 mm dia⁻¹. Já para volumes médios menores que 10 mm dia⁻¹ os desvios ficaram entre 0,2 a 12,2 mm dia⁻¹, com desvio padrão médio de 1,7 mm dia⁻¹ (Figura 7).

Na MP2 a máxima diferença entre precipitações diárias foi de 19,4 mm dia⁻¹, entre o P4 (70,3mm) e o P9 (50,9mm), distantes 454 m entre si (Figura 1), registro feito no dia 4 de novembro de 2017 (Figura 6). O desvio padrão médio da MP1 foi de 1,1 mm dia⁻¹, e o máximo valor encontrado na malha de 6,8 mm dia⁻¹, referente ao dia 4 de novembro de 2017, quando a precipitação média dos pluviômetros foi de 57,3 mm dia⁻¹ (Figura 6).

Nessa malha (MP2), para acumulados diários iguais ou maiores que 30 mm dia⁻¹ os desvios oscilaram entre 1,0 e 6,8 mm dia⁻¹, e para volumes menores do que 10 mm dia⁻¹ o desvio ficou entre 0,1 e 4,5 mm dia⁻¹ (Figura 7).

MP1 (A)

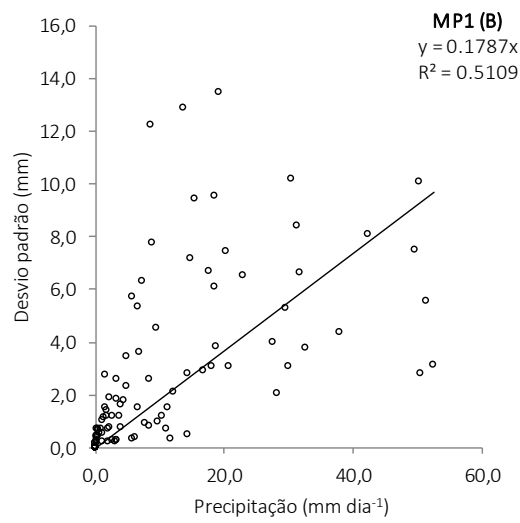
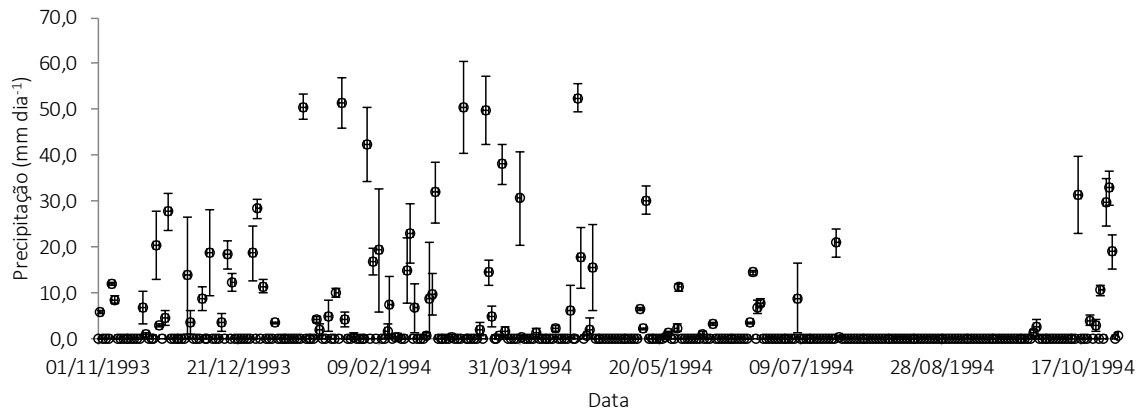
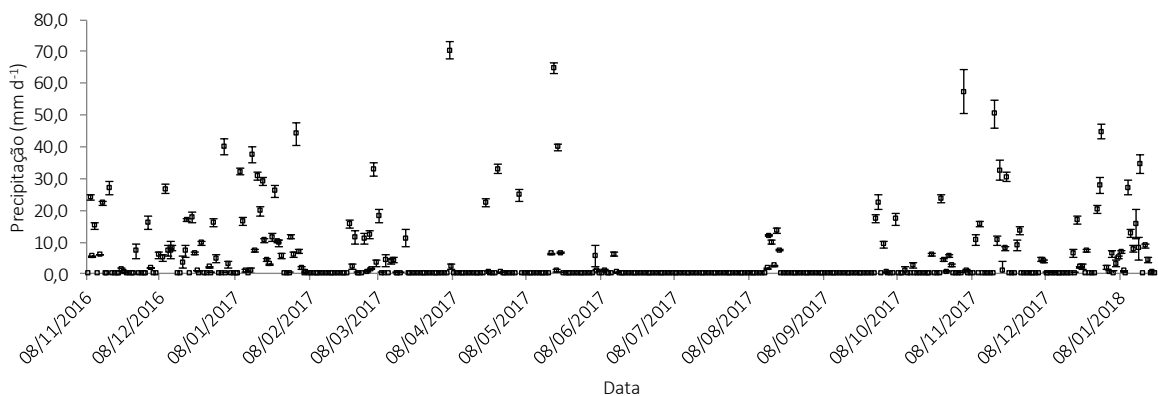


Figura 5. Precipitação pluviométrica diária da malha pluviométrica MP1 (A) e correlação entre os dados de desvio padrão e precipitação diária da MP1 (B).

MP2(B)



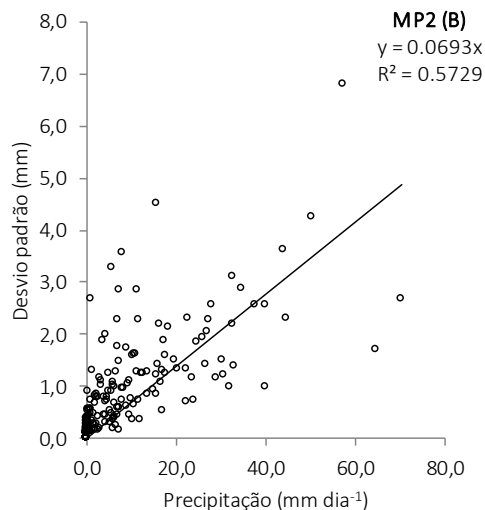


Figura 6. Precipitação pluviométrica diária da malha pluviométrica MP2 (A) e correlação entre os dados de desvio padrão e precipitação diária da MP2 (B).

O coeficiente de variação apresentou uma relação inversa com a precipitação acumulada diária para ambas as malhas (Figura 7). Na MP1 para volumes baixos de precipitação, inferiores a 3 mm dia^{-1} , o CV chegou aos 188,5% (Figura 7A). A partir desse limiar de precipitação diária (3 mm dia^{-1}), para lâminas crescentes tem-se CV sucessivamente menor (Figura 7). Os resultados concordam com aqueles apresentados por Pedersen et al. (2010), para Arhus na Dinamarca, quando também foi observada uma relação inversa entre dados diários de precipitação e o coeficiente de variação. Os dados foram obtidos em uma malha de nove pluviômetros, abrangendo área de 25 ha, e o CV só foi superior a 50% para eventos chuvosos com menos de 5 mm dia^{-1} . Em relação aos valores de CV para acumulados de menos de 3 mm dia^{-1} , em parte deve-se ao mecanismo de báscula dos pluviômetros e a resolução dos pluviômetros, de 0,1mm, em ambas as malhas pluviométricas.

Em geral, nos 86 dias com registros de chuva na MP1, em 84,0% desses o coeficiente de variação superou os 10%, sendo que em 37,2% o CV excedeu os 50% (Figura 7A). Esses resultados evidenciam a alta variabilidade da precipitação diária durante o período de medição na área de 1000 ha.

Para a MP2 ficou ainda mais clara a relação inversa entre a precipitação e coeficiente de variação (Figura 7B). Nesse caso muito similar aos resultados descritos por Pedersen et al. (2010). Apesar de volumes de chuva inferiores a 1 mm dia^{-1} apresentarem CV variando de 15% a 300%, no geral, CV acima de 57% só foram observados para volumes menores que $1,2 \text{ mm dia}^{-1}$. Já para volumes superiores a 10 mm dia^{-1} o máximo valor de coeficiente de variação encontrado foi de 29% (Figura 7B).

Apesar do coeficiente de variação máximo da MP2 superar aqueles determinados para a MP1, de forma geral os dados registrados diariamente na MP1 apresentaram maior variabilidade em comparação a MP2 (Figura 7), esperado por conta da maior distância entre pluviômetros e, conseqüentemente maior abrangência espacial (Habib et al., 2001).

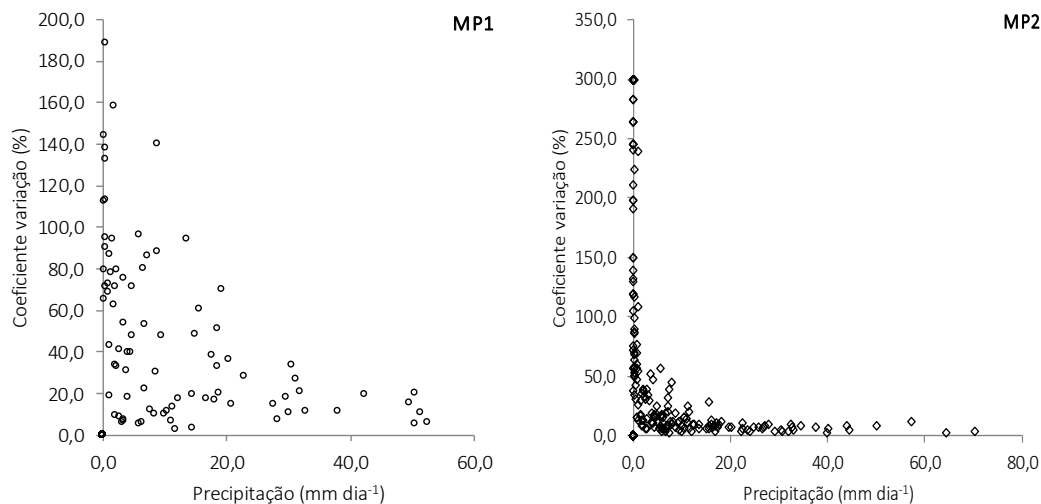


Figura 7. Relação entre o coeficiente de variação e a precipitação diária nas malhas MP1 (A) e MP2 (B).

4.3.4. Variabilidade relacionada à distância entre pluviômetros

A correlação de Pearson foi gerada para cada par de pluviômetros dentro das malhas MP1 e MP2, e confrontada com as respectivas distâncias entre sensores (Figura 8). Para a MP1 as correlações de Pearson ficaram acima de 0,885 para todas as combinações de pontos de medição (Tabela 5), determinando redução da correlação com o aumento das distâncias entre os pluviômetros (Figura 8). Para a MP2, devido a maior proximidade entre pluviômetros, a correlação mínima foi de 0,971.

Vários estudos relatam a alta correlação entre dados de pluviômetros em curtas distâncias. Ciach & Krajewski (2006) analisando 24 pontos pluviométricos, cobrindo uma área de 900 ha, durante dois verões em Oklahoma - EUA, verificaram correlações acima de 0,7 com a mesma dependência espacial para diferentes períodos de acumulação (5 min, 15 min, 1 hora e 3 horas). Para distâncias maiores a correção tende a diminuir ainda mais, como mencionado por Delahaye et al. (2015), que ao analisarem 57 pluviômetros com distâncias de 10 a 500 km entre pares encontraram correlações variando de 0,1 a 0,4 para precipitações diárias.

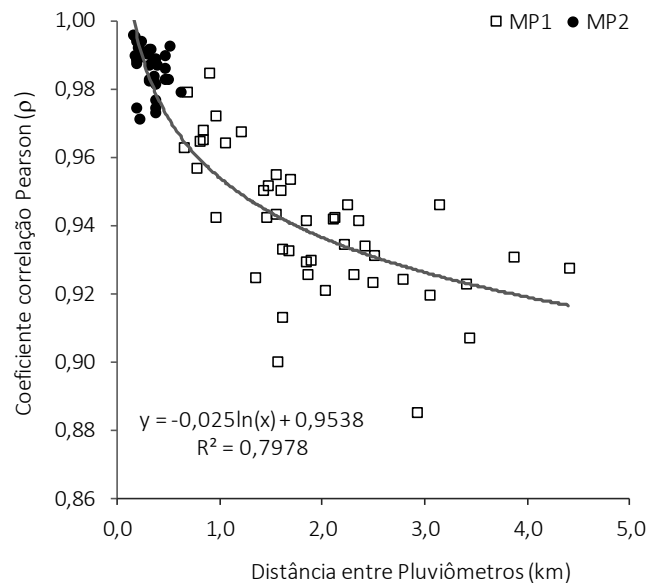


Figura 8. Coeficiente de correlação de Pearson para cada par de pluviômetros e as respectivas distâncias entre os equipamentos para as malhas MP1 e MP2.

4.3.5. Variabilidade da precipitação para períodos de produção de Soja

De cada uma das séries de dados de precipitação, das malhas pluviométricas MP1 e MP2, foram separados os três segmentos de dados de precipitação, respectivamente com 130, 120 e 110 dias contínuos de medidas, iniciando em 15 de novembro de 1993 (MP1) ou 2016 (MP2), 15 de dezembro de 1993 (MP1) ou 2016 (MP2) e 15 de janeiro de 1994 (MP1) ou 2017 (MP2), a fim de analisar a variabilidade da precipitação em períodos recomendados para a produção de soja em Piracicaba, SP (Figuras 9 e 10).

Em relação a MP1, no primeiro segmento de dados (15/11/93 a 24/03/1994) foram registrados 46 dias chuvosos, sendo 20 dias com no mínimo $10,0 \text{ mm dia}^{-1}$ (Figura 9A). O volume médio acumulado ao longo dos 130 dias foi de 634,6 mm. Analisando a precipitação de cada um dos pluviômetros da MP1, durante esses 130 dias, obteve-se um desvio padrão médio para o ciclo de $3,77 \text{ mm dia}^{-1}$, com valor máximo de $13,5 \text{ mm dia}^{-1}$. Ao analisar a precipitação acumulada em cada ponto da malha amostral, e novamente quantificar as diferenças entre pontos, observa-se um aumento temporal do desvio padrão, que ao final do ciclo chegou aos 22,3 mm, valor que se aproxima de 5% da demanda de água de um cultivo de soja na região de estudo (Oliveira, 2018).

Durante o segundo segmento analisado da MP1, de 15/12/1993 à 13/04/1994, foram registrados 42 dias com precipitação, 4 dias a menos em relação ao primeiro ciclo, ponderando que nesse caso o segmento tem 10 dias a menos (Figura 9B). Desse total, em 18 dias a precipitação acumulada foi ao menos de 10 mm dia^{-1} . A precipitação média acumulada nesse

segundo segmento foi de 597,3 mm, 37,3 mm a menos que no primeiro segmento. Ao longo dos 120 dias avaliados o desvio padrão médio foi de 3,6 mm dia⁻¹. O DP máximo foi de 13,5mm dia⁻¹, em 9 de fevereiro de 1994, quando a precipitação foi de 19,3mm dia⁻¹, considerando um mínimo de 1,3 mm dia⁻¹ (P9) e máximo de 31,8 mm dia⁻¹ (P6). Ainda em relação às diferenças entre os pontos de medida da MP1, ao final do segundo segmento analisado (120 dias) o desvio padrão em relação aos dados dos nove pluviômetros era de 24,0mm, muito próximo ao registrado para o primeiro segmento (Figura 9A).

O terceiro segmento de dados de precipitação da MP1, com 110 dias contados a partir de 15 de janeiro de 1994 (Figura 9C), contabilizou 40 dias chuvosos. Desses, 15 dias tiveram precipitação acumulada de no mínimo 10 mm dia⁻¹. A precipitação média acumulada pelos nove pluviômetros da malha MP1 foi de 544,8mm, respectivamente 14,2% e 8,8% a menos que no primeiro (Figura 9A) e segundo (Figura 9B) segmentos, ressaltando as diferenças temporais entre os três. Em relação a variação entre os pontos de medição ao longo dos 110 dias, o desvio padrão médio para o ciclo foi de 4,0 mm dia⁻¹, com um CV máximo de 13,5 mm dia⁻¹. Temporalmente, o desvio padrão em relação ao acumulado em cada ponto, nos 110 dias de medição, ficou em 29,7 mm, confirmando a variabilidade e uma provável implicação na produtividade simulada para cada ponto de medição.

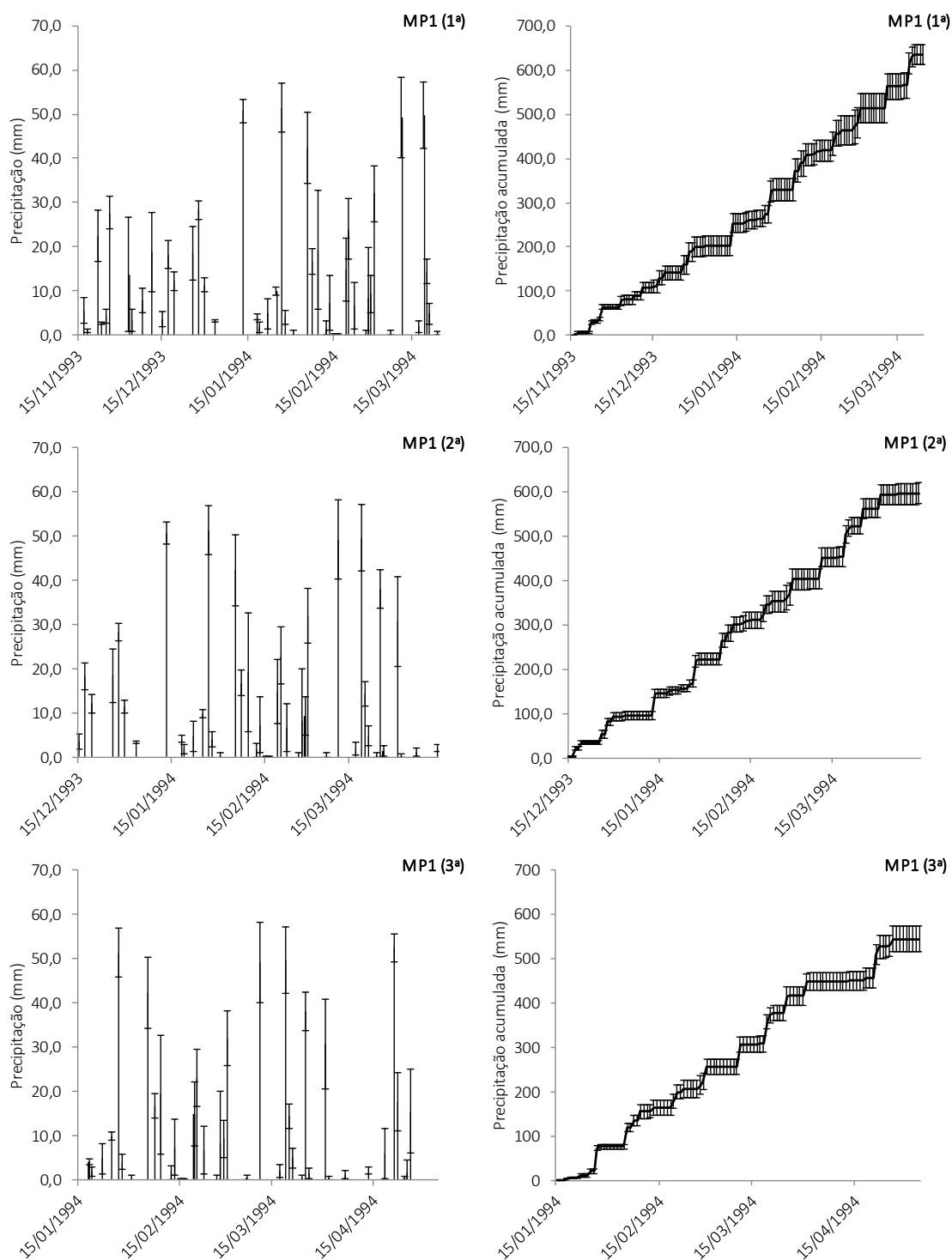


Figura 9. Precipitação diária e acumulada durante os três segmentos da malha MP1, com 130 [MP1(1ª)], 120 [MP1(2ª)] e 110 [MP1(3ª)] dias, respectivamente contabilizados a partir de 15/11/1993, 15/12/1993 e 15/01/1994, coincidentes a períodos de produção de soja em Piracicaba (SP).

