

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**Darlan Scapini Balest**

**DENSIDADE DE PLANTAS AGRONÔMICA ÓTIMA DE SOJA PARA ALTAS  
PRODUTIVIDADES EM AMBIENTE SUBTROPICAL**

Santa Maria, RS

2021

Ficha catalográfica elaborada através do programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Balest, Darlan Scapini  
DENSIDADE DE PLANTAS AGRONÔMICA ÓTIMA DE SOJA PARA  
ALTAS PRODUTIVIDADES EM AMBIENTE SUBTROPICAL / Darlan  
Scapini Balest.- 2021.  
36 p.; 30 cm

Orientador: Alencar Junior Zanon  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2021

1. Época de Semeadura 2. Grupo de Maturidade Relativa  
3. Índice de Área foliar I. Zanon, Alencar Junior II.  
Título.

---

@2021

Todos os direitos autorais reservados a Darlan Scapini Balest. A reprodução de parte ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: darlanbalest@gmail.com



**Darlan Scapini Balest**

**DENSIDADE DE PLANTAS AGRONÔMICA ÓTIMA DE SOJA PARA ALTAS  
PRODUTIVIDADES EM AMBIENTE SUBTROPICAL**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós- Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Orientador: Prof. Dr. Alencar Junior Zanon

Santa Maria, RS

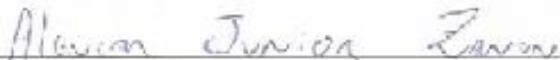
2021

Darlan Scapini Balest


**DENSIDADE DE PLANTAS AGRONÔMICA ÓTIMA DE SOJA PARA ALTAS  
PRODUTIVIDADES EM AMBIENTE SUBTROPICAL**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós- Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Aprovado em 19 de fevereiro de 2021:

  
Alencar Junior Zanon, Dr. (UFSM) - Videoconferência  
(Presidente/Orientador)

  
José Salvador Simonetti Foloni  
Pesquisador - Embrapa Soja  
José Salvador Simonetti Foloni, Dr. (EMBRAPA) - Videoconferência

  
Juliano Dalcin Martins, Dr. (UFSM) - Videoconferência

Santa Maria, RS

2021

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico a minha família, meu pai Pedrinho Balest, minha mãe Claci Donir Scapini Balest e  
minha irmã Francieli Scapini Balest.*

## AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

Aos extensionistas da EMATER/RS-ASCAR pela aplicação dos questionários em lavouras de produtores.

A Sementes Butiá, Grupo Ceolin, Agropecuária Cechin, Agropecuária Richter, Universidade Tecnológica do Paraná – Campos Santa Helena/PR pela realização dos experimentos e todo suporte.

Aos professores Dr. Alencar Junior Zanon e PhD. Nereu Augusto Streck pela orientação e ensinamentos, companheirismo e apoio.

As colegas e amigos da Equipe FieldCrops, PhenoGlad e Simanihot. Em especial, Eduardo Lago Tagliapietra, Giovani Antonello Barcellos, Gean Leonardo Richter, Simone Puntel, Kaleb Amaral, Cristian Savegnago, Felipe Sarmiento e Felipe Tardetti ao longo do mestrado e principalmente na condução dos experimentos e elaboração da dissertação.

Ao Josias Borges e Paola Buffon pela amizade e incentivo.

A todas as pessoas que auxiliaram na condução dos experimentos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de cota nível de mestrado.

MUITO OBRIGADO.

## RESUMO

### DENSIDADE DE PLANTAS AGRONÔMICA ÓTIMA DE SOJA PARA ALTAS PRODUTIVIDADES EM AMBIENTE SUBTROPICAL

AUTOR: Darlan Scapini Balest

ORIENTADOR: Alencar Junior Zanon

A densidade de plantas agronômica ótima (DPAO) é o número mínimo de plantas para maximizar a produtividade em uma lavoura de soja. Os objetivos foram: 1) determinar a DPAO para grupos de maturidade relativa entre 4.8 e 6.8, 2) determinar a relação da densidade de plantas com época de semeadura e GMR's para altas produtividades em ambiente subtropical. Para isso, foram acompanhadas 349 lavouras e conduzidos 21 experimentos em estações de pesquisas e lavouras de soja entre as safras 2016/2017 e 2019/2020. Em ambiente irrigado, a faixa de  $GMR \leq 5.5$  apresentou a DPAO de 30 plantas  $m^2$ , e as faixas  $5.5 < GMR < 6.5$  e  $GMR \geq 6.5$  apresentaram uma redução de 14% (26 plantas  $m^2$ ) e 30% (21 plantas  $m^2$ ), respectivamente. Em ambiente de sequeiro, a faixa de  $GMR \leq 5.5$  apresentou a DPAO de 29 plantas  $m^2$ , e as faixas  $5.5 < GMR < 6.5$  e  $GMR \geq 6.5$  apresentaram uma redução de 34% (10 plantas  $m^2$ ). A DPAO aumenta para semeaduras antecipadas (agosto) e semeaduras tardias (dezembro e janeiro) em relação a época preferencial (outubro) para os GMR 5.0. Ocorreu um incremento de produtividade nos GMR's intermediários, GMR 5.7 e 5.9, e GMR's tardios, 6.5 e 6.8 com as menores densidades de plantas para a época de semeadura de outubro e maiores densidades em agosto e janeiro. Esse estudo indica os valores de DPAO de acordo com o GMR's e a épocas de semeadura em lavouras de soja em ambiente subtropical.

Palavras-chave: *Glycine max*, Época de Semeadura, Grupos de Maturidade Relativa, Índice de Área Foliar, Arranjo de Plantas



## ABSTRACT

### OPTIMUM AGRONOMIC SOYBEAN PLANT DENSITY FOR HIGH YIELDS IN SUBTROPICAL ENVIRONMENT

AUTHOR: Darlan Scapini Balest

ADVISOR: Alencar Junior Zanon

The agronomic optimal plant density (AOPD) is the minimum number of plants needed to maximize grain yield in soybean crops. The aims of this work were: (i) to determine AOPD for different soybean maturity groups (MGs) in high yield sites and (ii) to determine AOPD for different sowing dates in high yield sites. To that end, 349 soybean fields were monitored and 21 experiments carried out at research stations and soybean fields, between the cropping seasons 2016/17 and 2019/20. Under irrigation, the plot with  $MG \leq 5.5$  presented AOPD equal to 30 plants  $m^{-2}$ , while the plots with  $5.5 < MG < 6.5$  and  $MG \geq 6.5$  presented reduction in AOPD of 14% (26 plants  $m^{-2}$ ) and 30% (21 plants  $m^{-2}$ ), respectively. Without irrigation, the plot with  $MG \leq 5.5$  presented AOPD equal to 29 plants  $m^{-2}$ , while the plots with  $5.5 < MG < 6.5$  and  $MG \geq 6.5$  presented reduction in AOPD of 34% (10 plants  $m^{-2}$ ). The AOPD values increased for early sowing (August) and late sowing (December and January) comparatively to the ideal sowing moment for  $MG = 5.0$  (October). Grain yield increased for intermediate MGs (5.7 and 5.9) and late MGs (6.5 and 6.8) when lower plant densities were sowed in October and higher plant densities were sowed in August and January. The present study provides the AOPD values according to MG and sowing date in soybean crops grown under subtropical conditions.

Keywords: *Glycine max*, Sowing Date, Maturity Groups, Leaf Area Index, Plant Arrangement

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: (A) Localização geográfica da região subtropical brasileira, (B) áreas de localização experimental (círculos vermelhos) e levantamentos aplicados nas lavouras (círculo preto vazado). Os experimentos foram realizados em duas safras (de 2018 a 2020), enquanto os levantamentos foram realizados em três safras (de 2016 a 2019). .....28
- Figura 2: Média mensal da radiação solar incidente (círculos vermelhos) e temperatura máxima ( $T_{máx}$ , quadrados preenchidos) e mínima ( $T_{mín}$ , quadrados vazados), e total precipitação (barras, correspondente ao eixo secundário). As setas indicam a data de semeadura (SE), florescimento (R1) e maturidade fisiológica (R8), segundo a escala fenológica da soja de Fehr e Caviness (1971) para as épocas de semeadura de agosto 17/08/2018 (verde), outubro 24/10/2018 (azul), janeiro 24/01/2019 (vermelha), outubro 10/10/2019 (cinza) e dezembro 19/12/2019 (amarela),.....31
- Figura 3: Relação entre a produtividade ( $Mg\ ha^{-1}$ ) e a densidade de plantas ( $m^2$ ) para grupos de maturidade relativa  $GMR \leq 5.5$  (A),  $5.5 > GMR < 6.5$  (B) e  $GMR \geq 6.5$  (C) e para ambientes irrigados (círculos azuis) e sequeiro (amarelo). A curva tracejada preta é a equação quadrática ou linear ajustada para ambientes irrigados e a linha sólida preta para ambientes de sequeiro. A linha tracejada vermelha é a platô de produtividade para densidade de plantas ótima acima do qual o ganho de produtividade é inferior a 1% por aumento de 1 planta por  $m^2$ . .....32
- Figura 4: Relação entre a produtividade ( $Mg\ ha^{-1}$ ) e a densidade de plantas ( $m^2$ ) grupos de maturidade relativa  $GMR\ 5.5$  (A),  $GMR\ 5.9$  (círculos) e  $5.7$  (triângulos) (C) e  $GMR\ 6.8$  (círculos) e  $6.5$  (triângulos) (E). Relação entre o máximo índice de área foliar (IAF)) e a densidade de plantas ( $m^2$ ) para os grupos de maturidade relativa  $GMR\ 5.5$  (B),  $GMR\ 5.9$  (círculos) e  $5.7$  (triângulos) (D) e  $GMR\ 6.8$  (círculos) e  $6.5$  (triângulos) (F) e épocas de semeadura 17/08/2018 (verde), 24/10/2018 (azul), 24/01/2019 (vermelho), 10/10/2019 (azul escuro) e 19/12/2019 (amarelo) irrigação suplementar. Santa Maria, RS, Brasil. A linha vermelha tracejada representa o IAF $_{máx}$  ótimo para altas produtividade (Tagliapietra et al. 2018). .....33

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Caracterização dos experimentos conduzidos durante 2 anos agrícolas (2018-2020) no Rio Grande do Sul e Paraná – Brasil .....	29
Tabela 2: Equações e estatísticas da estimativa de perda de produtividade para densidade de plantas abaixo e acima da densidade de plantas agronômica ótima para soja com grupos de maturidade relativa e ambientes irrigado e sequeiro. ....	30

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS .....	14
<b>1.1.1 Objetivo geral</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1.2 Objetivos específico</b> .....	<b>14</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
2.1 DENSIDADE DE PLANTAS .....	14
2.2 ÉPOCA DE SEMEADURA E GRUPO DE MATURADADE RELATIVA .....	16
<b>3 ARTIGO I</b> .....	<b>17</b>
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>34</b>
<b>5 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>35</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento contínuo de produtividade média nas lavouras de soja no Brasil, a partir do século XX, se deve a mudanças no sistema de produção. As semeaduras diretas permitiram a conservação e preservação do solo, a introdução de cultivares com o tipo de crescimento indeterminado e menor grupo de maturidade relativa ampliaram a época de semeadura e a inovação tecnológica da resistência genética a herbicidas, insetos e doenças flexibilizaram o manejo e permitiram atingir maior potencial de produtividade, reduzir custos, aumentaram a eficiência e competitividade da soja brasileira.

Para alcançar altas produtividades é necessário coincidir os estágios fenológicos que são definidos os componentes de produtividade com a melhor disponibilidade de recursos do ambiente (temperatura, radiação solar e precipitação) através do gerenciamento de época de semeadura, densidade de plantas e duração do ciclo de desenvolvimento (KANTOLIC et al, 2013). Entre essas práticas, a densidade de sementes e a densidade de plantas são as mais controladas pelos produtores (COX e CHERNEY, 2011; THOMPSON et al., 2015; MATCHAM et al. 2020). Ademais, a densidade de plantas é um dos principais fatores que provocam a lacuna de produtividade (TAGLIAPIETRA et al 2021).

Os estudos recentes de densidade de plantas e sementes na cultura da soja buscam determinar o mínimo de sementes por área para máxima produtividade em ambientes de produção (CARCIOCHI et al., 2019; CORASSA et al 2018) e os menores custos com sementes (THOMPSON et al., 2015; FERREIRA et al. 2020). Em ambientes com baixa disponibilidade de recursos ambientais a densidade de plantas deve aumentar, devido a menor plasticidade fenotípica das plantas aos baixos recursos ambientais disponíveis (SANTACHIARIA et al 2014; MATCHAM et al. 2020). A disponibilidade dos recursos do ambiente modifica a capacidade de ramificação e do índice de área foliar das plantas (ZANON et al. 2015; TAGLIAPIETRA et al. 2018) e o potencial de produtividade (ZANON et al 2016; TAGLIAPIETRA 2021).

No entanto, esses estudos desconsideram perdas de plantas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, a ampla época de semeadura em ambientes subtropicais (agosto até janeiro) e cultivares com tipo de crescimento indeterminado com GMR entre 4.8 e 6.8, principais fatores que provocam a lacuna de produtividade nas lavouras de soja em ambiente subtropical (TAGLIAPIETRA et al., 2021). Assim, é necessário entender as interações básicas de ecofisiologia entre densidade de plantas e ambiente para altas produtividades.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Determinar a densidade de plantas agronômica ótima da soja para grupos de maturidade relativa e época de semeadura em ambiente subtropical.

### 1.1.2 Objetivos específico

- I Determinar a densidade de plantas agronômica ótima em ambientes de altas produtividades
- II Determinar a densidade de plantas agronômica ótima para épocas de semeadura em ambientes de altas

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 DENSIDADE DE PLANTAS

A densidade de plantas modifica a intercompetição pelos recursos ambientais como radiação solar, água, nutrientes e a interação com o ambiente resulta em ganhos ou perdas de produtividade. O gerenciamento da densidade de plantas pode reduzir a diferença entre as produtividades atuais e potencial (VAN ITTERSUM et al., 2013; BUNSELMeyer e LAUER, 2015, TAGLIAPIETRA et al. 2021).