Em relação aos dados coletados a partir da malha pluviométrica MP2, para cada segmento (Figura 10) fez-se, igualmente, a caracterização da variabilidade da precipitação para

períodos coincidentes à produção de soja em Piracicaba/SP, revelando distinção na distribuição, com proeminência para as diferenças entre segmentos.

No primeiro segmento da MP2, de 130 dias (15/11/2016 à 14/03/2017), foram registrados 80 dias chuvosos, sendo 27 dias com pelo menos 10 mm dia⁻¹ (Figura 10A). O volume total acumulado foi de 708,7 mm. Avaliando os dados de precipitação para os 130 dias, foi constatado que o desvio padrão médio da malha foi de 1,1mm dia⁻¹. Mesmo o valor máximo de DP foi baixo, de 4,3mm dia⁻¹. Ao analisar a precipitação acumulada em cada pluviômetro e novamente quantificar as diferenças entre pontos, observa-se um aumento temporal do desvio padrão, que ao final desse segmento de 130 dias era de 26,6 mm (Figura 10A).

Já para o segundo segmento (Figura 10B), de 120 dias consecutivos a partir de 15/12/2016, foram 68 dias chuvosos, 12 dias a menos que durante o primeiro segmento da MP2 (Figura 10A). Do total, 25 dias tiveram chuva acumulada igual ou maior que 10 mm dia⁻¹. A precipitação média acumulada pela malha, durante os 120 dias, foi de 669,8 mm, 38,9 mm a menos que no primeiro segmento (Figura 10A), esse com 130 dias. Em relação às diferenças entre pluviômetros, o desvio padrão médio para o período de 120 dias ficou em 1,2 mm dia⁻¹. O máximo valor de desvio padrão desse segundo segmento de dados da MP2 foi de 8,1 mm dia⁻¹, registrado no dia 6 de abril de 2017, quando a precipitação média acumulada pela malha foi de 79,3mm dia⁻¹, o dobro em relação a desvio padrão máximo registrado para o primeiro segmento (Figura 10A). Ao fim dos 120 dias de medidas o desvio padrão para precipitação acumulada chegou aos 31,4 mm, superando a diferença temporal do primeiro segmento (Figura 10A), mais uma vez indicando a probabilidade de se ter variabilidade espacial da produtividade motivada por um elemento meteorológico, no caso a precipitação.

Embora a diferença entre as precipitações médias acumuladas entre os dois primeiros segmentos analisados da MP2 (Figura 10A e 10B) tenha sido pequena, de 5,5%, as distribuições temporais naturalmente mostraram-se diferentes, caracterizando o quão distinto pode ser a influência meteorológica sobre uma produção efetivada em diferentes períodos do ano, num mesmo local.

Ao longo dos 110 dias do terceiro segmento analisado da MP2 (Figura 10C), de 15 de janeiro a 4 de maio de 1994, foram registrados 53 dias chuvosos, 21 dias com pelo menos 10 mm dia⁻¹ acumulados. Aos 110 dias a precipitação média acumulada pelos nove pluviômetros da malha MP2 foi de 549,4mm, respectivamente 22,4% e 18,0% a menos que no primeiro (Figura 10A) e segundo (Figura 10B) segmentos. Em relação às diferenças de medida entre pluviômetros ao longo dos 110 dias, o desvio padrão médio para o ciclo foi de 1,38 mm dia⁻¹, com valor máximo de 8,0 mm dia⁻¹. Temporalmente, o desvio padrão em relação ao acumulado em cada ponto nos 110 dias de medição ficou em 24,9 mm (Figura 10C).

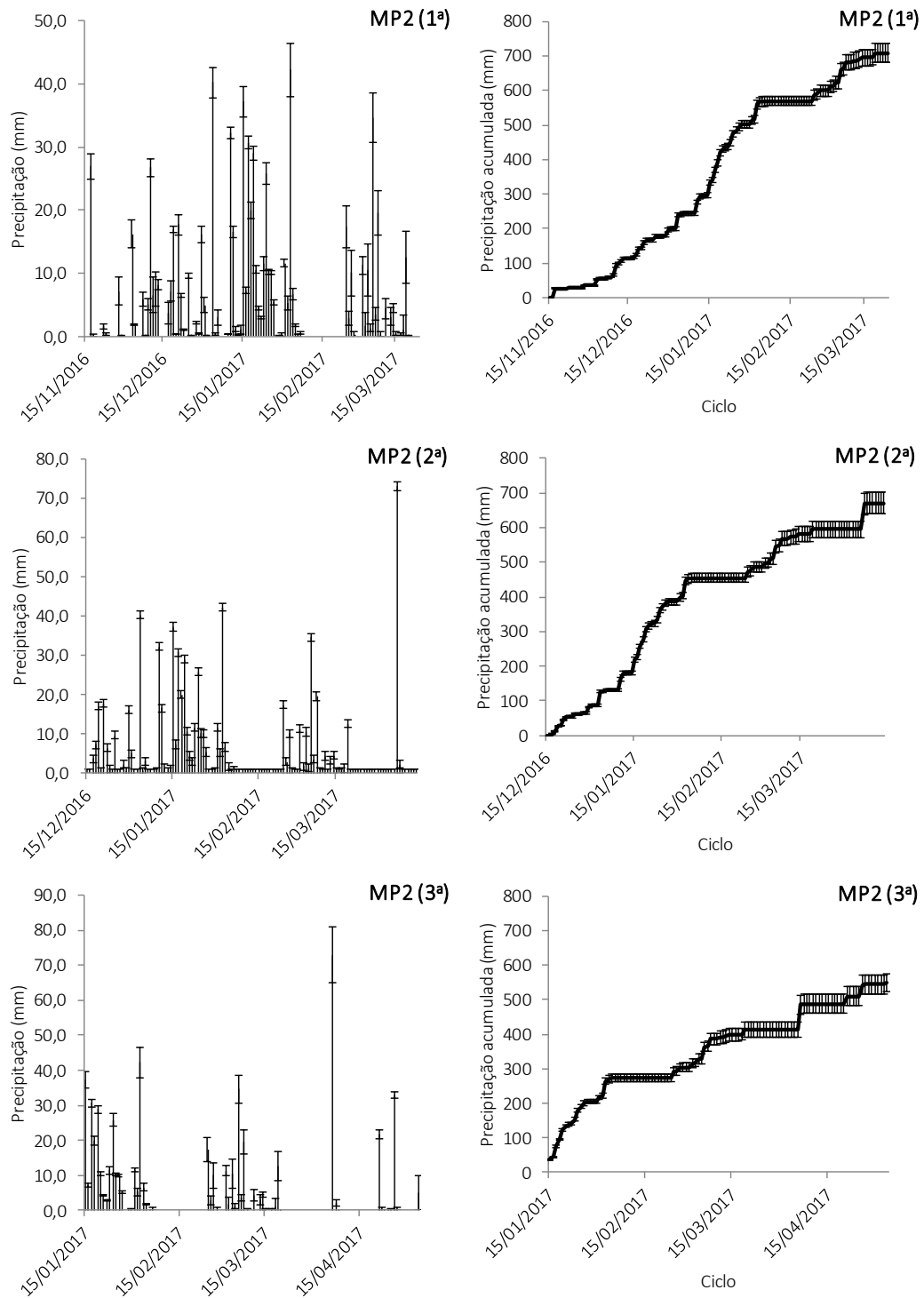


Figura 10. Precipitação diária e acumulada durante os três segmentos da malha MP2, com 130 [MP2(1ª)], 120 [MP2(2ª)] e 110 [MP2(3ª)] dias, respectivamente contabilizados a partir de 15/11/2016, 15/12/2016 e 15/01/2017, coincidentes a períodos de produção de soja em Piracicaba (SP).

As reduções da precipitação acumulada do primeiro ao terceiro segmento (5,9% do primeiro ao segundo e 14,1% do primeiro para o terceiro) da malha MP1 (Figuras 9) foram inferiores a reduções de 7,7% (130 a 120 dias) e 15,4% (130 a 110 dias) no tempo. Da mesma

forma, analisando dados da MP2 foi verificada uma redução de 5,5% da precipitação acumulada entre o primeiro (130 dias) e segundo (120 dias) segmentos (Figura 10), mais uma vez inferior a redução de tempo. Entretanto, para essa malha pluviométrica, a redução da precipitação acumulada, em 22,5% do primeiro ao terceiro (110 dias) segmento, foi proporcionalmente superior a redução de tempo entre os referidos segmentos.

Battisti (2016), ao apresentar resultados para sucessivas datas de semeadura da soja para Piracicaba (SP), define que há redução do potencial de produção em relação ao atraso da semeadura, devido à deficiência hídrica. Os resultados (Figuras 9 e 10), que em maioria não caracterizaram redução da precipitação acumulada proporcionalmente ao tempo dos segmentos de dados analisados, podem resultar em deficiência desde que a condição energética determine diferenças em evapotranspiração da cultura que extrapole as diferenças temporais (Figuras 11 e 12). Além disso, as diferenças observadas entre os pontos de medida de cada uma das malhas (Figuras 9 e 10), refletindo em diferenças no tempo, muito provavelmente causariam diferenças produtivas entre os pontos.

Além da precipitação, a temperatura do ar e a radiação solar global (Q_g) também foram avaliadas para os segmentos relativos a período de produção de soja (Figuras 11 e 12). Contudo, diferentemente da precipitação, medida individualmente em cada um dos nove pontos da MP1 e MP2 (Figura 1), esses dois elementos meteorológicos não tiveram a variabilidade quantificada dentro das malhas, possuindo apenas um dado diário para cada malha (Figuras 11 e 12).

A temperatura média do ar apresentou pouca variação entre os três segmentos de dados relativos a ciclos teóricos de produção de soja (Tabelas 11 e 12). Da MP1, no primeiro segmento a temperatura média foi de $24,2^{\circ}\text{C}$, com pequena tendência de decréscimo temporal (Figura 11A). Para o segundo segmento dessa mesma malha (Figura 11B) uma condição térmica muito similar ao primeiro (Figura 11A), com temperatura média de $24,5^{\circ}\text{C}$, e tendência de decréscimo térmico, dessa vez maior que a registrada para o primeiro segmento. Já o terceiro segmento (Figura 11C), apesar da temperatura média, de $24,3^{\circ}\text{C}$, mais uma vez ser próxima a dos dois segmentos prévios (Figuras 11A e 11B), o atraso da semeadura acaba submetendo a cultura a um decréscimo térmico mais intenso ($-0,04^{\circ}\text{C dia}^{-1}$).

A radiação solar global, que desempenha um papel fundamental no crescimento e desenvolvimento vegetal, também apresentou valores acumulados distintos ao longo de cada segmento. Em relação aos dados da MP1, no primeiro segmento a radiação solar acumulada foi de $2177,3 \text{ MJ m}^{-2}$ (Figura 11A) no segundo de $2058,6 \text{ MJ m}^{-2}$ (Figura 11B) e no terceiro de $1952,4 \text{ MJ m}^{-2}$ (Figura 11C) A diferença de um ciclo para o outro foi de aproximadamente de 5%, sendo que do primeiro para o terceiro a redução de energia radiante foi de 10,33%.

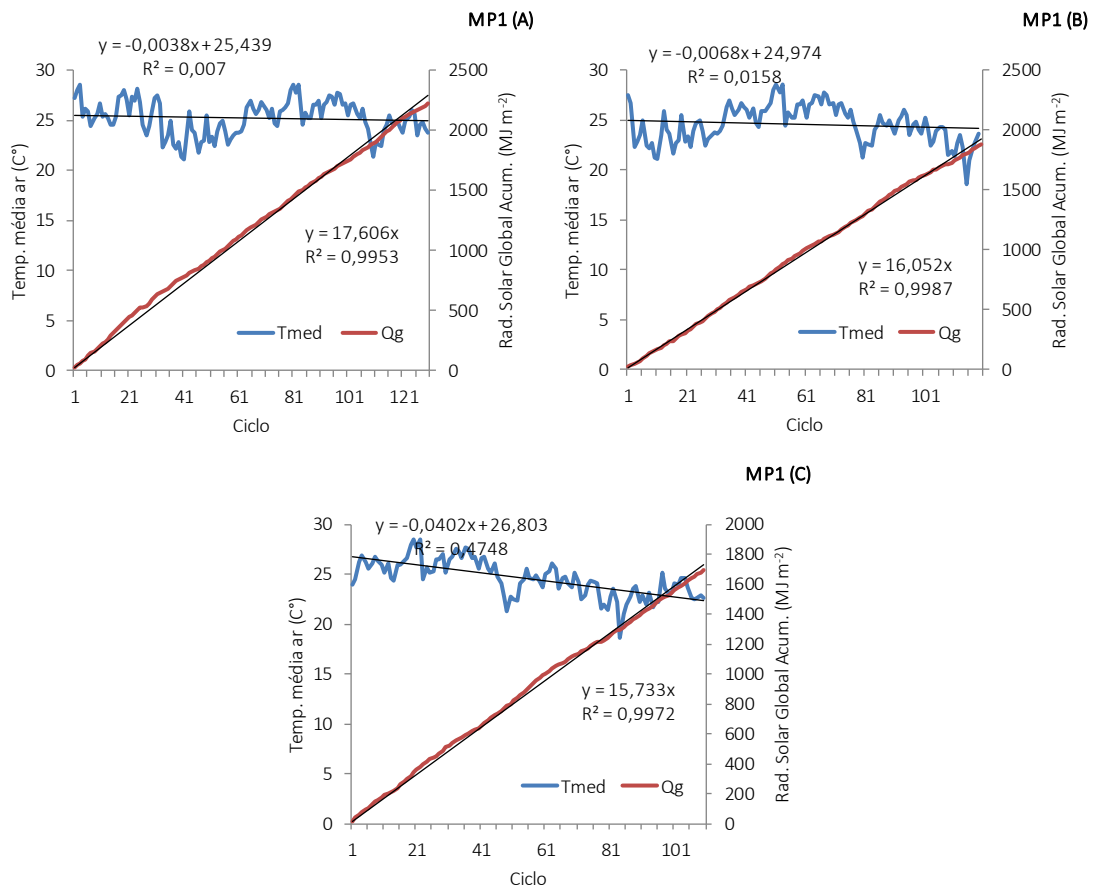


Figura 11. Temperatura média do ar e radiação solar global acumulada ao longo dos segmentos relativos a ciclos de produção de soja da MP1, contabilizados a partir de 15/11/1993 (A), 15/12/1993 (B) e 15/01/1994 (C).

Para a MP2, a temperatura média do ar no primeiro segmento foi de 24,2°C (Figura 12A), com tendência positiva ao longo do ciclo, ao contrário do segundo (Figura 12B) e terceiro (Figura 12C) segmentos, ambos com tendência de redução temporal da temperatura média do ar, que apresentaram valores médios de 24,1°C e 23,0°C.

Em relação à MP2, a radiação solar global acumulada no primeiro (Figura 12A) e segundo (Figura 12B) segmentos foram similares, chegando aos 2573,3 e 2502,1 MJ m⁻², respectivamente. No terceiro segmento (Figura 12C), apesar do menor volume precipitado (Figura 10C) e, portanto, provável maior tempo de céu claro, a redução do fotoperíodo e consequentemente disponibilidade de energia radiante (Qg) resultou em 2233,1 MJ m⁻² acumulados, média de 12% a menos energia radiante em relação aos dois segmentos anteriores.

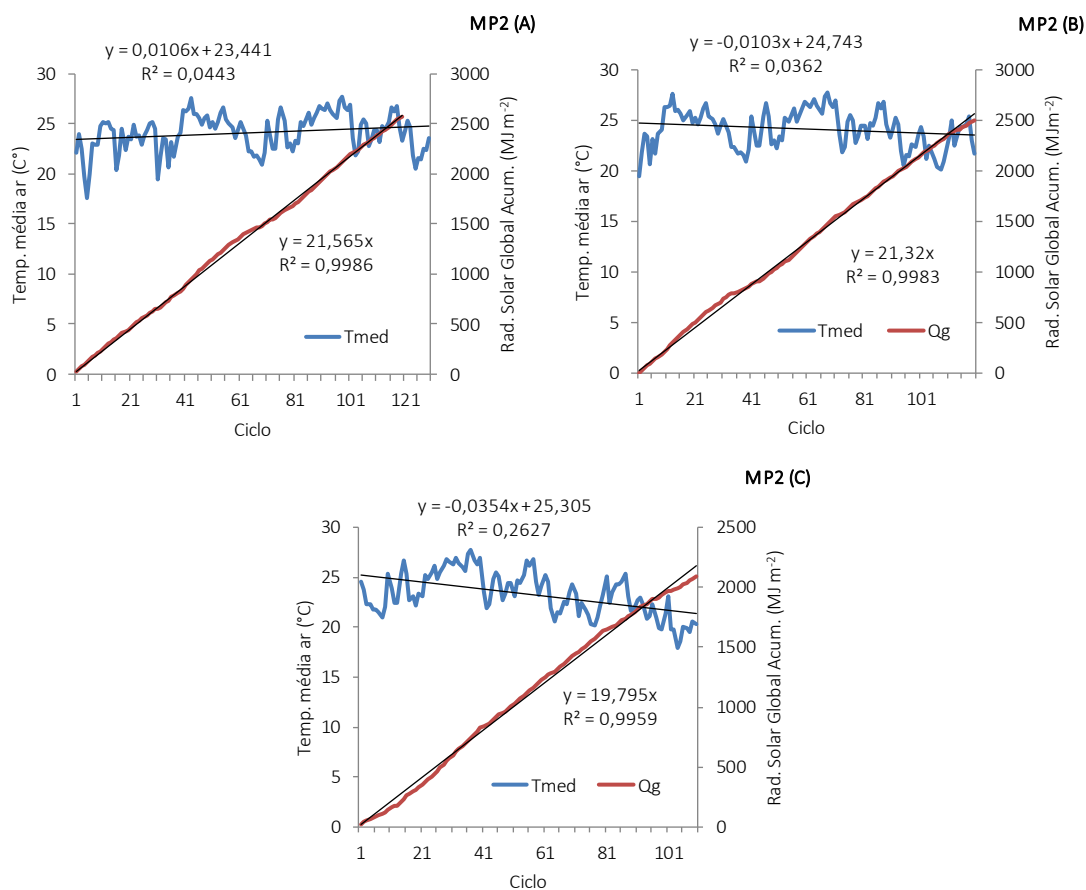


Figura 12. Temperatura média do ar e radiação solar global acumulada ao longo dos segmentos relativos a ciclos de produção de soja da MP2, contabilizados a partir de 15/11/2016 (A), 15/12/2016 (B) e 15/01/2017 (C).

Os valores de temperatura média dos três segmentos, das malhas MP1 (Figura 11) e MP2 (Figura 12) são favoráveis ao crescimento e desenvolvimento da cultura da soja (Farias et al., 2007). Também não foram observadas temperaturas críticas que, abaixo ou acima delas, poderiam afetar o crescimento e desenvolvimento da soja.

A redução da radiação solar global acumulada devido ao atraso da semeadura e redução do ciclo de desenvolvimento pode resultar em redução do potencial de produção da cultura da soja (PP). Zanon et al. (2016) descrevem, para o Rio Grande do Sul, que o atraso da semeadura da soja expõe as plantas à redução da temperatura do ar e da radiação solar (Figuras 11 e 12), especialmente durante estádios reprodutivos, o que explica a penalidade de rendimento de $26 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ para lavouras semeadas a partir de 4 de novembro, para safras sem limitação de água.

4.3.6. Variabilidade da produtividade simulada da soja

A partir do conjunto de modelos, conforme preconizado por Asseng et al. (2013) e Martre et al. (2015), foram estimadas a produtividade potencial (PP, kg ha^{-1}), a produtividade

atingível (PA, kg ha⁻¹) e a perda produtiva relativa (Yg, %) para as áreas de 1000 ha (MP1) e de 36 ha (MP2) (Tabelas 5 e 6). As simulações, feitas individualmente para cada um dos nove pontos de medida da precipitação das malhas MP1 e MP2 (Figura 1), procuraram isolar o efeito da variabilidade da precipitação sobre a PA e a Yg da soja. Para isso, o solo das duas áreas foi considerado homogêneo quanto à capacidade de armazenamento de água, fator que afetaria as simulações, reduzindo ou aumentando os desvios entre dados de produtividade independentemente da precipitação.

Em relação à MP1, como as simulações não contemplaram a variabilidade espacial da temperatura do ar e da radiação solar global (Figura 11), usando-se de um mesmo conjunto de dados diários para todos os nove pontos (Figura 1), a produtividade potencial (PP) estimada foi variável apenas entre as datas de semeadura. A simulação feita para data de semeadura de 15 de novembro de 1993 resultou em uma PP de 5654,3 kg ha⁻¹. Os resultados também mostraram redução da PP com o atraso da semeadura da soja, passando a 5320,0 kg ha⁻¹ e 4594,3 kg ha⁻¹ para as simulações iniciadas em 15 de dezembro de 1993 e 15 de janeiro de 1994, respectivamente.

Cabe ressaltar que o atraso da semeadura e consequentes reduções dos ciclos de produção geraram uma diminuição da disponibilidade de energia radiante (Figura 11), causa principal da diminuição da produção potencial da soja (Battisti et al. 2013). Os valores de PP se assemelham dos valores de PP descritos por Battisti (2016) e Figueiredo (2018) para Piracicaba (SP), para o mesmo período de semeadura.

Para a MP1, a produtividade atingível (PA) (Tabela 5), condicionada à disponibilidade hídrica, refletiu a variabilidade da precipitação entre os nove pontos de medição da MP1 (Figura 9) nos três segmentos. Dados de PA para semeadura simulada de 15 de novembro de 1993 apontam para uma média de 3951,2 kg ha⁻¹, com desvio padrão de 132,8 kg ha⁻¹. Variabilidade similar da PA foi observada para as outras duas datas de semeadura, quando a PA média foi de 4005,9 (±160,8) kg ha⁻¹ para 15 de dezembro de 1993 e de 3261,5 (±127,6) kg ha⁻¹ para a semeadura de 15 de janeiro de 1994.

Tabela 5. Precipitação acumulada (mm), produtividade atingível (PA) e perda produtiva relativa (Yg) simulada para soja, para cada ponto da malha pluviométrica MP1. Datas teóricas de semeadura: 15 de novembro de 1993, 15 de dezembro de 1993 e 15 de janeiro de 1994. Resultados do agrupamento dos modelos FAO – Zona Agroecológica, MONICA e DSSAT.

Ponto	Data de semeadura								
	15/nov/1993			15/dez/1993			15/jan/1994		
	Prec. acum. (mm)	PA (Kg ha ⁻¹)	Yg (%)	Prec. acum. (mm)	PA (Kg ha ⁻¹)	Yg (%)	Prec. acum. (mm)	PA (Kg ha ⁻¹)	Yg (%)
P1	605,2	3752,2	33,6	583,4	3927,0	26,2	534,9	3250,5	29,2
P2	628,1	4101,9	27,5	566,1	4151,5	22,0	495,4	3277,2	28,7
P3	616,1	3951,6	30,1	595,8	3982,9	25,1	564,1	3372,4	26,6
P4	623,9	3908,9	30,9	571,6	3846,3	27,7	525,0	3036,1	33,9
P5	660,3	4000,3	29,3	599,4	3924,3	26,2	532,8	3180,6	30,8
P6	645,6	4067,3	28,1	615,4	4076,1	23,4	571,7	3324,3	27,6
P7	645,8	4006,5	29,1	617,1	4048,6	23,9	554,3	3208,8	30,2
P8	671,0	4043,0	28,5	641,2	4309,6	19,0	595,7	3488,4	24,1
P9	615,3	3728,7	34,1	585,8	3787,2	28,8	529,5	3215,6	30,0
Média	634,6	3951,2	30,1	597,3	4005,9	24,7	544,8	3261,5	29,0
DP	22,3	132,8	2,3	24,0	160,8	3,0	29,8	127,6	2,8
CV	3,5	3,4	7,8	4,0	4,0	12,2	5,5	3,9	9,6

A produtividade atingível média obtida para a semeadura de 15 de dezembro se mostrou superior à semeadura mais precoce, mesmo possuindo ciclo e produtividade potencial menor (Tabela 7). Ocorre que a condição hídrica, por conta da distribuição temporal da precipitação (Figura 9), coincidindo aos estágios de desenvolvimento reprodutivo, foi melhor nesse segundo segmento.

Em relação ao ciclo simulado a partir de 15 de novembro de 1993, a perda produtiva relativa média (Yg) foi de 30,1%, apresentando um desvio padrão de 2,3% em relação aos nove pontos amostrais da MP1 (Tabela 5). Nesse primeiro segmento a precipitação média foi de 634,6mm, com desvio padrão de 22,3 mm (Tabela 5). Nesse caso, usando-se dos resultados do coeficiente de variação, observa-se que a variabilidade da produtividade atingível, com base no coeficiente de variação de 3,4%, refletiu a variabilidade da precipitação, que teve um CV de 3,5%.

As perdas produtivas simuladas (Yg) para o terceiro ciclo de produção (mais tardio) da MP1 foram intermediárias em relação aos dois primeiros, com médias de 29% (Tabela 5). Apesar do desvio padrão da precipitação, de 29,8 mm, e do CV de 5,5%, serem maiores que os observados para os dois primeiros ciclos de produção (Figura 9), o coeficiente de variação da PA, de 3,9%, não foi o maior (Tabela 5). Esse resultado reitera que não há relação direta entre

a precipitação acumulada e a PA para um ciclo produtivo, pois mesmo com maior variabilidade, os reflexos de um período de estiagem dependem do estágio fenológico da cultura, podendo-se ter maior ou menor influência de acordo com a susceptibilidade da planta ao estresse hídrico.

Da mesma forma, as simulações feitas a partir dos dados da MP2 (Tabela 6) não contemplaram variabilidade espacial da temperatura do ar e da radiação solar global (Figura 12). O agrupamento dos modelos estimou produtividade potencial de 6366,0 kg ha⁻¹, de 5964,7 kg ha⁻¹ e de 4942,0 kg ha⁻¹ respectivamente para os segmentos iniciados em 15 de novembro de 2016, 15 de dezembro de 2016 e 15 de janeiro de 2017. Os resultados de PP para as mesmas datas de semeadura, em função dos dados de temperatura do ar e radiação solar global (Figuras 11 e 12), foram similares, novamente corroborados pelos resultados descritos por Battisti (2016) e Figueiredo (2018).

A produtividade atingível (PA) média dos três modelos (Tabela 6) mais uma vez revelou como um elemento meteorológico pode ser fonte de variabilidade de produtividade dentro de áreas de produção (O'Neal et al., 2002). A PA média para o primeiro segmento (semeadura em 15 de novembro de 2016) foi de 4247,0 kg ha⁻¹, com desvio padrão de 101,0 kg ha⁻¹. Para os outros dois segmentos analisados os resultados mostraram a mesma tendência, com PA de 3645,8 (±198,3) kg ha⁻¹ para o segundo e de 2392,0 (±154,9) kg ha⁻¹ para terceiro segmento (Tabela 6).

As perdas produtivas simuladas (Yg) em função da disponibilidade hídrica para a MP2 (Tabela 6) foram superiores às determinadas para a MP1 (Tabela 5) para todas as datas de semeadura. Para a primeira data de semeadura (15 de novembro) a malha MP2 a perda foi de 34%, passando para 38,8% e 51,2% para semeaduras simuladas em 15 de dezembro de 2016 e 15 de janeiro de 2017 (Tabela 6). Apesar das reduções do ciclo de produção com atraso da semeadura, a redução da precipitação acumulada, que extrapolou as reduções de tempo de ciclo e, logicamente, a distribuição temporal ao longo do ciclo de produção (Figura 10), foram as responsáveis pelas maiores perdas produtivas registradas na MP2.

Tabela 6. Precipitação acumulada (mm), produtividade atingível (PA) e perda produtiva relativa (Yg) simulada para soja, para cada ponto da malha pluviométrica MP2. Datas teóricas de semeadura: 15 de novembro de 2016, 15 de dezembro de 2016 e 15 de janeiro de 2017. Resultados do agrupamento dos modelos FAO – Zona Agroecológica, MONICA e DSSAT.

Ponto	Data de semeadura 15/nov/2016			Data de semeadura 15/dez/2016			Data de semeadura 15/jan/2017		
	Prec. acum. (mm)	PA (Kg ha ⁻¹)	Yg (%)	Prec. acum. (mm)	PA (Kg ha ⁻¹)	Yg (%)	Prec. acum. (mm)	PA (Kg ha ⁻¹)	Yg (%)
P1	701.4	4275.3	33.7	655.2	3712.3	37.9	524.3	2449.6	49.9
P2	742.5	4467.8	30.7	707.7	4116.3	31.2	592.1	2765.3	43.7
P3	695.7	4266.7	33.8	646.7	3673.2	38.3	516.2	2424.0	50.5
P4	673.2	4249.3	34.0	621.9	3624.9	39.1	500.9	2327.5	52.3
P5	698.3	4220.4	34.4	645.7	3606.4	39.4	529.9	2386.7	51.4
P6	702.7	4215.5	34.5	643.6	3583.4	39.7	521.5	2321.0	52.7
P7	688.7	4239.3	34.1	637.9	3544.2	40.4	517.2	2291.2	53.3
P8	699.2	4210.8	34.6	645.4	3558.7	40.1	526.8	2328.8	52.5
P9	651.1	4077.8	36.5	598.7	3392.4	42.9	483.8	2234.4	54.2
Média	694.8	4247.0	34.0	644.8	3645.8	38.8	523.6	2392.0	51.2
DP	24.5	101.0	1.5	29.1	198.3	3.2	29.5	154.9	3.1
CV	3.5	2.4	4.4	4.5	5.4	8.2	5.6	6.5	6.1

Analisando os dados de produtividade atingível de cada ponto amostral das duas malhas para todos os três segmentos de produção analisados (Tabelas 5 e 6), reinter-se que não há relação direta entre a precipitação acumulada e a produtividade atingível de um ciclo de produção de soja (Figura 13). A partir da abordagem proposta por van Ittersun et al. (2013), de uma *'boundary layer'*, elucidam-se as diferenças produtivas (Ya) devido a distribuição temporal da chuva durante o cultivo da oleaginosa.

Purcell & Specht (2004) ressaltam que não apenas a quantidade total, mas também a distribuição do abastecimento de água durante a estação de crescimento (Figuras 9 e 10) podem explicar as diferenças produtivas da soja. Essa interpretação é de extrema importante na análise da relação entre produtividade e o manejo das áreas de produção de soja (Grassini et al., 2015; Zanon et al., 2016), especialmente em áreas conduzidas com agricultura de precisão, onde deseja-se entender e trabalhar a variabilidade produtiva.

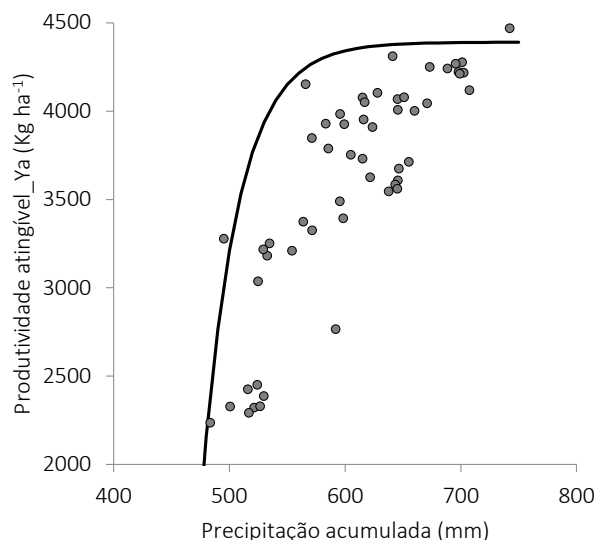


Figura 13. Correlação entre a produtividade atingível (Y_a) da soja e a precipitação acumulada no ciclo, referente as simulações de cada ponto amostral das malhas MP1 e MP2 para os três segmentos de produção de soja analisados. A linha contínua representa a '*boundary layer*' para produtividade atingível (Y_a).

A variabilidade espacial de produtividade associada à precipitação (Tabelas 5 e 6, Figura 13) conjuntamente analisada com manejo, solo, topografia, pragas e doenças (Paz et al., 1998; Kravchenko & Bullock, 2002; Kravchenko et al., 2005; Verhulst et al., 2009) acaba evidenciando que em áreas bem manejadas, a disponibilidade hídrica é a principal causa de perda produtiva.

4.4. Conclusões

O objetivo deste artigo foi analisar as incertezas em relação a homogeneidade da precipitação em áreas hipotética de produção de soja, com 1000 ha e 36 ha. A motivação para o trabalho foi a de analisar como o fator meteorológico pode estar relacionado à variabilidade de produtividade em áreas de produção. Para isso, dados de dois experimentos foram usados, ambos com nove pluviômetros dentro de uma área 1000 ha (MP1) e 36 ha (MP2). Na primeira parte do trabalho a variabilidade da precipitação acumulada foi estimada de diferentes maneiras, a fim de identificar a variabilidade e, assim, a incerteza sobre a homogeneidade e uso de um único medidor para representar a precipitação na área. Na primeira seção do trabalho a abordagem usou do desvio padrão e do coeficiente de variação (CV) como uma medida da variabilidade. Na área de 1000 ha (MP1) o desvio padrão chegou aos 13,5mm, ocasião em que a média da malha foi de 19,3mm. Para a área de 36 ha (MP2), por conta da maior proximidade entre sensores, o máximo desvio padrão identificado foi de 6,8mm, ocasião em que a precipitação média da malha foi de 57,3mm. Os valores de CV diminuem com o aumento

precipitação, indicando que a maior variabilidade está em eventos com volume acumulado médio de precipitação de menos de 10 mm. Para as distâncias entre pluviômetros a análise mostrou uma forte correlação entre os medidores, que diminuiu um pouco com a separação dos sensores, significando variabilidade sobre a área. Na segunda seção o estudo determinou a variabilidade da precipitação e o possível efeito dessa variabilidade na produtividade da soja, a partir de simulações, para três datas de semeadura. Os dados de precipitação descreveram a variabilidade entre os pontos de medição, tanto como as diferenças em relação às diferentes datas de semeadura simuladas. A produção de soja foi simulada por três modelos, utilizando a média do conjunto. O efeito da variabilidade da precipitação sobre a produtividade atingível foi determinada a partir do desvio padrão e CV. A partir dos dados da MP1 foi observado, para a produtividade atingível, desvio padrão de até 160 kg ha⁻¹. Para a MP2 o desvio padrão em relação à produtividade atingível média chegou aos 198,3 kg ha⁻¹, unicamente devido a variabilidade de precipitação. Os resultados também evidenciaram a influência da variabilidade temporal da precipitação em relação à fenologia da cultura, podendo-se ter maior ou menor influência conforme a susceptibilidade da cultura ao estresse hídrico.