A densidade de plantas define o primeiro componente de produtividade, o número de plantas por área. A densidade de plantas varia com a cultivar (GMR e tipo de crescimento) e época de semeadura (SALMERON et al. 2016). Portanto, estudos de densidade de plantas precisam ser revistos periodicamente para as cultivares atuais e potencial de produtividade. Ademais, para soja a característica fenotípica de plasticidade permite alcançar produtividades similares em ampla população de plantas.

As cultivares de soja utilizadas na introdução da soja até final dos anos 90 e início de 2000 em comparação com as atuais evoluíram tanto em genética como morfológicamente (SUHRE et al 2014). As cultivares mais antigas eram mais sensíveis a densidade de plantas, especialmente por terem tipo de crescimento determinado, ciclos médios e longo. No Brasil, as recomendações de densidade de plantas eram de 300 a 400 mil plantas/ha (EMBRAPA 1985),

A mudança nos sistemas produtivos e utilização de cultivares de tipo de crescimento indeterminado e ciclo curto desencadearam ajustes no manejo.

A plasticidade da soja permite que a planta se adapte sua morfologia produzindo estruturas vegetativas e reprodutivas em decorrência do ambiente e espaço disponível para seu crescimento (TOYOTA et al. 2017, AGUDAMU; SHIRAIWAB 2016). Essa característica é possível pela presença de gemas auxiliares em cada nó da planta que podem se diferenciar em ramos secundários (ramificações) que produzem nós, folhas, flores, legumes e grãos (ZHANG et al. 2016), e aumentar o número de nós na haste principal e, potencialmente, o número de legumes e grãos por planta (SUHRE et al., 2014; SANTACHIARA et al., 2017).

A plasticidade da soja permite compensar a distribuição de plantas, perdas de plantas e alcançar produtividades de grãos similares mesmo em uma ampla faixa de população de plantas. Contudo, estando com baixo número de plantas, ou deficiente de recursos em épocas antecipadas e tardias o decréscimo na produtividade deve ocorrer, mesmo que o genótipo apresente capacidade de compensação (SUHRE et al., 2014; SALMERON et al., 2016; SANTACHIARA et al., 2017). A época de semeadura antecipada e tardia as baixas disponibilidades de recursos determinam o crescimento vegetativo e a emissão de ramificações (SETIYONO et al. 2011), e reduzem o IAF associada ao encurtamento do ciclo de desenvolvimento (ZANON et al 2015). O menor e insuficiente IAF reduz a interceptação da radiação solar e produção de fotoassimilados destinados a produção de grãos e ocasionam, conseqüentemente, a redução da produtividade final. A grande redução no número de plantas leva a menor eficiência no uso de recursos ambientais, principalmente, radiação solar (FERREIRA et al. 2020). A radiação solar é mais limitante entre a floração e enchimento de grãos para aumento da produtividade (KANTOLIC et al, 2013). Com isso deve-se conhecer a densidade de plantas que permite alcançar altas produtividades.

Os estudos, recentes, trazem o conceito de densidade de plantas agrônômica ótima, que é definida como o número mínimo de plantas para maximizar a produtividade (CARCIOCHI et al., 2019). O cultivo com mínimo de sementes por área pode aumentar a lucratividade por reduzir a competição intraespecífica e diminuir os custos com sementes (THOMPSON et al., 2015; FERREIRA et al. 2020). Os trabalhos mais recentes trazem uma divisão de densidade de sementes por ambientes de produtividade (CARCIOCHI et al., 2019; CORASSA et al 2018). Nos EUA a densidade pode ser reduzida em 24% e no Brasil até 18% ao passar de ambientes de alta ( $>5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) para ambientes de baixa produtividade ( $<4 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) (CARCIOCHI et al., 2019; CORASSA et al 2018). Esses resultados são importantes para definir manejo por zonas de produtividade e semeaduras a taxas variadas.

## 2.2 ÉPOCA DE SEMEADURA E GRUPO DE MATURIDADE RELATIVA

Grupo de maturidade relativa (GMR) corresponde a duração do ciclo de desenvolvimento da cultura, desde a semeadura até o ponto de colheita (R8) (ALLIPRANDINI et al., 2009). A época de semeadura define as condições meteorológicas em cada estágio fenológico da cultura. O ambiente que proporciona a obtenção das maiores produtividades é obtido pela escolha da época de semeadura e escolha do grupo de maturação relativa para que os estágios fenológicos mais críticos coincidam com as condições ambientais mais favoráveis, minimizando a ocorrência de períodos de estresses nos estágios mais vulneráveis (MARTIGNONE et al., 2006).

A perfeita interação entre os fatores clima, manejo e genética permite o alcance do potencial de produtividade de uma lavoura de soja. O potencial de produtividade em relação a época de semeadura é estimado em uma perda de 32 a 53 kg.ha<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup> de atraso na época de semeadura, para a região produtora dos Estados Unidos da América (GRASSINI et al. 2015). Para ambiente subtropical, ocorre uma perda de produtividade de 25 a 30 kg.ha<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup> de acordo com o GMR e época de semeadura (ZANON et al. 2016; TAGLIAPIETRA et al., 2021). Os menores riscos de perdas de produtividade em ambiente de terras baixas ocorrem em semeaduras entre o primeiro e o segundo decêndio de novembro (BORTOLUZZI et al. 2020).

O ambiente, definido pela data de semeadura, é o principal fator de variabilidade nas produtividades e explicam que 80% da variação enquanto apenas 20% ocorrem em virtude dos efeitos de genótipo e da interação genótipo x ambiente (ASFAW et al., 2009; YAN, 2001). Estudos, não encontraram interação entre GMR e data de semeaduras precoces, possivelmente pela coincidência de uma faixa de melhor disponibilidade climática nos estágios críticos da cultura, independente do GMR, (GRASSINI et al. 2015). Já para semeaduras tardias essa interação foi significativa, pois GMR baixos semeados em períodos de decréscimo do fotoperíodo tendem a encurtar o ciclo e conseqüentemente reduzem a produtividade (ZANON et al. 2016).

Para maximizar a produtividade e minimizar os danos por estresses ambientais, os produtores devem conhecer a interação entre GMR e época de semeadura para a sua latitude (SALMERÓN et al. 2016, MATCHAM et al. 2020). Mourtzinis et al. (2017), estimaram que uma mesma cultivar semeada em diferentes épocas pode apresentar uma diferença de 1.2 Mg



ha-1 de produtividade para um mesmo ambiente. Porém, nem sempre atingir o potencial é o objetivo dos produtores. Algumas regiões do planeta, sob condições de sequeiro, os produtores optam por minimizar os riscos climáticos e escalonar a semeadura em diferentes épocas, ou então maximizar a produtividade e retorno econômico do seu sistema de cultivo.

Em ambiente subtropical a combinação de GMR entre menores e intermediários com semeadura antecipada tem-se o maior potencial de produtividades, principalmente em resposta do quociente fototérmico desse grupo de cultivares de menores GMR (ZANON et al. 2016, ZDZIARSKI et al., 2018, TAGLIAPIETRA et al. 2021).