4.5. Referências

- Almeida CT, Oliveira-Júnior JF, Delgado RC, Cubo P, Ramos MC (2016) Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973–2013. *Int. J. Clim.* 37:2013-2026. DOI: 10.1002/joc.4831
- Alvares C A, Stape J L, Sentelhas PC, Gonçalves, JL de M, Sparovek G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22(6):711-728. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- Amado T, Pontelli CB, Santi AL, Viana J, Sulzbach LA de S (2007). Spatial and temporal variability of grain yield under no-tillage cropping system. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 42(8):1101–1110. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000800006>.
- Ashouri H, Hsu K, Sorooshian S, Braithwaite DK, Knapp KR, Cecil LD, Nelson BR, Prat OP (2015) PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. *American Meteorological Society* 96:69-83. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00068.1>
- Asseng S, Ewert F, Rosenzweig C, Jones JW, Hatfield JL, Ruane AC, Boote KJ, Thorburn PJ, Rötter RP, Cammarano D, Brisson N, Basso B, Martre P, Aggarwal PK, Angulo C, Bertuzzi P, Biernath C, Challinor AJ, Doltra J, Gayler S, Goldberg R, Grant R, Heng L, Hooker J, Hunt LA, Ingwersen J, Izaurralde RC, Kersebaum KC, Müller C, Naresh Kumar S, Nendel C, O'leary G, Olesen JE,

Osborne TM, Palosuo T, Priesack E, Ripoche D, Semenov MA, Shcherbak I, Steduto P, Stöckle C, Stratonovitch P, Streck T, Supit I, Tao F, Travasso M, Waha K, Wallach D, White JW, Williams JR, Wolf J (2013). Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. **Nature Climate Change**, 3(9):827-832. DOI: 10.1038/NCLIMATE1916

Battisti R. (2016) Calibration, uncertainties and use of soybean crop simulation models for evaluating strategies to mitigate the effects of climate change in Southern Brasil. 188p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2016.

Battisti R, Sentelhas, PC, Boote KJ (2017) Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in southern Brazil. **Field Crops Research**, 200:28-37. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.10.004>

Battisti R, Sentelhas PC, Pilau FG, Wollmann CA (2013). Eficiência climática para as culturas da soja e do trigo no estado do Rio Grande do Sul em diferentes datas de semeadura. **Cienc. Rural** 43(3):390-396. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000300003>.

Bega RM, Vieira SR, Maria IC de, Dechen SNF, Castro OM de (2005). Variabilidade espacial das precipitações pluviométricas diárias em uma estação experimental, em Pindorama, SP. **Bragantia**, 64(1):149-156. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052005000100016>.

Boote KJ, Jones JW, Batchelor WD, Nafziger ED, Myers O (2003) Genetic coefficients in the CROPGRO-soybean model: Links to field performance and genomics. In: *Agronomy Journal*, 1, Anais...jan.

Boote KJ, Jones JW, Hoogenboom G (1998) "Simulation of crop growth: CROPGRO model," in *Agricultural Systems Modeling and Simulation*, eds R. M. Peart, and R. B. Curry, (New York, NY: Marcel Dekker), 651–692. doi: 10.1201/9781482269765-18

Box GEP, Cox DR (1964) An Analysis of Transformations. **Journal of Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**, 26(2):211-252. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x>

Camargo MBP, Brunini O, Junior MJP, Bardin L (2005) Variabilidade espacial e temporal de dados termopluviométricos diários da rede de estações agrometeorológicas do Instituto Agrônomo (IAC). **Bragantia** 64(3):473-483. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052005000300018>

Camargo MBP, Hubbard KG (1999) Spatial and temporal variability of daily weather variables in sub-humid and semi-arid areas of the united states high plains. **Agricultural and Forest Meteorology** 93(2):141-148. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(98\)00122-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(98)00122-1)

Chierice RAF, Landim PMB (2014). Variabilidade espacial e temporal de precipitação pluviométrica na bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu. **Revista Geociências** 33(1):157-171.

Ciach GJ, Krajewski WF (2006) Analysis and modeling of spatial correlation structure in small-

scale rainfall in Central Oklahoma. **Advances in Water Resources** 29(10):1450-1463. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.11.003>

Dalchiavon FC, Rodrigues AR, de Lima ES, Lovera LH, Montanari R (2017) Variabilidade espacial de atributos químicos do solo cultivado com soja sob plantio direto **Revista de Ciências Agroveterinárias** 16(2):144-154. DOI: 10.5965/223811711622017144

Denner MT, James AT, Robertson MJ, Fukai S (1998) Optimum soybean cultivars for possible expansion area: a modelling approach. Proceedings 10th Australian Soybean Conference, Brisbane 15-17 September, 137-141.

Doorenbos J, Kassam AH (1979) Yield response to water. FAO irrigation and drainage paper No. 33. FAO, Rome, Italy, 193 pp

Emmanuel I, Andrieu H, Leblois E, Flahaut B (2012) Temporal and spatial variability of rainfall at the urban hydrological scale. **Journal of Hydrology** 430-431:162-172. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.013>

Emmanuel I, Andrieu H, Leblois E, Janey N, Payrastra O (2015) Influence of rainfall spatial variability on rainfall–runoff modelling: Benefit of a simulation approach? **Journal of Hydrology** 531:337-348. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.058>

Estévez J, Gavilán P, Giráldez JV (2011) Guidelines on validation procedures for meteorological data from automatic weather stations. **Journal of Hydrology** 402(1-2):144-154. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.031>

Faraco M A, Uribe-Opazo M A, Silva EAA, Johann JA, Borssoi JA (2008) Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciências do Solo** 32:463-476. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200001>

Farias JRB, Nepomuceno AL, Neumaier N (2007) Ecofisiologia da soja. LondrinaEmbrapa (Circular Técnica 48).

Funk C, Peterson P, Landsfeld M, Pedreros D, Verdin J, Shukla S, Husak G, Rowland J, Harrison L, Hoell A, Michaelsen J (2015) The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, 2:1-21 DOI: 10.1038/sdata.2015.66.

Gires A, Tchiguirinskaia I, Schertzer D, Schellart A, Berne A, Lovejoy S (2014) Influence of small scale rainfall variability on standard comparison tools between radar and rain gauge data. **Atmospheric Research** 138:125-138. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.11.008>

- Gleason ML, Duttweiler KB, Batzer JC, Taylor SE, Sentelhas PC, Monteiro JEBA, Gillespie TJ (2008) Obtaining weather data for input to crop disease-warning systems: leaf wetness duration as a case study. **Sci. Agric.** 65:76-87. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000700013>
- Graef F, Haigis J (2001) Spatial and temporal rainfall variability in the Sahel and its effects on farmers' management strategies. **Journal of Arid Environments** 48(2):221-231. doi:10.1006/jare.2000.0747
- Grassini P, Torrion JA, Yang HS, Rees J, Andersen D, Cassman KG, Specht JE (2015) Soybean yield gaps and water productivity in the Western U.S. Corn Belt. **Field Crops Research** 179:150-163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2015.04.015>
- Habib E, Krajewski WF, Ciach GJ (2001) Estimation of rainfall interstation correlation. **Journal of Hydrometeorology** 2(6):621-629. DOI: [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2001\)002<0621:EORIC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2001)002<0621:EORIC>2.0.CO;2)
- Huffman G, Bolvin D, Braithwaite D, Hsu K, Joyce R, Xie P (2014) Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM (IMERG), version 4.4. NASA's Precipitation Processing Center. Disponible em: <ftp://arthurhou.pps.eosdis.nasa.gov/gpmdata/>.
- Huffman GJ, Bolvin DT, Braithwaite D, Hsu K, Joyce R, Kidd C, Nelkin EJ, Sorooshian S, Tan J, Xie P (2019) NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG). In: Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD).. Disponible em: https://docserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/public/project/GPM/IMERG_ATBD_V06.pdf
- Jayaraman PP, Yavari A, Georgakopoulos D, Morshed A, Zaslavsky A (2016) Internet of things platform for smart farming: experiences and lessons learnt. **Sensors** 16:1884; doi:10.3390/s16111884
- Jensen NE, Pedersen L (2005) Spatial variability of rainfall: Variations within a single radar pixel. **Atmospheric Research** 77(1-4):269–277. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.10.029>
- Jones JW, Hoogenboom G, Porter CH, Boote KJ, Batchelor WD, Hunt LA, Wilkens PW, Singh U, Gijssman AJ, Ritchie JT (2003) The DSSAT cropping system model. **Europ. J. Agronomy** 18:235-265. DOI: 10.1016/S1161-0301(02)00107-7
- Keswani B, Mohapatra AG, Mohanty A, Khanna A, Rodrigues JJPC, Gupta D, Albuquerque, VHC de (2019) Adapting weather conditions based IoT enabled smart irrigation technique in precision agriculture mechanisms. **Neural Comput & Applic** 31:277–292. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3737-1>
- Krajewski WF, Ciach GJ, Habib E (2003) An analysis of small-scale rainfall variability in different climatic regimes. **Hydrological Sciences Journal** 48(2):151-162. <https://doi.org/10.1623/hysj.48.2.151.44694>

- Kravchenko AN, Bullock DG (2002) Spatial variability of soybean quality data as a function of field topography: I. spatial data analysis. **Crop Sci.** 42(3):804–815. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.8040>
- Kravchenko AN, Robertson GP, Thelen KD, Harwood RR (2005) Management, topographical, and weather effects on spatial variability of crop grain yields. **Agron. J.** 97:514–523. DOI: 10.2134/agronj2005.0514
- Lamb DW, Brown RB (2001) Remote-Sensing and Mapping of Weeds in Crops. **J. agric. Engng Res.** 78(2):117-125. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0630>
- Lenzi G, Nanni S, Salsi A (1990) Agricultural Use of Weather Radar Data in Emilia-Romagna Italy. In: Collier C.G., Chapuis M. (eds) Weather Radar Networking. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0551-1_57
- Liebmann B, Jones C, de Carvalho LMV (2001) Interannual variability of daily extreme precipitation events in the state of São Paulo, Brazil. **Journal of Climate** 14(2):208-218. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<0208:IVODEP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<0208:IVODEP>2.0.CO;2)
- Lobell DB, Thau D, Seifert C, Engle E, Little B (2015) A scalable satellite-based crop yield mapper. **Remote Sensing of Environment** 164:324-333. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.021>
- MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2018). Portarias de zoneamento agrícola de risco climático. <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-seguro/risco-agropecuário/portarias/safra-vigente/rio-grande-do-sul>. Accessed 15 Fevereiro 2021
- Martre P, Wallach D, Asseng S, Ewert F, Jones JW, Rötter RP, Boote KJ, Ruane AC, Thorburn PJ, Cammarano D, Hatfield JL, Rosenzweig C, Aggarwal PK, Angulo C, Basso B, Bertuzzi P, Biernath C, Brisson N, Challinor AJ, Doltra J, Gayler S, Goldberg R, Grant RF, Heng L, Hooker J, Hunt LA, Ingwersen J, Izaurralde RC, Kersebaum KC, Müller C, Kumar SN, Nendel C, O’leary G, Olesen JE, Osborne TM, Palosuo T, Priesack E, Ripoche D, Semenov MA, Shcherbak I, Steduto P, Stöckle CO, Stratonovitch P, Streck T, Supit I, Tao F, Travasso M, Waha K, White JW, Wolf J (2015) Multimodel ensembles of wheat growth: many models are better than one. **Global Change Biology** 21(2):911–925. doi: 10.1111/gcb.12768
- Mashingia F, Mtalo F, Bruen M (2014) Validation of remotely sensed rainfall over major climatic regions in Northeast Tanzania. **Physics and Chemistry of the Earth** 67-69:55-63. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.09.013>
- Mattioni NM, Schuch LOB, Villela FA (2011) Variabilidade espacial da produtividade e da qualidade das sementes de soja em um campo de produção. **Rev. bras. Sementes** 33(4):608-615. <https://doi.org/10.1590/S0101-31222011000400002>

- Mattioni NM, Schuch LOB, Villela FA, Zen HD, Mertz LM (2013) Fertilidade do solo na qualidade fisiológica de sementes de soja. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** 8(4):656-661. DOI:10.5039/agraria.v8i4a3495
- Mello YR de, Kohls W, Oliveira TMN de (2017) Uso de diferentes métodos para o preenchimento de falhas em estações pluviométricas. **Bol. geogr.** 35(1):112-121. DOI: <http://dx.doi.org/10.4025/bolgeogr.v35i1.30893>
- Mendoza-Resendiz A, Arganis-Juarez M, Dominguez-Mora R, Echavarría B (2013) Method for generating spatial and temporal synthetic hourly rainfall in the Valley of Mexico. **Atmospheric Research** 132-133:411-422. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.07.001>
- Mesas-Carrascosa FJ, Verdu' Santano D, Meroño JE, Sánchez de la Orden, M, García-Ferrer A (2015) Open source hardware to monitor environmental parameters in precision agriculture. **Biosystems Engineering** 137:73-83. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.07.005>
- Monquero PA, Amaral LR, Binha DP, Silva PV, Silva AC, Martins FRA (2008) Mapas de infestação de plantas daninhas em diferentes sistemas de colheita da cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, 26(1):47-55. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582008000100005>.
- Nendel C, Berg M, Kersebaum JC, Mirschel W, Specka X, Wegehenkel M, Wenkel KO, Wieland R (2011) The MONIC model: Testing predictability for crop growth, soil moisture and nitrogen dynamics. **Ecological Modelling** 222:1614-1625. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.02.018>
- NOAA (2018) National Weather Service. Cold & warm episodes by season. origin.pcp.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Accessed April 2019
- Oliveira, RK. **Fluxos de CO₂, água e energia em áreas de renovação de canavial com cultivo de soja**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.
- O'Neal MR, Frankenberger JR, Ess DR (2002) Use of CERES-Maize to study effect of spatial precipitation variability on yield. **Agricultural Systems**, 73(2):205-225. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(01\)00095-6](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(01)00095-6)
- O'Neal MR, Engel BA, Ess DR, Frankenberger JR (2002) Neural network prediction of maize yield using alternative data coding algorithms. **Biosystems Engineering** 83(1):31-45. <https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0098>
- Ottega EL, de Queiroz DM, Pinto, F de A de C, de Souza, CMA, Valente DSM (2017) Precision agriculture applied to soybean: Part I - delineation of management zones. **Australian Journal of Crop Science** 11(5), 573–579. DOI: 10.21475/ajcs.17.11.05.p381

- Pampuch LA, Drumond A, Gimeno L, Ambrizzi T (2016) Anomalous patterns of SST and moisture sources in the South Atlantic Ocean associated with dry events in southeastern Brazil. **International Journal of Climatology** 36(15):4913-4928. DOI: 10.1002/joc.4679
- Paz JO, Batchelor WD, Colvin TS, Logsdon SD, Kaspar TC, Karlen DL (1998) Analysis of water stress effects causing spatial yield variability in soybeans. **Transactions of the ASAE**, 41(5):1527-1534. DOI: 10.13031/2013.17284
- Pedersen L, Jensen NE, Christensen LE, Madsen H (2010) Quantification of the spatial variability of rainfall based on a dense network of rain gauges. **Atmospheric Research** 95(4):441-454. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.11.007>
- Pierce FJ, Elliott TV (2008) Regional and on-farm wireless sensor networks for agricultural systems in Eastern Washington. **Computers and Electronics in Agriculture**, 61:32-43. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.05.007>
- Purcell LC, Specht JE (2004) Physiological traits for ameliorating drought stress. In: Boerma HR, Specht JE (eds), Soybeans: Improvement, production, and uses, 3rd ed. Agron. Monogr. 16. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. pp 569-620. <http://dx.doi.org/10.2134/agronmonogr16.3ed.c12>
- Reichardt K, Angelocci LR, Bacchi OOS, Pilotto JE (1995) Daily rainfall variability at a local scale (1,000 ha), in Piracicaba, SP, Brazil, and its implications on soil water recharge. **Scientia Agricola** 52(1): 43-49. <https://doi.org/10.1590/S0103-90161995000100008>.
- Robertson MJ, Carberry PS (1998) Simulating growth and development of soybean in APSIM. Proceedings 10th Australian Soybean Conference, Brisbane 15-17 September, 130-136.
- Schilling W (1991) Rainfall data for urban hydrology: what do we need? **Atmospheric Research** 27(1-3):5-21. [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(91\)90003-F](https://doi.org/10.1016/0169-8095(91)90003-F)
- Shapiro SS, Wilk MB (1965) An analysis of variance test for normality (complete sample). **Biometrika** 52(3):591-611. <https://doi.org/10.2307/2333709>
- Siciliano WC, Bastos GP, Oliveira IT de, Silva GN da, Obraczka M, Ohnuma Jr AA (2018). Variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial no município do Rio de Janeiro. **Revista Internacional de Ciências**, 8(2):221-233. DOI: 10.12957/ric.2018.33811
- Silva, EHF da. **Simulação de cenários agrícolas futuros para a cultura da soja no Brasil com base em projeções de mudanças climáticas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.
- Souza TS de, Nascimento P dos S (2020) Análise da variabilidade espacial e temporal da precipitação pluviométrica na região hidrográfica do Recôncavo Sul (BA). **Revista Brasileira de Climatologia**, 27:1-18. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.68353>
- Stol PT (1972) The relative efficiency of the density of rain-gage networks. **Journal of Hydrology**

15(3):193-208. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(72\)90013-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(72)90013-3)

Mega T, Ushio T, Kubota T, Kachi M, Aonashi K., Shige S (2014) Gauge adjusted global satellite mapping of precipitation (GSMaP_Gauge). XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), Beijing, China, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/URSIGASS.2014.6929683.