### 3 ARTIGO I

*Densidade de plantas agronômica ótima de soja para altas produtividades em ambiente subtropical*

#### **Resumo**

A densidade de plantas agronômica ótima (DPAO) é o número mínimo de plantas para maximizar a produtividade em uma lavoura de soja. Os objetivos foram: (i) determinar a DPAO para GMRs em ambiente de altas produtividades e (ii) determinar a DPAO para épocas de semeadura em ambiente de altas produtividades. Para isso, foram acompanhadas 349 lavouras e conduzidos 21 experimentos em estações de pesquisas e lavouras de soja entre as safras 2016/2017 e 2019/2020. Em ambiente irrigado, a faixa de  $GMR \leq 5.5$  apresentou a DPAO de 30 plantas  $m^2$ , e as faixas  $5.5 < GMR < 6.5$  e  $GMR \geq 6.5$  apresentaram uma redução de 14% (26 plantas  $m^2$ ) e 30% (21 plantas  $m^2$ ), respectivamente. Em ambiente de sequeiro, a faixa de  $GMR \leq 5.5$  apresentou a DPAO de 29 plantas  $m^2$ , e as faixas  $5.5 < GMR < 6.5$  e  $GMR \geq 6.5$  apresentaram uma redução de 34% (10 plantas  $m^2$ ). A DPAO aumentaram para semeadura antecipada (agosto) e semeaduras tardias (dezembro e janeiro) em relação a época preferencial (outubro) para os GMR 5.0. Ocorreu um incremento de produtividade nos GMR's intermediários, GMR 5.7 e 5.9, e GMR's tardios, 6.5 e 6.8 com as menores densidades de plantas para a época de semeadura de outubro e maiores densidades em agosto e janeiro. Esse estudo indica os valores de DPAO de acordo com o GMR's e a épocas de semeadura em lavouras de soja em ambiente subtropical.

**Palavras chaves:** *Glycine max*, Época de Semeadura, Grupos de Maturidade Relativa, Índice de Área Foliar, Arranjo de Plantas

**Abstract**

The agronomic optimal plant density (AOPD) is the minimum number of plants needed to maximize grain yield in soybean crops. The aims of this work were: (i) to determine AOPD for different soybean maturity groups (MGs) in high yield sites and (ii) to determine AOPD for different sowing dates in high yield sites. To that end, 349 soybean fields were monitored and 21 experiments carried out at research stations and soybean fields, between the cropping seasons 2016/17 and 2019/20. Under irrigation, the plot with  $MG \leq 5.5$  presented AOPD equal to 30 plants  $m^{-2}$ , while the plots with  $5.5 < MG < 6.5$  and  $MG \geq 6.5$  presented reduction in AOPD of 14% (26 plants  $m^{-2}$ ) and 30% (21 plants  $m^{-2}$ ), respectively. Without irrigation, the plot with  $MG \leq 5.5$  presented AOPD equal to 29 plants  $m^{-2}$ , while the plots with  $5.5 < MG < 6.5$  and  $MG \geq 6.5$  presented reduction in AOPD of 34% (10 plants  $m^{-2}$ ). The AOPD values increased for early sowing (August) and late sowing (December and January) comparatively to the ideal sowing moment for  $MG = 5.0$  (October). Grain yield increased for intermediate MGs (5.7 and 5.9) and late MGs (6.5 and 6.8) when lower plant densities were sowed in October and higher plant densities were sowed in August and January. The present study provides the AOPD values according to MG and sowing date in soybean crops grown under subtropical conditions.

**Keywords:** *Glycine max*, Sowing Date, Maturity Groups, Leaf Area Index, Plant Arrangement

## Introdução

A soja (*Glycine max* L.) é uma cultura agrícola chave na segurança alimentar global por ser utilizada como fonte de proteína e óleo para alimentação humana e animal, representando 31% da produção da oleaginosa (USDA-FAS 2020). Brasil, Argentina e Paraguai produzem mais de 50% da produção mundial de soja (USDA-FAS, 2020). O Brasil tornou-se o maior produtor, exportador e tem as maiores produtividades médias do mundo devido a ampliação da época de semeadura, utilização de cultivares com tipo de crescimento indeterminado e uso de cultivares com uma faixa de grupos de maturidade relativa (GMR) variando de 4.8 até 10.0 (Zanon et al. 2018).

A densidade de plantas agronomicamente ótima (DPAO) é definido como o número de plantas por área que minimiza a competição intra-específica e que maximiza a eficiência no uso de recursos ambientais (radiação solar, temperatura e água) e nutrientes (Carciochi et al., 2019). Além disso, a DPAO permite indicar a quantidade de plantas necessária por ambiente de produção e conseqüentemente reduzir os custos com sementes para implantação da lavoura (Thompson et al., 2015; Ferreira et al. 2020). Apesar da densidade de plantas ser foco de estudos desde a introdução da soja no Brasil (Zanon et al., 2018), esse tema precisa ser revisitado constantemente, em virtude dos ganhos genéticos e de manejo que ocorrem nas lavouras de soja (Matcham et al. 2020, Balbinot Junior et al. 2018) e por ser um dos principais fatores que provocam a lacuna de produtividade nas lavouras de soja em ambiente subtropical (Tagliapietra et al. 2021). Com a transição de uma agricultura baseada em insumos para processos, estudos de ecofisiologia são ainda mais importantes devido a necessidade de aumentar a produtividade de forma sustentável e pelos novos patamares de potencial produtividade registrados em lavouras de soja (Tagliapietra et al., 2021).

Os recentes estudos com densidade de sementes para ambientes de produção nos Estados Unidos e Brasil indicam a redução de até 24% e 18% ao passar de ambientes de baixas produtividade ( $4 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) para altas produtividade ( $5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) (Carciochi et al., 2019; Corassa et al. 2018). No entanto, esses estudos desconsideram perdas de plantas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura e não discriminam os resultados em GMRs e épocas de semeadura, principais fatores que provocam a lacuna de produtividade nas lavouras de soja em ambiente subtropical (Tagliapietra et al., 2021). Assim, é necessário entender as interações básicas de ecofisiologia entre plantas e com o ambiente a nível de lavoura, para cultivares com tipo de crescimento indeterminado com GMR entre 4.8 e 6.8, em semeaduras precoces (agosto e setembro), preferencial (outubro) e tardias (janeiro e fevereiro) para altas produtividades ( $> 5$

Mg ha<sup>-1</sup>). Para isso, foram acompanhadas 349 lavouras e conduzidos 22 experimentos em estações de pesquisas e lavouras de soja entre as safras 2016/2017 e 2019/2020, com uma ampla variabilidade de manejo, solos e ambientes. Os objetivos do estudo foram: (i) determinar a DPAO para GMRs em ambiente de altas produtividades e (ii) determinar a DPAO para épocas de semeadura em ambiente de altas produtividades.

## **Material e métodos**

### *Caracterização experimental e da região de estudo*

Foram acompanhadas 349 lavouras de soja no Rio Grande do Sul, Brasil, englobando as distintas características edafoclimáticas das regiões produtoras de soja nas safras 2016/2017, 2017/2018, 2018/2019 e 2019/2020. Foram coletadas informações de data de semeadura, cultivar (grupo de maturidade relativa), densidade de plantas, e produtividade através de questionários aplicados por consultores agrícolas, pesquisadores e pelos extensionistas EMATER/RS-ASCAR (Figura 1).

Experimentos de campo foram conduzidos em 2018/2019 e 2019/2020 no Rio Grande do Sul (RS) e na safra 2019/2020 em Santa Helena no Paraná (PR), que geraram uma combinação de 22 local-ano (Tabela 1). Os GMRs variaram entre 4.8 e 6.8, principal faixa utilizada pelos produtores no Sul do Brasil. As unidades experimentais foram fertilizadas com a exigência do ambiente e para expectativa de produtividade de 8 Mg ha<sup>-1</sup>. O controle de insetos e doenças foram realizadas visando manter a cultura livre de interferência biótica. O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso com quatro repetições. As densidades de plantas foram determinadas na colheita, contando-se o número de plantas em três metros lineares e a produtividade de grãos foi obtida das duas linhas centrais (5 m<sup>2</sup>) das parcelas e corrigida para 130 g kg<sup>-1</sup> de umidade

### *Função limite para relação densidade de plantas agrônômica ótima e grupo de maturidade relativa*

O conjunto de dados (experimentos e questionários) foram classificados de acordo com os regimes hídricos (irrigado e não irrigado) e faixas de grupos de maturidade relativa: GMR

<5.5,  $5.5 \leq \text{GMR} < 6.5$  e  $\text{GMR} \geq 6.5$ . Essa classificação dos grupos de GMR foi fundamentada no comportamento semelhante das cultivares em duração do ciclo e para obter um número confiável de observações em cada faixa. Para identificar a densidade agrônômica ótima para grupos de GMR foi utilizada a metodologia de função limite (French and Schultz 1984), que relacionam a máxima produtividade de acordo com a densidade de plantas. A metodologia de função limite, recentemente, foi utilizada para identificar a perda de produtividade em função da época de semeadura (Zanon et al. 2016) e o índice de área foliar ótima (Tagliapietra et al. 2018) para soja em ambiente subtropical. As equações foram ajustadas para a relação entre densidade de plantas e produtividade, de acordo com a melhor representação biológica e do ajuste do coeficiente de correlação. Para cultivares com  $\text{GMR} < 5.5$  irrigado (Eq. [1]) e sequeiro (Eq. [2]),  $5.5 \leq \text{GMR} < 6.5$  irrigado (Eq. [3]) e sequeiro (Eq. [4]) e  $\text{GMR} \geq 6.55$  irrigado (Eq. [5]) e sequeiro (Eq. [6]).

$$\text{YI}_{\text{GMR} < 5.5} = -0.0047 \cdot \text{DP}^2 + 0.3438 \cdot \text{DP} + 1.2540 \quad (\text{R}^2 = 0.82, \text{p} = 0.31) \quad [1]$$

$$\text{YS}_{\text{GMR} < 5.5} = -0.0044 \cdot \text{DP}^2 + 0.2957 \cdot \text{DP} + 0.1314 \quad (\text{R}^2 = 0.74, \text{p} = 0.55) \quad [2]$$

$$\text{YI}_{5.5 \leq \text{GMR} < 6.5} = -5.105 \cdot \text{DP}^2 + 320.57 \cdot \text{DP} + 2118.9 \quad (\text{R}^2 = 0.75, \text{p} = 0.44) \quad [3]$$

$$\text{YS}_{5.5 \leq \text{GMR} < 6.5} = 1.2406 \cdot \text{DP}^2 + 49.356 \cdot \text{DP} + 5050.4 \quad (\text{R}^2 = 0.77, \text{p} < 0.01) \quad [4]$$

$$\text{YI}_{\text{GMR} \geq 6.5} = -0.0025 \cdot \text{DP}^2 + 0.1603 \cdot \text{DP} + 3.8026 \quad (\text{R}^2 = 0.73, \text{p} < 0.01) \quad [5]$$

$$\text{YS}_{\text{GMR} \geq 6.5} = -0.0383 \cdot \text{DP} + 5.9714 \quad (\text{R}^2 = 0.87, \text{p} < 0.01) \quad [6]$$

onde,  $\text{YI}_{\text{GMR}}$  representa a produtividade do grupo de GMR em ambiente irrigados e  $\text{YS}_{\text{GMR}}$  ambientes de sequeiro e DP representa a densidade de plantas finais por  $\text{m}^2$ .

A faixa de máxima produtividade por grupo de GMR foi considerado quando os valores de DPAO não provocaram um acréscimo ou decréscimo de 1% na produtividade. Sendo assim, a DPAO mínima da função limite é considerada a densidade de plantas agrônômica ótima para altas produtividades, não limitando a produtividade e com menores custos de sementes por área. Para quantificar as perdas de produtividade em relação a densidade de plantas foi gerada equações lineares anterior e posterior a estabilidade na produtividade (platô) (Tabela 2).

*Relação entre densidade de plantas agronômicas ótima, época de semeadura e grupos de maturidade relativa*

A época de semeadura condiciona a disponibilidade alta ou baixa de recursos do ambiente precursores do crescimento das plantas e do potencial de produtividade (Figura 2). A relação entre densidade de plantas e produtividade para as épocas de semeadura, foi realizada com os experimentos de Santa Maria nas safras 2018/2019 e 2019/2020 em condição irrigada (Tabela 1). Os dados foram normalizados em relação aos GMRs e datas de semeadura como fatores de respostas a produtividade e densidade de plantas. O índice de área foliar (IAF) foi determinado segundo a metodologia descrita por Richther et al. (2014) para os em experimentos de campo de Santa Maria nas safras agrícola 2018/2019 e 2019/2020 (Tabela1).

## **Resultados e Discussão**

*Influência do grupo de maturidade relativa na densidade de plantas agronômica ótima*

Em ambiente irrigado, a faixa de  $GMR \leq 5.5$  apresentou a DPAO de 30 plantas  $m^2$ , e as faixas  $5.5 < GMR < 6.5$  e  $GMR \geq 6.5$  apresentaram uma redução de 14% (26 plantas  $m^2$ ) e 30% (21 plantas  $m^2$ ), respectivamente. Em ambiente de sequeiro, a faixa de  $GMR \leq 5.5$  apresentou a DPAO de 29 plantas  $m^2$ , e as faixas  $5.5 < GMR < 6.5$  e  $GMR \geq 6.5$  apresentaram uma redução de 34% (10 plantas  $m^2$ ) (Figura 3). As diferentes DPAO para os GMRs pode ser explicada pela duração do ciclo de desenvolvimento, que quanto maior o GMR, maior a duração para um mesmo local de cultivo (Zanon et al., 2015a), e também, pelo maior número de ramificações emitidas (maior índice de área foliar) em cultivares com maior GMR (Zanon et al., 2015b; Tagliapietra et al, 2018). Em estudos anteriores, para latitude  $36^{\circ}05' N$ , determinaram para máximas produtividades a densidades 60 e 25 plantas  $m^2$  para GMR 0 e IV, respectivamente, (Edwards e Purcell 2005). Thompson et al (2015), em Mid-South (USA), definiram densidades de sementes para os GMR III (278,000 e 354,000 sementes  $ha^{-1}$ ) IV (83,000 e 63,000 sementes  $ha^{-1}$ ) e V (104,000 e 60,000 sementes  $ha^{-1}$ ) para espaçamento entre fileira de 38cm e 76 cm, respectivamente. Esses resultados corroboram com a necessidade de ajustar a densidade de plantas em relação ao grupo de maturidade relativa.