Thyer M, Kuczera G, Wang QJ (2002) Quantifying parameter uncertainty in stochastic models using the Box-Cox transformation. **Journal of Hydrology** 265(1-4):246–257. 10.1016/S0022-1694(02)00113-0

Tokay A, Roche RJ, Bashor PG (2014) An experimental study of spatial variability of rainfall. **Journal of Hydrometeorology** 15(2), 801-812. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-031.1>

van Genuchten MT (1980) A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal** 44(5):892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

van Ittersum MK, Cassman KG, Grassini P, Wolf J, Tittonell P, Hochmand Z (2013) Yield gap analysis with local to global relevance - A review. **Field Crops Research** 143:4-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>

Venäläinen A, Heikinheimo MA (2002) Meteorological data for agricultural applications. **Physics and Chemistry of the Earth** 27:1045–1050. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(02\)00140-7](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00140-7)

Verhulst N, Govaerts B, Sayre KD, Deckers J, François IM, Dendooven L (2009) Using NDVI and soil quality analysis to assess influence of agronomic management on within-plot spatial variability and factors limiting production. **Plant Soil** 317:41-59. DOI 10.1007/s11104-008-9787-x

Villarini G, Mandapaka PV, Krajewski WF, Moore RJ (2008) Rainfall and sampling uncertainties: A rain gauge perspective. **Journal of Geophysical Research** 113:D11102. doi:10.1029/2007JD009214

Zanon AJ, Streck NA, Grassini P (2016) Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, 108(4):1447-1454. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0535>

5. USO DO ÍNDICE VEGETATIVO NDVI PARA AVALIAR A RESPOSTA DA SOJA À CONDIÇÃO METEOROLÓGICA

Resumo

As condições meteorológicas são uma das principais causas da variabilidade da produtividade da soja. O monitoramento pode auxiliar o produtor no manejo da lavoura, mas para ser realizado depende da existência de uma estação meteorológica, nem sempre próximas. Para contornar essa dificuldade dados de sensoriamento remoto pode ser úteis. Dessa forma, o objetivo do estudo foi avaliar as características meteorológicas de três safras de soja e analisar a resposta espectral da cultura, por meio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). O estudo usou áreas do município de Cruz Alta-RS, nas safras de 2017/18, 2018/19 e 2019/20. Dados meteorológicos indicaram favorabilidade térmica, mas períodos prolongados de estiagem definiram condição meteorológica desfavorável à soja na safra 2019/20. A partir da análise da evolução temporal do NDVI, usando como referência um agrupamento definido como “*NDVI Teórico*”, já foi possível observar a possibilidade de uso do índice vegetativo para inferir sobre a influência meteorológica na soja. Resultados mostram a redução temporal do índice vegetativo com aumentos da deficiência hídrica. Os resultados evidenciaram e reafirmam a capacidade de identificar o efeito meteorológico a partir da observação do NDVI.

Palavras-chave: *Glycine max* L; índice de vegetação; chuva; balanço hídrico.

Abstract

Weather condition is one of the main causes of soybean yield variability. Monitoring weather conditions can assist the producer in managing the crop, but to be carried out it depends on the existence of a weather station, which is not always close. To overcome this difficulty, remote sensing data can be especially useful. The objective of this study was to evaluate the meteorological characteristics of three season's crops and relate to the spectral response of the crop, using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). This study used areas of the municipality of Cruz Alta-RS, in the 2017/18, 2018/19 and 2019/20 harvests. Meteorological data indicated thermal favorability, but a dry season pointed to an unfavorable meteorological condition for soybeans in the 2019/20 harvest. From the analysis of the temporal evolution of the NDVI, using as a reference a grouping defined as "NDVI Theoretical", it was possible to observe the possibility of using the vegetative index to infer about the meteorological influence on soybeans. Results show the temporal reduction of the vegetative index with increases in water deficiency. The results showed and reaffirmed the ability to identify meteorological effects on the crop productivity by using remote sensing observation of NDVI to indirect infer the deficit of rainfall.

Keywords: *Glycine max* L; vegetation index; rainfall; water balance

5.1. Introdução

A soja é uma importante *commodity* mundial, responsável por 39% das exportações brasileiras (MAPA, 2019). A cultura ocupa uma área de 36,9 milhões de hectares, com produção de 124,8 milhões de toneladas no Brasil (CONAB, 2021). As principais regiões produtoras são Centro-Oeste (CO) e Sul (S) do Brasil, responsáveis por mais de 78% da produção nacional.

O Rio Grande do Sul (RS) é o terceiro maior estado produtor nacional, atrás dos estados do Mato Grosso (CO) e do Paraná (S). Na safra 2018/19, o RS produziu 19,5 milhões de toneladas de soja, a maior produção já alcançada, superando em 11,9% à safra anterior. Já na safra 2019/20, por questões meteorológicas, a produção foi de 11,44 milhões de toneladas de soja, mesmo com aumento de 2% na área cultivada (CONAB, 2021).

No Estado, o município de Cruz Alta/RS é o quinto maior produtor de soja, com uma área plantada de 93.000 hectares e produção de 326.160 toneladas (IBGE, 2018). Nessa região a cultura é produzida entre os meses de outubro e abril, utilizando cultivares de grupo de maturação relativa (GMR) 5 - 6 (ECR, 2020), com ciclo médio de 110 a 140 dias conforme data de semeadura (MAPA, 2020), majoritariamente em sistema de produção sequeiro.

Climaticamente, entre os meses de outubro a abril, a região de Cruz Alta/RS apresenta temperatura média do ar de 18,8°C a 23,6°C, com mínima média de 13,9°C e máxima média de 29,8°C (Diniz et al, 2018), condição térmica favorável ao cultivo da soja (Farias et al., 2009). Em relação à disponibilidade de energia solar, em média tem-se 227,0 horas de brilho solar mensal (Diniz et al, 2018). Além disso, como planta de dia curto, a soja é regionalmente influenciada por um fotoperíodo crescente até o mês de dezembro (12,3 horas em 01/out a 13,8 horas em 21/dez), com decréscimo progressivo a partir daí (reduzindo para 11,3h em 15/abril). A precipitação média em Cruz Alta/RS para o referido período de produção é de 161,9(±40,6)mm (Diniz et al, 2018). A partir desse valor, por meio de soma ponderada pelos ciclos da soja, os totais médios de precipitação não alcançam o limiar de 800 mm ciclo⁻¹, sugeridos por Zanon et al. (2016) como necessários à maximização da produtividade.

Ainda, a região de Cruz Alta/RS, assim como todas as demais áreas do RS, apresenta uma marcante variabilidade interanual da precipitação, profundamente relacionada ao fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENSO) (Grimm et al., 2000; Grimm, 2004; Tedeschi et al. 2015).

Especificamente para Cruz Alta/RS, Matzenauer et al. (2017) destacam que na estação de primavera, sob a influência do ENSO, o município, em média, tem desvio positivo de 20% quando o fenômeno se caracteriza como El Niño, e redução de 15% no total de chuva quando está sob ação da fase fria do ENSO, a La Niña. O mesmo padrão se repete para a estação de

verão, com desvio positivo quando há El Niño, de +15%, e uma redução média de 5% quando é a La Niña que influencia.

Por consequência, ao apresentarem o consumo relativo de água para a cultura da soja, em diferentes épocas de semeadura, para Cruz Alta/RS, Matzenauer et al. (2003) destacam que a partir da análise de 19 anos, em 42,1% a relação evapotranspiração real/evapotranspiração máxima da cultura (E_{Tr}/E_{Tc}), durante o estádios críticos de desenvolvimento R1-R5 (floração formação vagem-graos), foi de $E_{Tr}/E_{Tc} \leq 0,6$. Logo, a condição hídrica é a principal causa de perda produtiva na região de Cruz Alta/RS, implicação extensiva a todas outras áreas de produção de soja do Rio Grande do Sul (Cunha et al., 2001; Melo et al., 2004; Battisti & Sentelhas, 2019; Nóia Júnior & Sentelhas, 2019).

Portanto, o monitoramento da dinâmica do crescimento e desenvolvimento das lavouras de soja na região, paralelamente ao monitoramento meteorológico, é básico e necessário, a fim de se ter um panorama precoce da safra. Para realizá-lo, devido à área de produção (93 mil hectares apenas em Cruz Alta/RS, e 5,5 milhões de hectares em todo o RS), dados de sensoriamento remoto, coletados por meio de satélites ou drone, transformados em índices vegetativos (Xue & Su, 2017), tem sido largamente avaliados e empregados (Fontana et al., 2003; Jacóbsen et al., 2003; Rizzi, 2005; Melo et al., 2008; Rodrigues et al., 2013; Rodigheri et al., 2019).

Por meio da resposta espectral do dossel vegetal, expressa por índices de vegetação, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), é possível identificar a variabilidade espacial das condições solo-planta, inferindo sobre índice de área foliar e biomassa da cultura, características do dossel que podem refletir a influência dos fatores condicionantes, como o meteorológico (Nicholson & Farrar, 1994; Wang et al., 2003; Barbosa et al., 2019), amparando análises de potencial de produção e lacunas produtivas (Lobell & Ortiz-Monasterio, 2006; Lobell, 2013; Meng et al., 2013; Feng et al., 2014; Jiang et al., 2014; Clevers et al., 2017; Li et al., 2019).

Baseando-se na hipótese de que o fator meteorológico pode ser abordado por meio de índices de vegetação obtidos por imagens de satélite, o objetivo do trabalho foi o de explorar o NDVI, como expressão das respostas da cultura da soja às condições agrometeorológicas, especialmente a disponibilidade hídrica.

5.2. Material e métodos

5.2.1. Local de estudo e dados da cultura

O local de estudo compreende três talhões de produção de soja com área total de 56,6 ha, pertencente à Cooperativa Central Gaúcha LTDA (CCGL). A área está localizada no município

de Cruz Alta (RS), na região norte do estado do Rio Grande do Sul (28° 38 '19" Sul, 53° 36' 23" Oeste e 452 metros) (Figura 1).

A região de Cruz Alta (RS) tem temperatura média anual de 18,5°C e precipitação média anual de 1630 mm (Diniz et al. 2018). O clima é o subtropical com verão quente (Cfa) conforme classificação climática de Köppen (Alvares et al., 2013).

O período de coleta dos dados incluiu as safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20. Na safra 2017/18 os três talhões foram cultivados com soja. Na safra 2018/19 apenas no talhão 2, e na safra 2019/20 somente no talhão 1 foi cultivado com soja (Figura 1).



Figura 1. Perímetros dos talhões 1, 2 e 3 de produção de soja, pertencentes a Cooperativa Central Gaúcha LTDA (CCGL), no município de Cruz Alta, estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

As cultivares utilizadas foram a Monsoy 6410 IPRO (GMR 6.4) na safra 2017/18; a DM5958 IPRO (GMR 5.8) na safra 2018/19 e NA 5909 (GMR 6.2) na safra 2019/20. Todas as cultivares possuem hábito de crescimento indeterminado. As datas correspondentes a semeadura e maturação na safra 2017/18 para o talhão 1 foram 14/11/17 e 08/04/18, no talhão 2 foram 15/11/17 e 06/04/18 e para o talhão 3, 21/11/17 e 06/04/18. Para a safra 2018/19, no talhão 2 a semeadura foi realizada no dia 10/11/18, com maturação definida para o dia 27/03/19. Na última safra, 2019/20, o talhão 1 foi semeado no dia 22/11/19 e a maturação da soja definida em 21/03/20.

A adubação de base utilizada em cada talhão foi de 250 kg ha⁻¹, nas proporções 07-34-11, seguindo recomendação de soja para o estado do Rio Grande do Sul (Salvadori et al., 2016). Os tratamentos fitossanitários, sempre que necessário, foram realizados para o controle de plantas

daninhas, pragas e doenças, mantendo as áreas de produção sem interferência desses fatores bióticos.

5.2.2. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram coletados na estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), instalada no município de Cruz Alta - RS (28° 36' 12" Sul, 53° 40' 24" Oeste e 427 metros), interno a área da CCGL (Figura 1). Foram utilizados os dados diários de precipitação, temperaturas máxima e mínima do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento (2m) e radiação solar global, coletados de 2017 a 2020, sempre coincidindo com os períodos de produção da soja.

5.2.3. Dados de NDVI

As imagens utilizadas para o cálculo do NDVI foram obtidas por meio de sensores a bordo do satélite Sentinel-2. Os processamentos destinados à coleta das imagens e cálculo do NDVI (Eq. 1) foram realizados na plataforma Google Earth Engine (GEE). Foram selecionadas imagens dos meses de novembro a abril, para as safras de 2017/18, 2018/19 e 2019/20. Foi aplicado um filtro de nuvens de 2%, resultando em um total de 16 imagens para a safra 2017/18, 15 imagens para a safra 2018/19 e 22 imagens para a safra 2019/20.

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que NIR é a banda do infravermelho próximo e R é a banda do vermelho do espectro eletromagnético.

A fim de caracterizar o perfil temporal de máximo crescimento e desenvolvimento de plantas de soja ao longo do ciclo, dados de NDVI medidos em áreas de produção de soja, sem deficiência hídrica, foram agrupados (Bariani et al., 2015; Cerutti, 2019; Rodigheri et al., 2020). O agrupamento denominado “*NDVI Teórico*” integra informações coletadas de cultivares de soja de hábito de crescimento determinado e indeterminado, de grupos de maturação relativa 5.8 a 6.2.

Para normalizar os ciclos de produção da soja, a fim de compará-los ao “*NDVI Teórico*”, foi utilizada a somatória térmica diária (GDi) (Eq.2) decomposta à expressão relativa (GRrel) (Eq.3). Dados meteorológicos dos locais experimentais (Bariani et al., 2015; Cerutti, 2019; Rodigheri et al., 2020) foram obtidos a partir das estações meteorológicas mais próximas, pertencentes ao INMET.

$$GDi = (T_{med} - T_b)n \quad (\text{Eq. 2})$$

$$GDrel. = \left(\frac{GDi}{\sum_S^{R8} GDi} \right) 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde T_{med} é a temperatura média do ar ($^{\circ}C$); T_b é a temperatura basal inferior da soja, de $13^{\circ}C$; n é unidade de tempo, igual a 1 dia; da semeadura (S) ao estágio de maturação da soja (R_8) (Fehr & Caviness, 1977) .

Áreas sob as curvas de NDVI foram integradas usando a regra do trapézio (Kimball et al., 2012).

5.2.4. Balanço hídrico da cultura da soja

Para o cálculo do balanço hídrico (BH) da cultura foi usado modelo de Thornthwaite & Matter (1955). Os cálculos foram feitos em escala diária, iniciados no mês de janeiro de 2017, dez meses antes do primeiro ciclo de produção de soja, safra 2017/18. A contabilidade do BH foi encerrada em abril de 2020 (Figura 1). Para os período de entressafra de soja foi adotado Kc igual a 1.

O solo dos talhões (Figura 1) é classificado como Latossolo roxo distrófico, com porcentagens média de 52,9% de argila, 18,8% de silte e 28,3% para o talhão 1; de 51,6% de argila, 21,0% de silte e 27,4% de areia para o talhão 2; e de 51,6% de argila, 19,4% de silte e 29,0% de areia para o talhão 3. A partir dos dados de conteúdo de areia, silte e argila, utilizando funções de pedotransferência (Reichert et al . 2009) (Eq. 4 e 5) foram estimados a umidade do solo em capacidade de campo (θ_{cc}) (Eq. 4) e em ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) (Eq. 5):

$$\theta_{cc} = 0,037 + 0,38(\text{argila} + \text{silte}) \quad (\text{Eq. 4})$$

$$\theta_{pmp} = 0,236 + 0,045 \text{ argila} - 0,21 \text{ areia} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde θ_{cc} é a umidade do solo em capacidade de campo ($kg\ kg^{-1}$); θ_{pmp} é a umidade do solo em ponto de murcha permanente ($kg\ kg^{-1}$); conteúdo de argila, silte e areia ($kg\ kg^{-1}$);

A partir dos valores de θ_{cc} e θ_{pmp} de cada talhão, da densidade média do solo dos três talhões ($1240\ kg\ m^{-3}$) e da profundidade do sistema radicular da soja (Z) limitado de 0,5m, foi determinada a capacidade de armazenamento de água no solo (CAD, mm) de cada talhão (Eq. 6)

$$CAD = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) Z \quad (\text{Eq. 6})$$

Para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) foi utilizada a equação de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) (Eq. 7).

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (\text{Eq. 7})$$

sendo: ET_o a evapotranspiração de referência ($mm\ dia^{-1}$); Δ a inclinação da curva de pressão de vapor ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$); R_n ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$) o saldo de radiação, G o fluxo de calor no solo ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$); γ a constante psicrométrica ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$); T a temperatura média do ar ($^{\circ}C$); e_s a pressão de saturação de vapor (kPa); e_a a pressão parcial de vapor (kPa) e u_2 a velocidade do vento a 2 metros de altura ($m\ s^{-1}$).

Para o cálculo da ETo assumiu-se fluxo de calor no solo (G) igual a zero e o saldo de radiação (Rn) estimado pela equação (8) (Allen et al., 1998):

$$Rn = Qg(1 - 0,23) + [(-4,903 \cdot 10^{-9} \left(\frac{Tmax^4 + Tmin^4}{2}\right) - 0,34 - 0,14\sqrt{ea} \left(1,35\frac{Qg}{Qcs} - 0,35\right)] \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde: Qg é a radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); Tmax e Tmin respectivamente a temperatura máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$); e_a a pressão parcial de vapor (KPa) (Eq. 10 e 11) e Qcs a radiação solar global estimada para céu claro ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) (Eq. 9).

$$Qcs = Qo(0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \text{ alt}) \quad (\text{Eq. 9})$$

$$es = 0,6108 \cdot 10^{\frac{7,5T}{237,3+T}} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$ea = es \frac{UR}{100} \quad (\text{Eq. 11})$$

Em que alt é a altitude (m) e UR é a umidade relativa do ar (%).

A evapotranspiração da cultura da soja (ETc) foi calculada (Eq. 12) a partir dos dados de evapotranspiração de referência e do coeficiente de cultura (Kc) para soja (Eq. 13) (Martorano, 2007). Nessa equação, DAS significa dias após a semeadura da soja.

$$ETc = Kc ETo \quad (\text{Eq. 12})$$

$$Kc = -0,0001DAS^2 + 0,0168DAS + 0,4268 \quad (\text{Eq. 13})$$

O balanço hídrico considerou a água facilmente disponível (AFD) (Eq. 14), com simulação de profundidade do sistema radicular da soja (RSD), assim ponderando a disponibilidade máxima de água para cada subperíodo de desenvolvimento da soja (Tabela 1). Para o cálculo do fator p foi usada a eq. 15.

$$AFD = p CAD \quad (\text{Eq. 14})$$

$$p = 0,5 + [0,04(5 - ETc)] \quad (\text{Eq. 15})$$

Tabela 1. Subperíodos de desenvolvimento (Fehr e Caviness 1977), tempo térmico por subperíodo (%) e conteúdo relativo de água em relação à capacidade máxima de água disponível no solo (θ_{Awr}) para a cultura da soja.