As perdas de produtividade por baixa e alta densidade de plantas a partir da faixa de DPAO é maior para cultivares de  $GMR's \leq 5.5$ ,  $5.5 < GMR < 6.5$  e  $GMR \geq 6.5$  respectivamente, exceto para altas densidades  $5.5 < GMR < 6.5$  no ambiente irrigado (Figura 3). As perdas de produtividade por densidade de plantas abaixo da DPAO são de 120, 115 e 90 Kg ha/ planta m<sup>2</sup> e acima da DPAO 132, 120 e 90 Kg ha/ planta m<sup>2</sup> para os  $GMR < 5.5$ ,  $5.5 < GMR < 6.5$  e  $GMR \geq 6.5$ , respectivamente, em ambiente irrigado. Em ambientes de sequeiro as perdas de produtividade por densidade de plantas acima da DPAO são de 140, 73 e 30 Kg ha/ planta m<sup>2</sup> para os  $GMR < 5.5$ ,  $5.5 < GMR < 6.5$  e  $GMR \geq 6.5$ , respectivamente, e abaixo da DPAO é 115 Kg ha/ planta m<sup>2</sup> para o  $GMR < 5.5$ , e não houve perdas de produtividade para os  $5.5 < GMR < 6.5$  e  $GMR \geq 6.5$  por reduzir-se a densidade de plantas até a densidade de plantas de 10 plantas m<sup>2</sup>.

Em baixas densidades, as plantas de soja compensam a produtividade pela plasticidade (Ferreira et al., 2016; Ribeiro et al. 2017, Balbinot Junior et al. 2018). A plasticidade, e atribuída a emissão de hastes secundárias, mantendo similar o número de legumes por área (Agadamu et al. 2016; Balbinot Junior et al. 2018). Os GMRs menores têm menor contribuição de ramificações e plasticidade, o que explica as maiores perdas de produtividade e a necessidade de população de plantas mais alta (Zanon et al. 2015b, Tagliapietra et al. 2021). Em altas densidades as plantas de soja têm maiores alturas como uma estratégia para interceptar a radiação solar em maior quantidade e qualidade, o que também resulta em menos ramificações, levando a um número menor de legumes por planta (Suhre et al., 2014) e maior risco de acamamento.

Após determinado a DPAO por grupos de GMRs, os produtores devem ter muita atenção no processo de semeadura para ter uma distribuição equidistante de plantas, principalmente, em ambientes de sequeiro que a DPAO é menor. Um reduzido número de sementes associado a problemas na semeadura e no estabelecimento inicial, podem provocar uma grande redução no número de plantas e conseqüentemente provocam perdas irreversíveis no potencial de produtividade da lavoura (Santachiara et al. 2017). Para reduzir o risco os produtores devem ajustar a densidade de sementes na semeadura com as porcentagens de germinação e vigor dos lotes de semente.

*Densidade de plantas agronômica ótima em função da época de semeadura e grupo de maturidade relativa*

A relação entre a produtividade e a densidade de plantas para épocas de semeadura indicaram que a DPAO aumentam para semeaduras antecipadas (agosto) e semeaduras tardias (dezembro e janeiro) em relação a época preferencial de semeadura (outubro) (Figura 2A e 2C). Em semeaduras antecipadas as condições de menor temperatura do ar ( $10^{\circ}\text{C}$ ) reduzem as taxas de expansão foliar com maior impacto em cultivares de ciclo menores (Sinclair, 1984; Tagliapietra et al 2018), e para semeaduras tardias a função da redução fotoperíodo e maior temperatura do ar ( $30^{\circ}\text{C}$ ) reduzem o ciclo de desenvolvimento da soja em até 50 dias (Setiyono et al. 2007; Zanon et al 2018). Estudos conduzidos entre 2003 e 2005, nos EUA, também indicaram o aumento da DPAO em 120% com atraso na época de semeadura para incremento na produtividade (Lee et al., 2008). Esses resultados de DPAO por época de semeadura trazem informações novas para lavouras de soja em ambiente subtropical do Brasil, pois a semeadura que era concentrada no mês de novembro foi ampliada nos últimos 15 anos para setembro até fevereiro. (Zanon et al. 2016).

Para os maiores ( $5.5 < \text{GMR} < 6.5$  e  $\text{GMR} \geq 6.5$ ) os valores de IAF são maiores em relação aos GMRs menores ( $\text{GMR} \leq 5.5$ ). Os GMRs menores apresentam uma redução do IAF<sub>máx</sub> em semeaduras antecipadas e tardias quando comparadas ao período preferencial (Zanon et al. 2015b, Tagliapietra et al. 2018). No entanto, para todos os GMR, os máximos IAF ocorreram na época de semeadura de outubro, comprovando a relação do IAF com a disponibilidade de recursos ambientais (temperatura, radiação solar) que favorecem o crescimento das plantas, expansão foliar e emissão de ramificações. O IAF entre 6.0 e 8.0 foi determinado como ótimo para altas produtividades em ambiente subtropical (Tagliapietra et al. 2018). As épocas de semeadura fora do período preferencial (agosto, dezembro e janeiro) foram as de menores potencial de produtividades e mesmo com o aumento da densidade para as épocas mais extremas de agosto e janeiro o IAF foi limitante (Figura 4B, D e F). O baixo IAF é devido ao curto fotoperíodo nessas épocas de semeadura que levam as cultivares a induzirem o início da fase reprodutiva (Setiyono et al. 2007), reduzirem a fase vegetativa e menor contribuição de ramificações no IAF (Zanon et al 2015b). No entanto, valores muito acima do ideal (acima de IAF 8) ocasionam perdas de produtividade, como na época de outubro em maiores densidades de plantas, principalmente, em GMRs maiores  $5.5 < \text{GMR} < 6.5$  e  $\text{GMR} \geq 6.5$  (Figura 4). A partir desses resultados verifica-se a necessidade de planejar a lavoura de soja e posicionar as



cultivares de soja e época de semeadura levando em consideração atingir IAF de 3,0 a 4,0 no florescimento e de 6,0 a 8,0 no enchimento de grãos (Tagliapietra et al., 2018).

Esse estudo determinou a densidade de plantas agronômica ótima para grupos de maturidade relativa e épocas de semeadura para ambientes subtropical com informações a nível de lavouras. Usando esse tipo de análise e conjunto de dados, com vários anos/safras, locais, GMRs e informações de lavouras, contínuos minimizam os problemas de representar unicamente a produtividade da soja em função da densidade de plantas e beneficiam uma recomendação mais ampla e segura para produtores, agrônomos e consultores usarem em lavouras de soja. No entanto, estudos subsequentes de ecofisiologia devem considerar a interceptação da radiação cumulativa para grupos de maturidade relativa, épocas de semeadura e densidade de plantas.

## Conclusão

A densidade de plantas agronômica ótima para altas produtividades para  $GMR \leq 5.5$  é de 30 plantas  $m^2$  e 29 plantas  $m^2$ ,  $5.5 < GMR < 6.5$  de 26 plantas  $m^2$  e 10 plantas  $m^2$  e para  $GMR \geq 6.5$  de 21 plantas  $m^2$  e 10 plantas  $m^2$  para ambiente irrigado e sequeiro, respectivamente.

A densidade de plantas deve ser ajustada para época de semeadura e GMR. Deve-se aumentar a densidade de plantas para semeadura antecipadas e tardias. Para época preferencial de semeadura as densidades de plantas devem ser ajustadas de acordo com o GMR.

## Referências

- Carchiochi, W.D., R Schwalbert, F.H. Andrade, G.M. Corassa, P. Carter, A.P. Gaspar, J. Schidt, and I.A. Ciampitti. 2018. Soybean Seed Yield Response to Plant Density by Yield Environment in North America. *Agron. J.* 111:1923-1932. doi: 10.2134/agronj2018.10.0635
- Corassa, G.M., T.J.C. Amado, M.L. Strieder, R. Schwalbert, J.L.F. Pires, P.R. Carter, and I.A. Ciampitti. 2018. Optimum soybean seeding rates by yield environment in southern Brazil. *Agron. J.* 110:2430–2438. doi:10.2134/agronj2018.04.0239
- Edwards, J.T., and L.C. Purcell. 2005. Soybean yield and biomass responses to increasing plant population among diverse maturity groups. *Crop Sci.* 45:1770–1777. doi:10.2135/cropsci2004.0564.

- Fehr, W.R., C.E. Caviness, D.T. Burmood, and J.S. Pennington. 1971. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.). Merrill. *Crop Sci.* 11:929–931. doi:10.2135/cropsci1971.0011183X001100060051x.
- Ferreira, A.S., C. Zucareli, F. Werner, I.C.de B. Fonseca, and A.A. Balbinot Junior. 2020. Minimum optimal seeding rate for indeterminate soybean cultivars grows in the tropics. *Agron. J.* 112:2092–2102. doi: 10.1002/agj2.20188
- French, R.J., and J.E. Schultz. 1984. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean type environment. I. The relation between yield, water use and climate. *Aust. J. Agric. Res.* 35:743–764. doi:10.1071/AR9840743
- Lee, C.D., D.B. Egli, and D.M. TeKrony. 2008. Soybean response to plant population at early and late planting dates in the Mid-South. *Agron. J.* 100(4):971–976. doi:10.2134/agronj2007.0210
- Matcham, E.G., S. Mourtzinis, S.P. Conley, J.I.R. Edreira, P. Grassini, A.C.Roth, S.N. Casteel, I.A. Ciampitti, H.J. Kandel, P.M. Kyveryga, M.A. Licht, D.S. Mueller, E.D. Nafziger, S.L. Naeve, J.D Stanley, M.J. Staton, and L.E Lindsey. 2020. Management strategies for early-and late-planted soybean in the north-central United States. *Agron. J.* 112:2928-2943. doi: 10.1002/agj2.20289.
- Richter, G.L., A.J. Zanon, N.A. Streck, J.V.C. Guedes, B. Kräulich, T.S.M. Rocha, J.E.M. Wink, and J.C. Cera. 2014. Estimating leaf area of modern soybean cultivars by a non-destructive method. *Bragantia* 73:416–425. doi:10.1590/1678-4499.0179
- SANTACHIARA, G., L. Borrás, and J.L. Rotundo. 2017. Physiological Processes Leading to Similar Yield in Contrasting Soybean Maturity Groups. *Agron. J.* 109: 158-167. doi: 10.2134/agronj2016.04.0198.
- Setiyono, T.D., A. Weiss, J. Specht, A.M. Bastidas, K.G. Cassman, and A. Dobermann. 2007. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high yield conditions. *Field Crops Res.* 100:257–271. doi:10.1016/j.fcr.2006.07.011
- Tagliapietra, E. L., N. A. Streck, T.S.M. Rocha, G.L. Richter, M.R. Silva, J.C. Cera, J.V.C. Guedes, and A.J. Zanon. 2018. Optimum leaf area index to reach soybean yield potential in subtropical environment. *Agron. J.* 110:932-938. doi: 10.2134/agronj2017.09.0523.
- Tagliapietra, E.L., A.J. Zanon, N.A. Streck, D.S. Balest, S.L. Da Rosa, K.P. Bexaira, G.L. Richter, G.G. Ribas, and M.R. Da Silva. 2021. Biophysical and management factors causing gap in soybean in the Subtropics of Brasil. doi: 10.1002/agj2.20586.
- Thompson, N.M., J.A. Larson, D.M. Lambert, R.K. Roberts, A. Mengistu, N. Bellaloui, and E.R. Walker. 2015. Mid-South soybean yield and net return as affected by plant population and row spacing. *Agron. J.* 107:979–989. doi: 10.2134/agronj14.0453
- USDA–FAS. 2018. World agricultural production. USDA–Foreign Agric. Serv. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf> (accessed 10 Jan 2021).
- Zanon, A. J., M. R. Da Silva, E.L. Tagliapietra, J.C Cera, K.P. Bexaira, G.L.Richter, A. J. D. Junior, T. S. M. Da Rocha, P.S. Weber, and N.A.Streck, 2018. Ecofisiologia da soja: visando altas produtividades. 136 p.

Zanon, A.J., N.A. Streck, and P. Grassini. 2016. Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. *Agron. J.* 108:1447–1454. doi:10.2134/agronj2015.0535

Zanon, A.J., N.A. Streck, G.L. Richter, C.C. Becker, T.S.M. Rocha, J.C. Cera, J.E.M. Winck, A.P. Cardoso, E.L. Tagliapietra, and P.S. Weber. 2015a. Branches contribution and leaf area index evolution in modern cultivars of soybean. (In Portuguese, with English abstract.) *Bragantia* 74:279–290. doi:10.1590/1678-4499.0463

Zanon, A.J., J.E.M. Winck, N.A. Streck, T.S.M. Rocha, J.C. Cera, G.L. Richter, I. Lago, P.M. dos Santos, L.R. Maciel, J.V.C. Guedes, and E. Marchesan. 2015b. 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