Subperíodo de desenvolvimento	Graus-dia relativo (%)	CADr (%)
Estabelecimento (S-V1) ⁴	12,5	30
Vegetativo (V2-R1) ⁴	33,3	75
Floração/Formação dos grãos (R1-R5.5) ⁴	29,2	90
Maturação (R6-R8) ⁴	25,0	100

Adaptado de Battisti (2013)

5.3. Resultados e Discussão

5.3.1. Condições meteorológicas

As temperaturas médias mensais de todos os anos/safras (Figura 2) ficaram próximas as temperaturas médias normais de Cruz Alta - RS (Diniz et al., 2018). Em relação as variações térmicas diárias na safra 2017/18, considerando o ciclo da soja nos três talhões, a temperatura média do ar foi de 21,5°C. Nesse período a temperatura mínima média foi de 16,4°C e a máxima média de 28,2°C. Os extremos térmicos foram registrados em 19/11/2017, quando a temperatura mínima foi de 7,9°C, e no dia 16/12/2017 quando a temperatura máxima atingiu os 35,5°C (Figura 2A).

Na safra 2018/19, de novembro de 2018 a março de 2019, a temperatura média foi de 21,9°C. No período a temperatura mínima média foi de 17,0°C e máxima média de 28,3°C. Nessa safra os extremos térmicos foram de 8,4°C de temperatura mínima, registro feito em 03/12/2018, enquanto a temperatura máxima chegou aos 35,5°C no dia 11/12/2018 (Figura 2B).

Em relação à última safra, de novembro de 2019 ao final de março de 2020, a temperatura média diária foi de 23,3°C. A média das temperaturas mínimas foi de 17,5°C, e das temperaturas máximas ficou em 30,4°C. O menor valor de temperatura mínima, de 8,2°C foi registrado em 22/02/2020. O máximo valor de temperatura do ar, 38,1°C foi registrado em 29/12/2019 (Figura 2C).

Ao confrontar dados de temperatura média das três safras (Figura 2), observa-se que a temperatura média de 23,3°C (2019/20) superou em +1,8°C e +1,4°C a temperatura média das safras 2017/18 e 2018/19, respectivamente. A diferença positiva se deu por conta de valores superiores tanto de temperatura mínima quanto de temperatura máxima (Figura 2).

Apesar das diferenças, assumindo que a soja se adapta melhor às regiões onde as temperaturas oscilam entre 20°C e 30°C, sendo que a temperatura ideal para seu desenvolvimento está em torno dos 30°C (Farias et al, 2007), observou-se favorabilidade ao crescimento e desenvolvimento para as três safras (Figura 2). Em nenhum momento a temperatura máxima excedeu os 40°C, portanto a condição térmica não foi adversa ao crescimento das plantas, sem prejuízos à floração e capacidade de retenção de vagens (Farias et al, 2007).

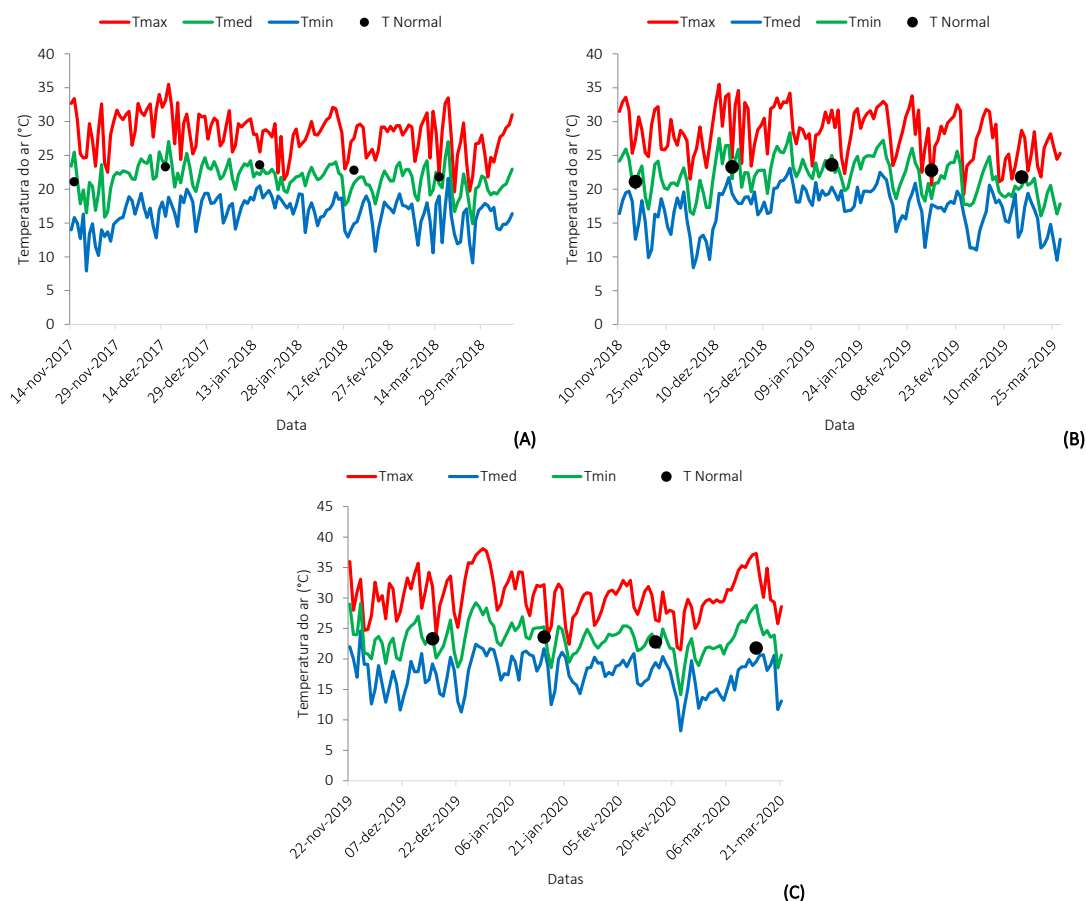


Figura 1 - Temperaturas máxima, média e mínima do ar ao longo do ciclo da cultura da soja para as safras 2017/18 (A), 2018/19 (B) e 2019/20 (C), em Cruz Alta - RS.

Em relação à precipitação os registros revelaram eventos mais frequentes e com maiores volumes acumulados para as safras 2017/18 e 2018/19 (Figura 3). Nos talhões 1 e 2, safra 2017/18, foram registrados 65 dias chuvosos, 35 dias com precipitação superior a 5 mm (Figuras 3A e 3B). No talhão 3, com semeadura mais tardia, foram 62 dias com chuva, 32 deles acumulando pelo menos 5mm (Figura 3C). Na safra 2018/19, talhão 2, foram registrados 63 dias chuvosos, 29 dias com ao menos 5 mm acumulados (Figura 3D).

Na safra 2017/18, os talhões 1 e 2, em função das datas de semeadura e maturação acabaram integrando os mesmos eventos de precipitação. Os 65 dias chuvosos resultaram em 948,2 mm acumulados no ciclo de produção da soja (Figuras 3A e 3B). Nesse mesma safra, no talhão 3, com semeadura mais tardia, os três eventos de precipitação a menos acabaram reduzindo a precipitação acumulada para 868,6mm ciclo⁻¹, 79,6mm menos em relação aos outros dois talhões (Figura 3C). Para a safra 2018/19, talhão 2, os 63 dias chuvosos acabaram totalizando 781,2 mm ciclo⁻¹ (Figura 3D)

Tomando-se como referência o limiar estabelecido por Zanon et al. (2016), de 800 mm ciclo⁻¹ necessários à maximização da produtividade da soja, foi observado que apenas o talhão

2, safra 2018/19, apresentou 19,8 mm a menos (Figura 3D). Talhões 1, 2 e 3, safra 2017/18, acabaram acumulando valores de precipitação superiores (Figuras 3A, 3B e 3C).

As condições meteorológicas observadas nos meses de novembro a abril, do ano safra 2017/18 (Figura 3), configuraram o padrão mensal de precipitação comumente observado quando da ação do fenômeno ENSO (Matzenauer et al. (2017). Em 2017 o trimestre Setembro-Outubro-Novembro (SON) demarcava o início de um período de La Niña. A temperatura da superfície do oceano Pacífico Equatorial Central (SST, região Niño 3.4) em SON apresentava desvio de $-0,7^{\circ}\text{C}$, condição que foi progressivamente se consolidando, com SST de $-1,0^{\circ}\text{C}$ para NDJ, e só a partir daí reduzindo a uma SST de $-0,5^{\circ}\text{C}$ em MAM e então retornando à neutralidade (NOAA, 2021). Tal como descrito por Matzenauer et al. (2017), os meses de janeiro e março, mesmo sob a ação da La Niña, tendem a ter precipitação superior à normal (Diniz et al., 2018). A maior discrepância se deu no mês de janeiro/2018, quando a precipitação acumulada foi de 361,2mm, enquanto o dado normal indica 146,8mm. Os meses de dezembro de 2017, fevereiro e abril de 2018, dentro do esperado devido à influência do ENSO, registraram de 34% e 66% da precipitação acumulada esperada (Diniz et al., 2018).

A safra 2018/19, ao contrário da safra anterior, esteve sempre sob a influência da fase quente do fenômeno ENSO, o El Niño (NOAA, 2021). Já no trimestre SON a SST apresentava desvio positivo, de $0,8^{\circ}\text{C}$, condição que se estendeu até o trimestre Maio-Junho-Julho (MJJ) de 2019, ou seja, após o final da safra de soja. Nesse período, meses de dezembro de 2018 e fevereiro de 2019 (Figura 3D) apresentaram precipitação aquém ao esperado (Diniz et al., 2018). De acordo com Matzenauer et al. (2017), sob a influência do El Niño, há uma tendência de que os meses de dezembro, e especialmente fevereiro, tenham totais de chuva expressivamente superiores aos dados normais, o que não se confirmou. Demais meses da safra 2018/19 (Figura 3D) apresentaram precipitação acumulada similar ou superior ao dado normal (Diniz et al., 2018).

Na safra 2019/20 a distribuição temporal e os valores de precipitação foram distintos, abaixo do registrado para as duas safras prévias (Figura 3). Sob a condição de neutralidade em relação ao fenômeno ENSO (NOAA, 2021), foram contados 50 dias chuvosos ao longo de todo o ciclo da soja, mas apenas 26 dias registraram ao menos 5 mm acumulados. Assim, a somatória da precipitação no ciclo de produção da soja foi de 234,8 mm (Figura 3E). Esse total representa tão somente 29,4% do limiar apontado por Zanon et al. (2016), portanto sugerindo uma condição agrometeorológica desfavorável à soja (Figura 3E).

Com menos dias chuvosos e redução do acumulado na safra 2019/20 (Figura 3E), o balanço energético local acaba modificado. Em decorrência dos maiores períodos de estiagem

tem-se uma maior dissipação energética na forma de calor sensível, com aumento da temperatura do ar (Figura 2), em detrimento a evapotranspiração (Figura 4).

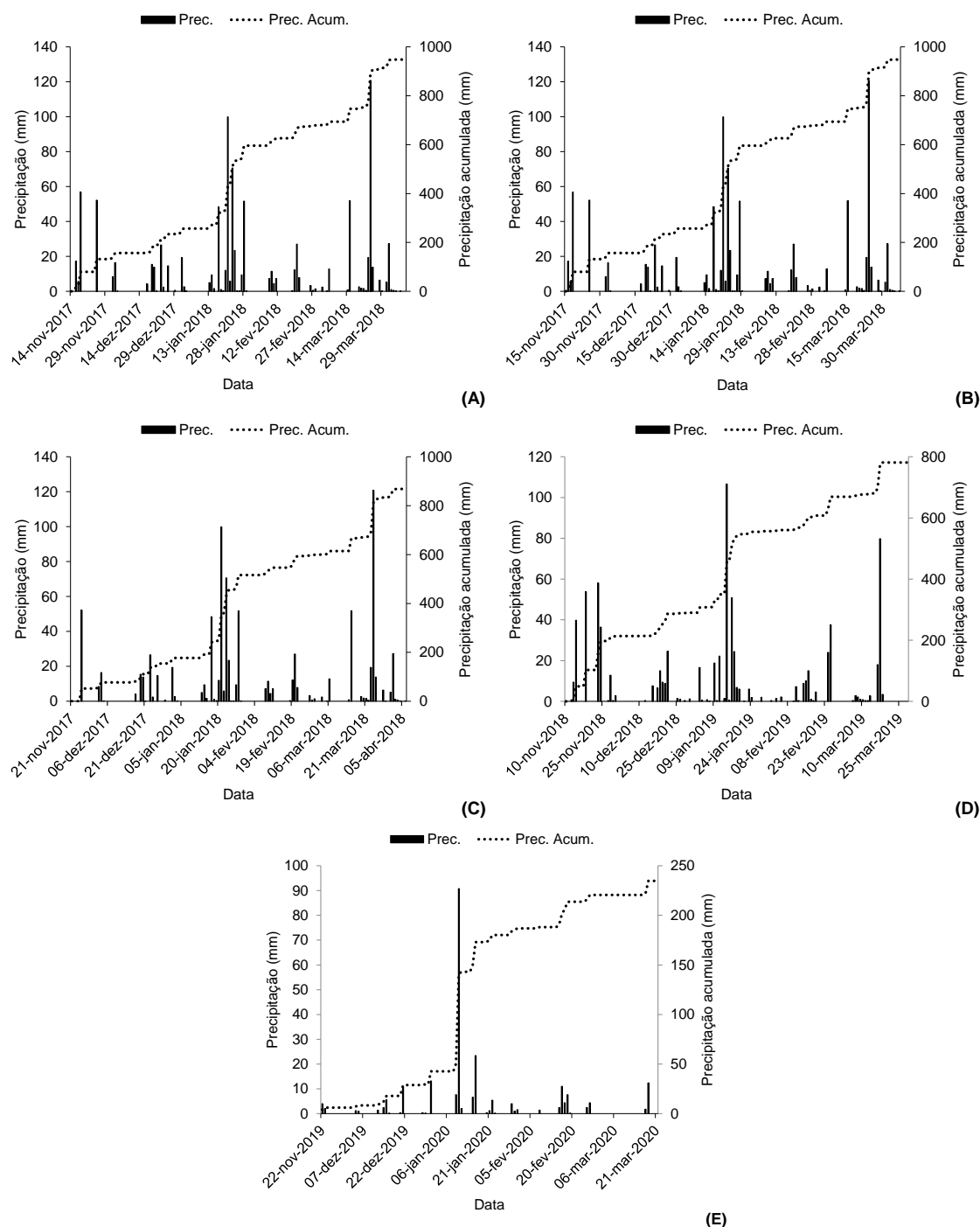


Figura 3. Precipitação diária e acumulada ao longo do ciclo da cultura da soja para talhões 1 (A), 2 (B) e 3 (C) na safra 2017/18, talhão 2 (D) safra 2018/19 e talhão 1 (E) safra 2019/20, em Cruz Alta - RS.

A partir da evapotranspiração de referência (Eq. 12) e coeficiente de cultura (Eq. 13) foi estimada a evapotranspiração da cultura da soja (ETc) para cada talhão/safra (Figura 4). Em 2017/18 a ETc acumulada do ciclo da soja para o talhão 1 foi de 600,9mm, do talhão 2 foi de

589,3mm e no talhão 3 totalizou 562,8mm. Para essas áreas a ETc média foi de 4,12mm dia⁻¹ para os talhões 1 e 2 (Figuras 4A e 4B) e de 4,11mm dia⁻¹ para o talhão 3 (Figura 4C). Na safra 2018/19, talhão 2, a ETc do ciclo da soja foi de 567,8mm, com média de 4,08mm dia⁻¹, enquanto em 2019/20, talhão 1, a ETc do ciclo foi de 590mm, com uma média de 4,84mm dia⁻¹. As diferenças de valores de ETc entre talhões (Figuras 4A,4B e 4C) ou entre safras (Figura 4) provém das diferenças meteorológicas de cada ciclo de produção, e do tempo de ciclo, normalmente encurtado com o atraso da semeadura quando do uso de uma mesma cultivar.

No talhão 1, safra 2019/20 (Figura 4E), o consumo médio de 4,84mm dia⁻¹, superior aos demais talhões/safras (Figura 4), destaca a condição meteorológica em períodos de estiagem (Figura 3E). Com predominância de tempo seco e temperatura elevada (Figura 2C) há naturalmente o aumento da evapotranspiração de referência e, por conta disso, da evapotranspiração da cultura (ETc). Os valores diários médios de ETc (Figura 4) estão próximos aos 4,5mm dia⁻¹ mensurados por Martorano (2007), assim como os dados extremos, de até 8mm dia⁻¹ (Figura 4)

A evapotranspiração real da soja (ETr), vinculada ao armazenamento de água no solo, totalizou 494,5mm ciclo⁻¹, 483,2mm ciclo⁻¹ e 463,9mm ciclo⁻¹, respectivamente para os talhões 1, 2 e 3, safra 2017/18. Na safra 2018/19, talhão 2, a ETr foi de 447,1mm ciclo⁻¹ (Figura 4D), e na safra 2019/20, talhão 1, o valor da ETr foi de 247,7mm ciclos⁻¹ (Figura 4D).

A partir da razão ETr/ ETc, para todo o ciclo, foi determinado que a evapotranspiração relativa nas safras 2017/18 e 2018/19 ficou entre os 0,68 e 0,82. Já para a safra 2019/20, com maior consumo hídrico médio durante o ciclo (Figura 4E) e baixos volumes precipitados no ciclo (Figura 3E) a evapotranspiração relativa do ciclo foi rebaixada à para 0,42.

Considerando que os estádios de desenvolvimento R1 (início da floração) e R6 (enchimento de grãos) demarcam início e final de um dos subperíodos de desenvolvimento da soja mais sensíveis à deficiência hídrica, mais uma vez a evapotranspiração relativa definiu uma condição meteorológica favorável na safra 2017/18, com valores para a ETr/ETc de 0,82 à 0,86. No talhão 2, safra 2018/19, a razão ETr/ETc para o subperíodo R1-R6 de 0,68 delimitou a ocorrência de deficiência hídrica mais intensa justamente no subperíodo de maior sensibilidade ao estresse hídrico. Mesmo assim, as razões ETr/ETc para o subperíodo R1-R6 obtidas para as duas primeiras safras, superam o consumo relativo médio de água para Cruz Alta - RS, de 0,65, considerando áreas semeadas no mês de novembro (Matzenauer et al. 2003).

Ao proceder a mesma verificação para o talhão 1, safra 2019/20, foi constatado que a razão ETr/ETc para o subperíodo R1-R6 ficou em 0,49, logo abaixo da média de 0,65 descrita por (Matzenauer et al. 2003), caracterizando como um ano/safra de ocorrência de forte estiagem.

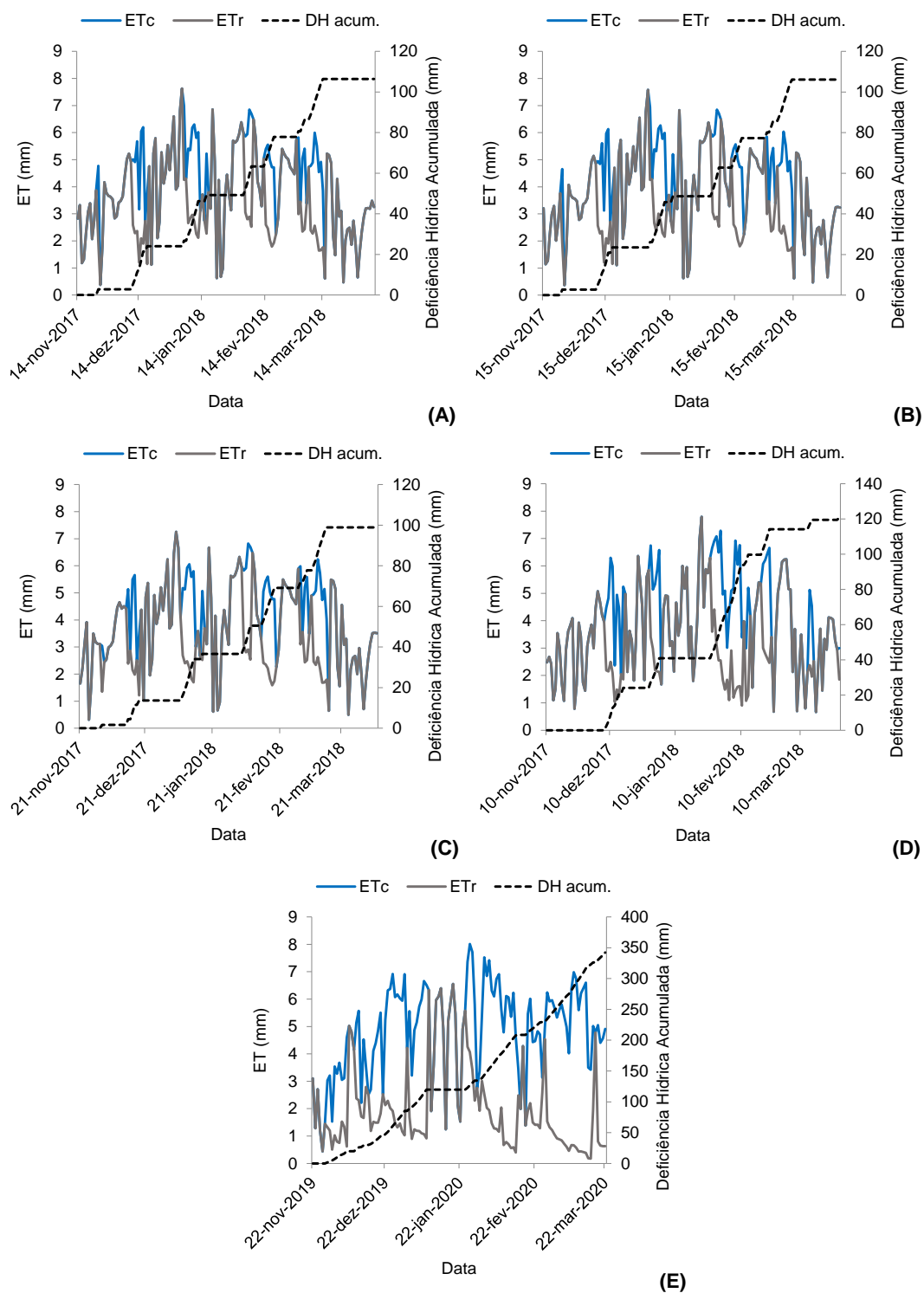


Figura 4. Evapotranspiração da cultura (ETc), evapotranspiração real (ETr) e deficiência hídrica acumulada da soja, para talhões 1 (A), 2 (B) e 3 (C) na safra 2017/18, talhão 2 (D) safra 2018/19 e talhão 1 (E) safra 2019/20, em Cruz Alta – RS.

De forma absoluta, na safra 2017/18, a deficiência hídrica acumulada foi menor quanto mais tardio foi a semeadura (Figuras 4A, 4B e 4C), de acordo com o já observado por Battisti et al (2013) para o RS. Na safra 2018/19, talhão 2, mais uma vez a deficiência hídrica acumulada

foi baixa, com 120,7mm (Figura 4E), enquanto na safra 2019/20, por conta da estimagem (Figura 3E) foram acumulados 342,3 mm de deficiência hídrica (Figura 4D).

5.3.2. Variabilidade temporal do NDVI da cultura da soja

O perfil temporal de máximo crescimento e desenvolvimento de plantas de soja ao longo do ciclo, definido a partir do agrupamento de dados que compõem o “*NDVI Teórico*” expõe um padrão aguardado e observado (Santos et al., 2014; Rodigheri et al., 2019). Da mesma forma, a variação temporal do NDVI dos talhões/safras analisadas (Figura 5) caracterizou o período de cultivo da soja, com semeadura em novembro e colheita entre os meses de março e abril, dentro do que é esperado para a produção de soja no Rio Grande do Sul (Rizzi & Rudorff, 2005).

Temporalmente, o agrupamento “*NDVI Teórico*” inicia com valores baixos de NDVI. Para o subperíodo de estabelecimento da soja (S-V1) (Tabela 1) há mínima variação temporal do índice de vegetação. Para esse subperíodo tem-se um NDVI médio de 0,18, com desvio-padrão de 0,050. A partir do estabelecimento, a cultura passa por subperíodo de intenso desenvolvimento vegetativo (Tabela 1), com aumento exponencial da área foliar (Crusiol et al., 2012). A mesma tendência de aumento é observada em relação a “*NDVI Teórico*” vs. GDrel. (Figura 5).

O terceiro subperíodo, que descreve os estádios reprodutivos, da floração (R1) à formação do grão (R6) (Tabela 1), apresenta dados de NDVI temporalmente constantes (Figura 5), delineando o limite superior de NDVI para a cultura da soja. A partir do agrupamento de dados que compõem o “*NDVI Teórico*” tem-se, para esse subperíodo, um valor médio de 0,88, com desvio-padrão de 0,029. Valor máximo médio de NDVI se assemelha ao encontrado por Crusiol et al. (2013), que ao avaliar o perfil do NDVI de acordo com os estádios fenológicos da cultura da soja, sem restrição hídrica, descrevem que os valores máximos de NDVI coincidem com os estádios reprodutivos, desde R1-R2, chegando a quase 0,9. Finalizando o ciclo da soja tem-se o subperíodo de maturação (R7-R8), que resulta em progressiva perda da folhagem e, consequentemente redução quase linear do NDVI, decaindo ao valor mínimo de NDVI, de 0,22 (Figura 5).

Em relação ao agrupamento de dados que compõem o “*NDVI Teórico*”, sobretudo para os estádios de estabelecimento e maturação da soja (Tabela 1, Figura 5), há maior variabilidade nos valores de NDVI (Bariani et al., 2015; Cerutti, 2019; Rodigheri et al., 2020). Isso ocorre por conta das diferenças em tipos de solo, manejo realizado previamente à semeadura e até mesmo presença ou ausência de palhada na superfície, e também porque os sensores utilizados têm características e configurações distintas (Teillet et al., 2004).

Ao analisar os dados de NDVI da soja dos três talhões da safra 2017/18 (Figuras 5A, 5B e 5C), observam-se evoluções temporais similares à do “*NDVI Teórico*”, assim indicando subperíodos concluídos dentro do tempo térmico esperado, com um rápido aumento de biomassa, suficiente para atingir o patamar superior do índice vegetativo. Os dados de NDVI mostram a permanência de elevado índice de área foliar/biomassa ao longo dos estádios reprodutivos, com posterior decréscimo NDVI indicando a maturação. A análise agrometeorológica para esses talhões (Figuras 2, 3 e 4) reforça o diagnóstico e inferências feitas a partir da evolução temporal do NDVI tendo como referência o “*NDVI Teórico*” (Figuras 5A, 5B e 5C). Nesse caso, o NDVI exaltou a resposta da vegetação à condição meteorológica favorável (Figuras 2, 3 e 4), excluindo efeito por deficiência hídrica, fator ambiental chave, ou de qualquer outra fator, especialmente biótico, capaz de reduzir produção de biomassa.

A evolução temporal do NDVI do talhão 2, safra 2018/19 (Figura 5D), também se assemelhou ao “*NDVI Teórico*”. Apesar de exibir um subperíodo de estabelecimento pouco mais prolongado em comparação a 2017/18 (Figuras 5A, 5B, 5C e 5D), o aumento exponencial do NDVI acompanhou temporalmente o “*NDVI Teórico*”, chegando ao patamar de valores máximos com NDVI médio de 0,83, e assim mantendo-se até o início do subperíodo de maturação. Cabe aqui ressaltar que comparações entre dados de NDVI das safras 2017/18 e 2018/19 devem ponderar sobre as diferentes cultivares de soja usadas. Tal como verificado para a safra 2017/18, a análise agrometeorológica conjugada a análise da evolução temporal do NDVI embasada no “*NDVI Teórico*”, reforça a capacidade de analisar a influência meteorológica sobre a cultura da soja a partir desse índice vegetativo.

A evolução temporal do NDVI do talhão 1, safra 2019/18, exibiu padrão diferenciado, afastando-se do “*NDVI Teórico*” (Figura 5E). Nessa safra a soja foi negativamente influenciada pela condição hídrica já no estabelecimento da cultura (def. acum. de 19,9mm), situação agravada no decorrer do subperíodo vegetativo. Em meados do ciclo (GDrel = 0,52) já se tinham 119,7mm de deficiência hídrica acumulada (Figura 4). Por conta disso a cultura apresentou resposta espectral diferenciada, já que dentre os estresses abióticos, a disponibilidade reduzida de água no solo para as plantas é um fator ambiental chave que diminui a produção de biomassa da soja.

O que se observou, com base no “*NDVI Teórico*”, foi um incremento temporal mais lento do índice vegetativo (Figura 5E). O atraso no crescimento das plantas, que acabaram com valor máximo médio de NDVI de 0,76($\pm 0,02$), inferior aos dados das safras anteriores e “*NDVI Teórico*” (Figura 5), é resultado do encurtamento do período sob condição de maior biomassa e antecipação da senescência da cultura por influência da deficiência hídrica (Fontana et al., 1992; Souza et al., 1997; Barros et al., 2003; Stülp et al., 2009; Hoyos-Villegas et al., 2014; Souza et al.,

2016; Schaparini et al., 2019), resultando em menor reflectância do NIR e maior quantidade refletida na região vermelha do espectro, mostrando intensa relação com IAF (Breunig et al., 2011; De La Casa et al., 2018; Groff, 2010; Kross et al., 2015; Richetti et al., 2019). Ao final desse ciclo a deficiência hídrica acumulada chegou aos 342,3mm.

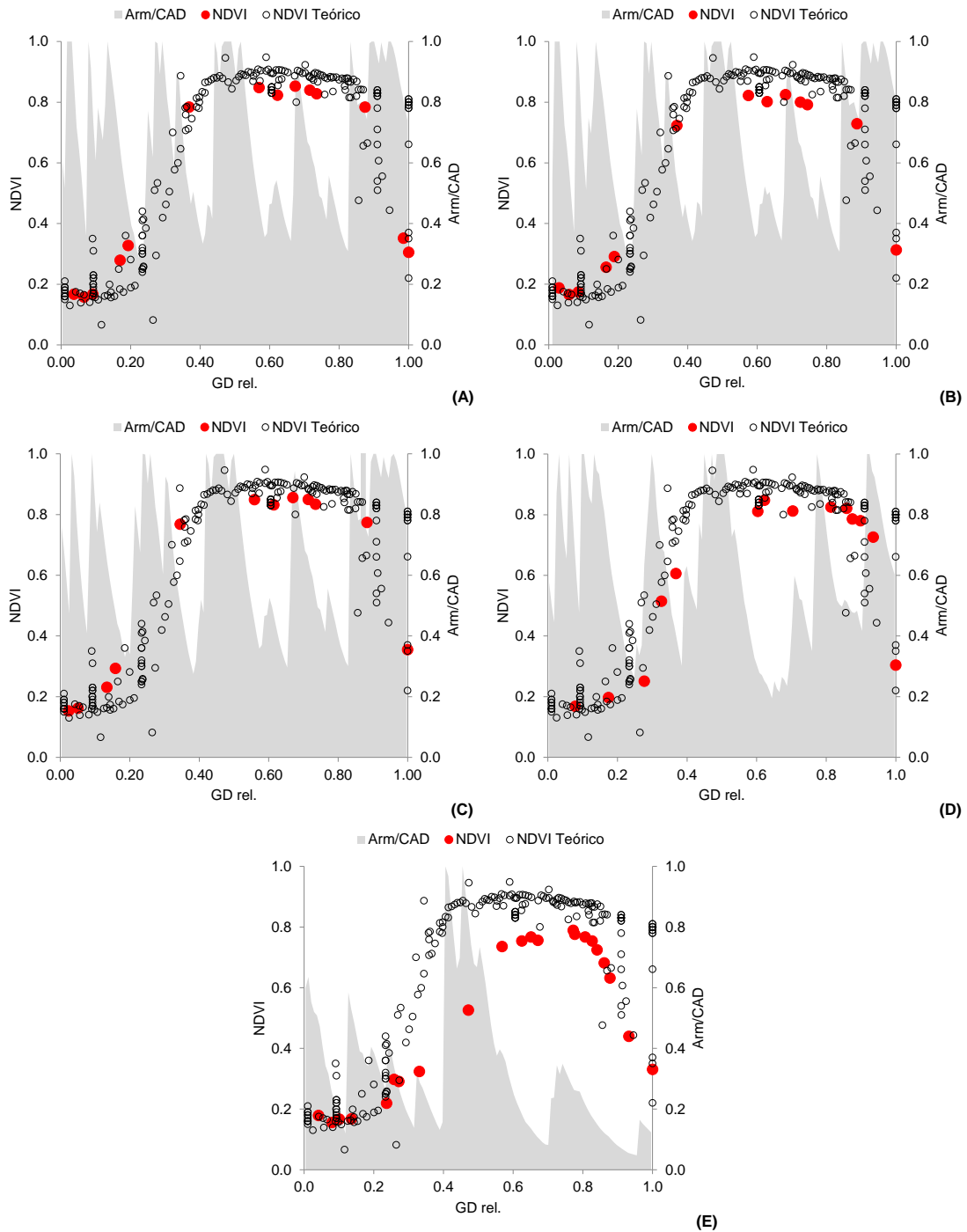


Figura 5. NDVI da cultura da soja e agrupamento “NDVI Teórico”, e o armazenamento de água no solo em relação a CAD (Arm/CAD), para talhões 1 (A), 2 (B) e 3 (C) na safra 2017/18, talhão 2 (D) safra 2018/19 e talhão 1 (E) safra 2019/20, em Cruz Alta-RS.

Os resultados das correlações entre NDVI e a deficiência hídrica da soja para as três safras analisadas (Figura 6) reiteram o uso potencial de índices de vegetação para monitorar a condição hídrica de cultivos (Jacóbsen et al., 2004; Zhang & Zhou, 2015; Silva et al., 2016; Caturegli et al., 2020). Diferente do revelado para relações NDVI e conteúdo de água no solo, normalmente com uma resposta tardia do NDVI em relação à estiagem (Gu et al., 2007; Liu et al., 2012; Zhang et al., 2017), a deficiência hídrica, por integrar as relações solo-planta-atmosfera, apresentou alta correlação temporal ao NDVI, análogo ao ressaltado quando o índice vegetativo é relacionado ao conteúdo de água na folhagem (Liu et al., 2018; Wijewardana et al., 2018; Wijewardana et al., 2019).

Ao comparar os resultados entre diferentes safras (Figura 6), observa-se a influência das condições meteorológicas (Figuras 2, 3 e 4) sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas, refletida por meio da evolução temporal do índice vegetativo. Para as safras 2017/18 e 2018/19 (Figuras 6A, 6B, 6C e 6D) os acréscimos temporais de NDVI por unidade de deficiência hídrica foram similares. Como previamente discutido, as condições meteorológicas nas duas safras foram favoráveis à soja (Figuras 2, 3 e 4) resultando em elevada produtividade, média de 3,8 ton ha⁻¹ para os três talhões em 2017/18, e 4,2 ton ha⁻¹ no talhão 2 em 2018/19.

O resultado para a safra 2019/20 (Figura 6C) expõe a redução do potencial produtivo frente às duas safras anteriores (Figuras 6A, 6B, 6C e 6D) em função da condição hídrica adversa à soja (Figuras 3 e 4). A menor taxa de incremento de biomassa por unidade de tempo, aqui expresso pelo acúmulo temporal dos dados de NDVI (Figura 6E) já antecipa a perda produtiva. No talhão 1, safra 2019/20, a produtividade foi de 2,1 ton ha⁻¹.

Conforme Wijewardana et al. (2019) diferentes curvas de resposta espectral foram observadas para cinco tratamentos de estresse hídrico em soja. Os resultados mostram que o estresse de umidade do solo influenciou as características espectrais do dossel da soja, aumentando a refletância do dossel na faixa visível do espectro (400-700nm), provavelmente devido a uma diminuição na absorção da radiação visível por clorofilas e outros pigmentos foliares. Através de índices vegetativos, os resultados mostram que o NDVI da soja aumentou linearmente com o aumento do potencial hídrico da folha, análogo ao encontrado em relação as diferentes safras e relações NDVI vs. deficiência hídrica (Figura 6). Esses resultados corroboram com a indicação de que uma análise temporal da área de produção de soja feita com base em dados de NDVI é capaz de identificar a influência de diversos fatores sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas, incluindo a condição hídrica.

A partir da análise dos dados da área total abaixo da curva de NDVI (Figura 5) e da deficiência hídrica acumulada no ciclo da soja (Figura 4F) observa-se novamente correlação entre as variáveis. A área total da curva de NDVI aumenta com a redução da deficiência hídrica

acumulada no ciclo (Figura 6F). A série limitada de dados, ao não agregar dados de cultivos irrigados (Figura 4), negligencia a saturação do NDVI para condições de mínima ou ausência plena de deficiência hídrica, situação analisada por Liu et al. (2018) ao confrontar NDVI ao conteúdo relativo de água na folha.

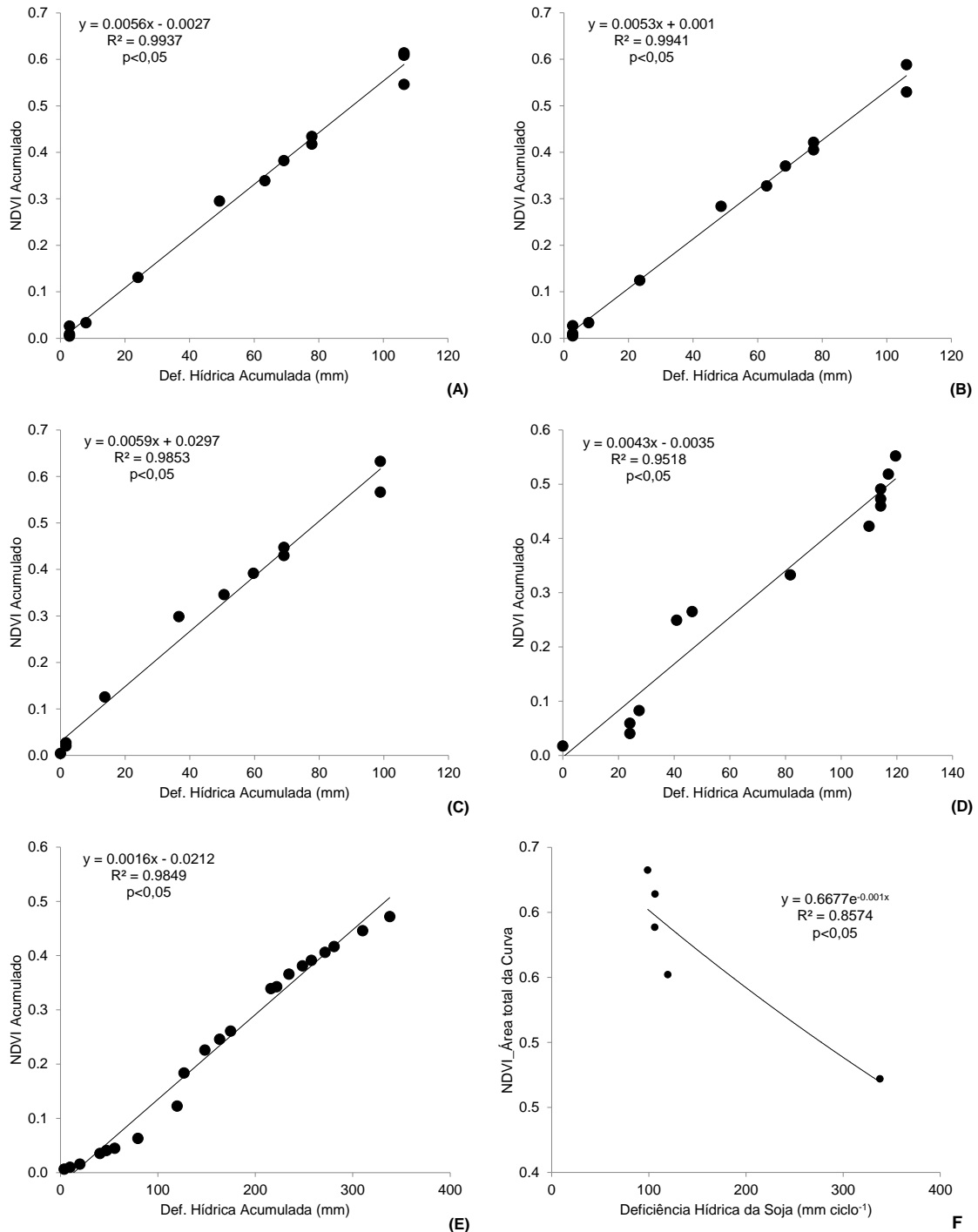


Figura 6. Correlação entre a deficiência hídrica acumulada e o NDVI acumulado da soja, para talhões 1 (A), 2 (B) e 3 (C) na safra 2017/18, talhão 1 (D) safra 2018/19 e talhão 2 (E) safra 2019/20, em Cruz Alta – RS.

5.4. Conclusões

O estudo analisou as condições meteorológicas ao longo de três safras de soja (2017/18, 2018/19 e 2019/20) na região de Cruz Alta (RS), com objetivo de explorar a relação entre a cobertura vegetal, definida pelo índice espectral NDVI, com a disponibilidade hídrica. Com distribuição regular e volumes elevados de chuva, em concordância ao necessário para maximizar a produção no estado do Rio Grande do Sul, a cultura da soja, nas safras 2017/18 e 2018/19, apresentou perfil temporal de máximo crescimento e desenvolvimento de plantas de soja ao longo do ciclo, baseado no “*NDVI Teórico*”. Nessas duas safras o índice espectral elucidou a favorabilidade meteorológica, confirmada a partir das produtividades de grãos. A terceira safra de soja analisada, 2019/20, apresentou menores índices pluviométricos, aumentando o déficit hídrico ao longo do ciclo. O efeito adverso da deficiência hídrica foi identificado através do índice espectral NDVI, permitindo verificar a influência meteorológica sobre a evolução temporal da cobertura foliar da soja e, ao final do ciclo, validar a partir da perda produtiva. O índice espectral NDVI apresentou correlação com a deficiência hídrica acumulada no ciclo de produção da soja. Os resultados evidenciaram e reafirmam a capacidade de identificar o efeito meteorológico a partir da observação do NDVI.

5.5. Referências

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO.
- Alvares C A, Stape J L, Sentelhas PC, Gonçalves, JL de M, Sparovek G (2013) Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 22(6):711-728. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- Barbosa HA, Kumarb TVL, Paredes F, Elliott S, Ayuga JG (2019) Assessment of Caatinga response to drought using Meteosat-SEVIRI Normalized Difference Vegetation Index (2008–2016). **SPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** 148:235-252
- Bariani CJMV et al. (2015) Monitoramento da fenologia da soja irrigada usando perfis de série temporal de NDVI. III INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, Fortaleza, Brasil, p. 1610–1618.
- Barros HB, et al. (2003) Efeito das épocas de semeadura no comportamento de cultivares de soja, no sul do estado do Tocantins. **Revista Ceres**, 50(291):565-572.
- Battisti R. **Épocas de semeadura da cultura da soja com base no risco climático e na rentabilidade líquida para as principais regiões produtoras do Brasil**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

Battisti R, Sentelhas PC (2019) Characterizing Brazilian soybean-growing regions by water deficit patterns. **Field Crops Research** 240:95-105.

Battisti R, Sentelhas PC, Pilau FG, Wollmann CA (2013) Eficiência climática para as culturas da soja e do trigo no estado do Rio Grande do Sul em diferentes datas de semeadura. **Cienc. Rural** 43(3):390-396. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000300003>

Breunig FM, Galvão LS, Formaggio AR, Epiphany JCN (2011) Directional effects on NDVI and LAI retrievals from MODIS: A case study in Brazil with soybean. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13:34-42.

Caturegli L, Matteoli S, Gaetani M, Grossi N, Magni S, Minelli A, Corsini G, Remorini D, Volterrani M (2020). Effects of water stress on spectral reflectance of bermudagrass. **Scientific Reports**, 10:15055. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72006-6>

Cerutti, DHH. **Combinação de imagens multi-espectrais e modelo de balanço hídrico para predição de rendimentos da soja no Sul do Brasil**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

Clevers J, et al. (2017) Using Sentinel-2 Data for Retrieving LAI and Leaf and Canopy Chlorophyll Content of a Potato Crop. **Remote Sensing** 9:405,.

CONAB. Série Histórica das safras. Disponível em: conab.gov.br. Acesso em 10 de fevereiro de 2021.

Crusiol LGT, et al. (2012) Comportamento espectral de diferentes genótipos de soja (GM para tolerância a seca e convencionais), em condição irrigada e sob estresse hídrico. VI Congresso Brasileiro de Soja, p. 1–4.

Crusiol, LGT, et al. (2013) NDVI de estádios de desenvolvimento da soja BRS 284 em condições de campo. **Jornada Acadêmica da Embrapa Soja**, 1973:87-91.

Cunha, G. R. da, et al. (2001) Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia** 9(3):446-459.

De La Casa, A. et al. (2018) Soybean crop coverage estimation from NDVI images with different spatial resolution to evaluate yield variability in a plot. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 146:531-547.

Diniz F de A, Ramos AM, Rebello ERG (2018) Brazilian climate normals for 1981-2010. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 53(2):131-143. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018000200001>

Farias JRB, Neumaier N, Nepomuceno AL (2009) Soja. In: Monteiro, JEBA. *Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola*. Brasília: INMET, cap. 15, p. 261-278.

Farias, JRB, Nepomuceno AL, Neumaier N (2007) *Ecofisiologia da Soja*. Circular Técnica - Embrapa Soja, v. 48..

- Fehr WR, Caviness CE (1977) Stages of soybean development. Ames: Iowa State University of Science and Technology. 11 p. (Special Report 80).
- Feng W, Guo BB, Wang ZJ, He L, Song X, Wang YH, Guo TC (2014) Measuring leaf nitrogen concentration in winter wheat using double-peak spectral reflection remote sensing data. **Field Crops Research** 159:43-52.
- Fontana DC, Berlato MA, Bergamaschi H (1992) Alterações micrometeorológicas na cultura da soja submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 27(5):661-669.
- Fontana DC, Weber E, Ducati JR, Berlato MA, Guasselli LA, Gusso A (2003) Monitoramento da cultura da soja no centro-sul do Brasil durante a La Niña 1998/2000. **Revista Brasileira de Agrometeorologia** 10(1):135-145.
- Grimm AM (2004) How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil? **Climate Dynamics** 22, 123 – 138.
- Grimm, AM, Barros VR, Doyle ME (2000) Climate variability in Southern South America associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate** 13:35-58. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<0035:CVISSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<0035:CVISSA>2.0.CO;2)
- Groff, EC. **Comportamento do NDVI da cultura da soja e sua relação com as variáveis agronômicas**. 2010. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.
- Gu Y, Brown JF, Verdin JP, Wardlow B (2007). A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. **Geophys. Res. Lett.** 34, 6.
- Hoyos-Villegas, V. et al. Ground-based digital imaging as a tool to assess soybean growth and yield. **Crop Science** 54(4):1756-1768.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção Agrícola Municipal. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/cruz-alta/pesquisa/14/10193>>. Acesso em: 14 dezembro 2020.
- Jacóbsen LO, Fontana DC, Shimabukuro YE (2003). Alterações na vegetação em macrozonas do Rio Grande do Sul associadas a eventos El Niño e La Niña, usando imagens NOAA. **Revista Brasileira de Agrometeorologia** 11:361-374.
- Jacóbsen LO, Fontana DC, Shimabukuro YE (2004). Efeitos associados a El Niño e La Niña na vegetação do estado do Rio Grande do Sul, observados através do NDVI/NOAA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 19(2):129-140.
- Jiang Z, et al. (2014) Application of crop model data assimilation with a particle filter for estimating regional winter wheat yields. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing** 7(11):4422-4431.

- Kimball BA, White JW, Wall GW, Ottman MJ (2012). Infrared-warmed and unwarmed wheat vegetation indices coalesce using canopy-temperature-based growing degree days. **Agronomy Journal** 104(1):114-118. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0144>
- Kross A, et al. (2015) Assessment of Rapid Eye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation** 34:235-248.
- LI C, et al. (2019) Using NDVI percentiles to monitor real-time crop growth. **Computers and Electronics in Agriculture** 162:357-363.
- Liu L, Yang X, Zhou H, Liu S, Zhou L, Li X, Yang J, Han X, Wu J (2018) Evaluating the utility of solar-induced chlorophyll fluorescence for drought monitoring by comparison with NDVI derived from wheat canopy. **Science of The Total Environment** 625:1208-1217.
- Liu S, Roberts DA, Chadwick AO, Still CJ (2012). Spectral responses to plant available soil moisture in a Californian grassland. **Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.** 19:31-44.
- Lobell DB (2013) The use of satellite data for crop yield gap analysis. **Field Crops Research** 143:56–64.
- Lobell DB, Ortiz-Monasterio JI (2006) Regional importance of crop yield constraints: Linking simulation models and geostatistics to interpret spatial patterns. **Ecological Modelling** 196(1-2):173-182.
- MAPA. Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Zoneamento agrícola de risco climático (ZARC) para a cultura da soja. Portaria nº 159, de 28 de maio de 2020. Disponível em: agricultura.gov.br. Acesso em: 10 de novembro de 2020.
- Martorano, LG. (2007) 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. 151 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- Matzenauer R, Barni NA, Maluf JRT (2003) Estimativa do consumo relativo de água para a cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural** 33(6):1013-1019. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000600004>
- Matzenauer R, Radin B, Maluf JRT (2017) O fenômeno ENSO e o regime de chuvas no Rio Grande do Sul. **Agrometeoros** 25(2):323-331.
- Melo RW, Fontana DC, Berlato MA, Ducati JR (2008) An agrometeorological-spectral model to estimate soybean yield, applied to southern Brazil. **International Journal of Remote Sensing** 29:4013-4028.
- Melo, RW de, Fontana DC, Berlato MA (2004) Indicadores de produção de soja no Rio Grande do Sul comparados ao zoneamento agrícola. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira** 39(12):1167-1175.

- Meng J, Du X, Wu B (2013) Generation of high spatial and temporal resolution NDVI and its application in crop biomass estimation. **International Journal of Digital Earth** 6(3):203-218.
- Nicholson SE, Farrar TJ (1994) The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. I. NDVI response to rainfall. **Remote Sensing of Environment** 50(2):107-120.
- NOAA (2020) National Weather Service. Cold & warm episodes by season. origin.pcp.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php.
- Nóia Júnior R de S, Sentelha PC (2019) Soybean-maize off-season double crop system in Brazil as affected by El Niño Southern Oscillation phases. **Agricultural Systems** 173:254-267.
- Reichert JM, Albuquerque JA, Kaiser DR, Reinert DJ, Urach FL, Carlesso R (2009) Estimation of water retention and availability in soil of Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 33:1547-1560. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000600004>
- Richetti J, et al. (2019) Remotely sensed vegetation index and LAI for parameter determination of the CSM-CROPGRO-Soybean model when in situ data are not available. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation** 79:110-115.
- Rizzi R (2005) Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul. 212p. (INPE-12271-TDI/983). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Rizzi R, Rudorff BFT (2005) Soybean crop area estimation in Rio Grande do Sul through Landsat images. **Revista Brasileira de Cartografia** 3:226-234.
- Rodigheri G, Fontana DC, Schaparini LP, Mendes AP da SF, Dalmago GA (2019) Análise espectro-temporal de NDVI e área da soja cultivada frente ao La Niña de 2012. **Agrometeoros**, 27(1):63-72. DOI: <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v27i1.26569>
- Rodigheri G, Fontana DC, Schaparini LP, Dalmago GA, Schirmbeck J (2020). Net primary productivity and dry matter in soybean cultivation utilizing datas of ndvi multi-sensors. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. XLII-3/W12-2020. DOI: 10.1109/LAGIRS48042.2020.9165573
- Rodrigues CP, Fontana DC, Moraes OLL de, Roberti DR (2013). NDVI e fluxo de CO₂ em lavoura de soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia** 28(1):95-104. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000100011>
- Salvadori JR, et al. (2016) Indicações Técnicas para a Cultura da Soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, safras 2016/2017 e 2017/2018. Reunião de Pesquisa da Soja da Região Sul, 41: 2016, Passo Fundo, RS, n. 1, p.55-112, 2016.

Santos JS, dos et al. (2014) 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** 18(1):54-63.

Schaparini LP, et al. (2019) Análise comparativa entre índices de vegetação e sua relação com o balanço hídrico em soja. **Agrometeoros** 27(1):183-190.

Silva GFC, Gonçalves ACA, Junior CA da S, Nanni MR, Facco CU, Cezar E, da Silva AA (2016) NDVI response to water stress in different phenological stages in culture bean. **Journal of Agronomy** 15(1):1-10. DOI: 10.3923/ja.2016.1.10

Souza PI de, Egli DB, Bruening, WP (1997) Water stress during seed filling and leaf senescence in soybean. **Agronomy Journal** 89(5):807-812.

Souza PJOP de, et al. (2016). Consumo hídrico da soja no nordeste paraense. **Irriga**, ed. Especial:218-231.

Stülp, M et al. (2009) Desempenho agrônômico de três cultivares de soja em diferentes épocas de semeadura em duas safras. **Ciência e Agrotecnologia** 33(5):1240-1248.

Tedeschi, RG, Grimm AM, Cavalcanti IFA, (2015) Influence of Central and East ENSO on extreme events of precipitation in South America during austral spring and summer. **International Journal of Climatology** 35:2045-2064.

Teillet PM, Fedosejevs G, Thome KJ (2004) Spectral band difference effects on radiometric cross-calibration between multiple satellite sensors in the Landsat solar-reflective spectral domain. *Sensors, Systems, And Next-generation Satellites Viii*, [s.l.], p.1-11.

Thornthwaite CW, Mather JR (1955) The water balance. Nex Jersey: Drexel Institute of Technology. 104 p. (Publications in Climatology, 1).

Wang J, Rich PM, Price KP (2003) Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. **International Journal of Remote Sensing** 24(11):2345-2364.

Wijewardana C, Alsajri FA, Irby JT, Krutz LJ, Golden B, Henry WB, Gao W, Reddy KR (2019) Physiological assessment of water deficit in soybean using midday leaf water potential and spectral features. **Journal of Plant Interactions** 14(1):533-543. <https://doi.org/10.1080/17429145.2019.1662499>

Wijewardana C, Reddy KR, Alsajri FA, Irby JT, Krutz J, Golden B (2018) Quantifying soil moisture deficit effects on soybean yield and yield component distribution patterns. **Irrigation Science** <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0580-1>

Xue J, Su B (2017) Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. **Journal of Sensor** article ID 1353691. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>

Zanon AJ, Streck NA, Grassini P (2016) Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal** 108(4):1447–1454. DOI: 10.2134/agronj2015.0535

Zhang F, Zhou G (2015) Estimation of canopy water content by means of hyperspectral indices based on drought stress gradient experiments of maize in the North Plain China. **Remote Sens.** 7:15203-15223. doi:10.3390/rs71115203

Zhang J, Li X, Yang R, Liu Q, Zhao L, Dou B (2017) An extended kriging method to interpolate near-surface soil moisture data measured by wireless sensor networks. **Sensors** 17:1390. doi:10.3390/s17061390