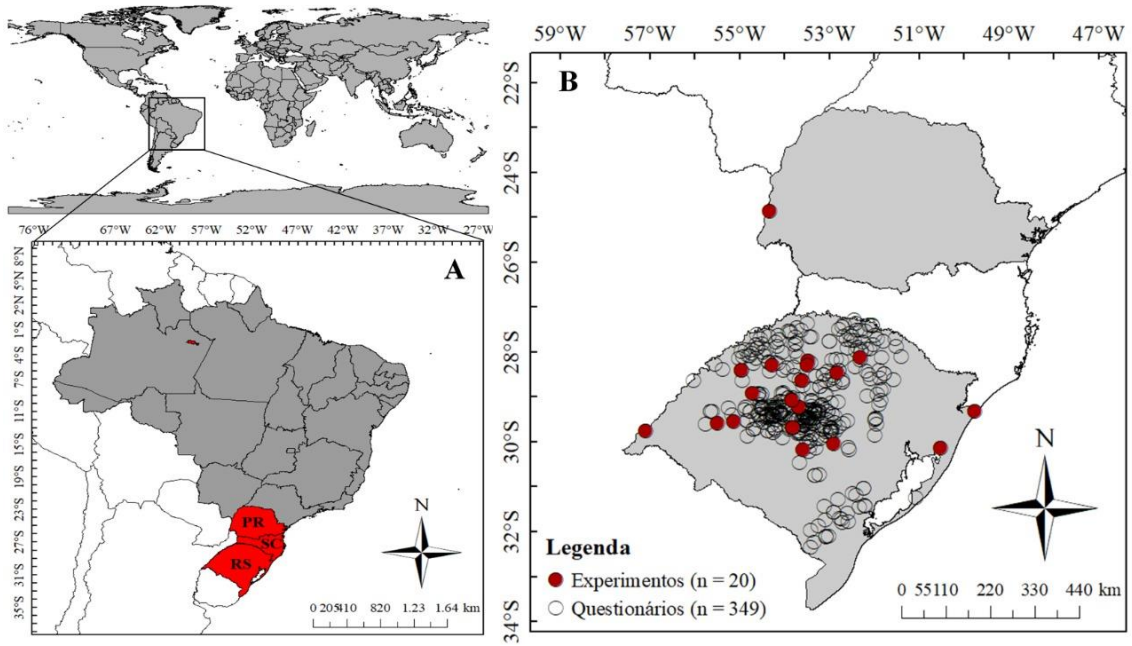


Figura 1: (A) Localização geográfica da região subtropical brasileira, (B) áreas de localização experimental (círculos vermelhos) e levantamentos aplicados nas lavouras (círculo preto vazado). Os experimentos foram realizados em duas safras (de 2018 a 2020), enquanto os levantamentos foram realizados em três safras (de 2016 a 2019).

Tabela 1: Caracterização dos experimentos conduzidos durante 2 anos agrícolas (2018-2020) no Rio Grande do Sul e Paraná – Brasil

Local	Data semeadura	Densidades	GMR	Tipo de solo	Regime hídrico	Produtividade
	DD/MM/AA	pl/m <sup>2</sup>				Mg ha <sup>-1</sup>
<b>Estação experimental</b>						
Santa Maria	17/08/2018	16-28-40-52	5.0 - 5.9 - 6.8	Argissolo Vermelho	Irigado	4,6 (4,0 - 5,2)
	24/10/2018	16-28-40-52	5.0 - 5.9 - 6.8	Argissolo Vermelho	Irigado	4,3 (2,8 - 5,3)
	24/10/2018	16-28-40-52	5.0 - 5.8 - 6.8	Planossolo Haplíco	Sequeiro	5,8 (4,9 - 6,6)
	24/01/2019	16-28-40-52	5.0 - 5.9 - 6.8	Argissolo Vermelho	Irigado	3,3 (2,6 - 3,7)
	10/10/2019	10-22-34-46	5.0 - 5.7 - 6.5	Argissolo Vermelho	Irigado	7,1 (6,0 - 8,4)
	19/12/2019	10-22-34-46	5.0 - 5.7 - 6.5	Argissolo Vermelho	Irigado	5,3 (4,5 - 6,2)
Santa Helena	24/10/2019	13-27-40	5.9	Latossolo Vermelho	Sequeiro	3,7 (2,6 - 4,4)
<b>Lavouras comerciais</b>						
Ciríaco	12/10/2019	14-28-46	5.0 - 5.5 - 5.9 - 6.1 - 6.5	Chernossolo Argilúvico	Sequeiro	3,2 (2,3 - 4,7)
	13/11/2019	14-28-46	5.0 - 5.5 - 5.9 - 6.1 - 6.5	Chernossolo Argilúvico	Sequeiro	3,0 (2,5 - 3,4)
	19/12/2019	14-28-46	5.0 - 5.5 - 5.9 - 6.1 - 6.5	Chernossolo Argilúvico	Sequeiro	2,74 (2,4 - 3,2)
Coxilha	11/10/2019	14-28-46	5.0 - 5.5 - 5.9 - 6.1 - 6.5	Latossolo Vermelho	Sequeiro	3,75 (3,3 - 4,2)
	12/11/2019	14-28-46	5.0 - 5.5 - 5.9 - 6.1 - 6.5	Latossolo Vermelho	Sequeiro	3,42 (2,6 - 4,0)
	15/12/2019	14-28-46	5.0 - 5.5 - 5.9 - 6.1 - 6.5	Latossolo Vermelho	Sequeiro	2,29 (1,9 - 2,6)
Júlio de Castilhos	22/10/2018	16-22-28-34-40	5.4 - 5.6	Argissolo Vermelho-Amarelo	Irigado	6,29 (5,8 - 7,4)
	26/10/2019	10-22-34-46	5.5	Argissolo Vermelho-Amarelo	Irigado	5,90 (5,7 - 6,0)
Tupanciretã	22/10/2018	16-28-40-52	5.0 - 5.8 - 6.8	Latossolo Vermelho	Sequeiro	4,81 (3,9 - 5,6)
	20/11/2018	16-28-40-52	5.0 - 5.8 - 6.8	Latossolo Vermelho	Sequeiro	4,62 (4,0 - 5,0)
	20/12/2018	16-28-40-52	5.0 - 5.8 - 6.8	Latossolo Vermelho	Sequeiro	2,98 (1,8 - 4,0)
	11/10/2019	20-32	5.2 - 5.7 - 6.1	Latossolo Vermelho	Sequeiro	
Uruguaiiana	11/11/2019	20-32	5.2 - 5.7 - 6.1	Latossolo Vermelho	Sequeiro	
	07/11/2018	10-16-28	4.8 - 5.8 - 6.8	Neossolo Litólico	Irigado	4,35 (3,2 - 5,7)
	22/11/2019	10-20-28	4.8 - 5.9 - 6.6	Neossolo Litólico	Irigado	4,46 (3,0 - 6,1)

Tabela 2: Equações e estatísticas da estimativa de perda de produtividade para densidade de plantas abaixo e acima da densidade de plantas agrônômica ótima para soja com grupos de maturidade relativa e ambientes irrigado e sequeiro.

<b>GMR</b>	<b>Condição Hidrica</b>	<b>Baixa DP</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Alta DP</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
GMR ≤ 5.5	Irrigado	y = 0.1511*DP + 3.073	0.97	y = -0.1497*DP + 14.109	0.98
GMR ≤ 5.5	Sequeiro	y = 0.1153*DP + 1.8621	0.97	y = -0.1399*DP + 10.766	0.97
5.5 < GMR < 6.5	Irrigado	y = 0.1157*DP + 3.9434	0.97	y = -0.1321*DP + 12.047	0.98
5.5 < GMR < 6.5	Sequeiro	-	-	y = -0.0742*DP + 8.1756	0.99
GMR ≥ 6.5	Irrigado	y = 0.0953*DP + 4.1651	0.98	y = -0.0972*DP + 10.38	0.99
GMR ≥ 6.6	Sequeiro	-	-	y = -0.0383*DP + 5.9714	0.87

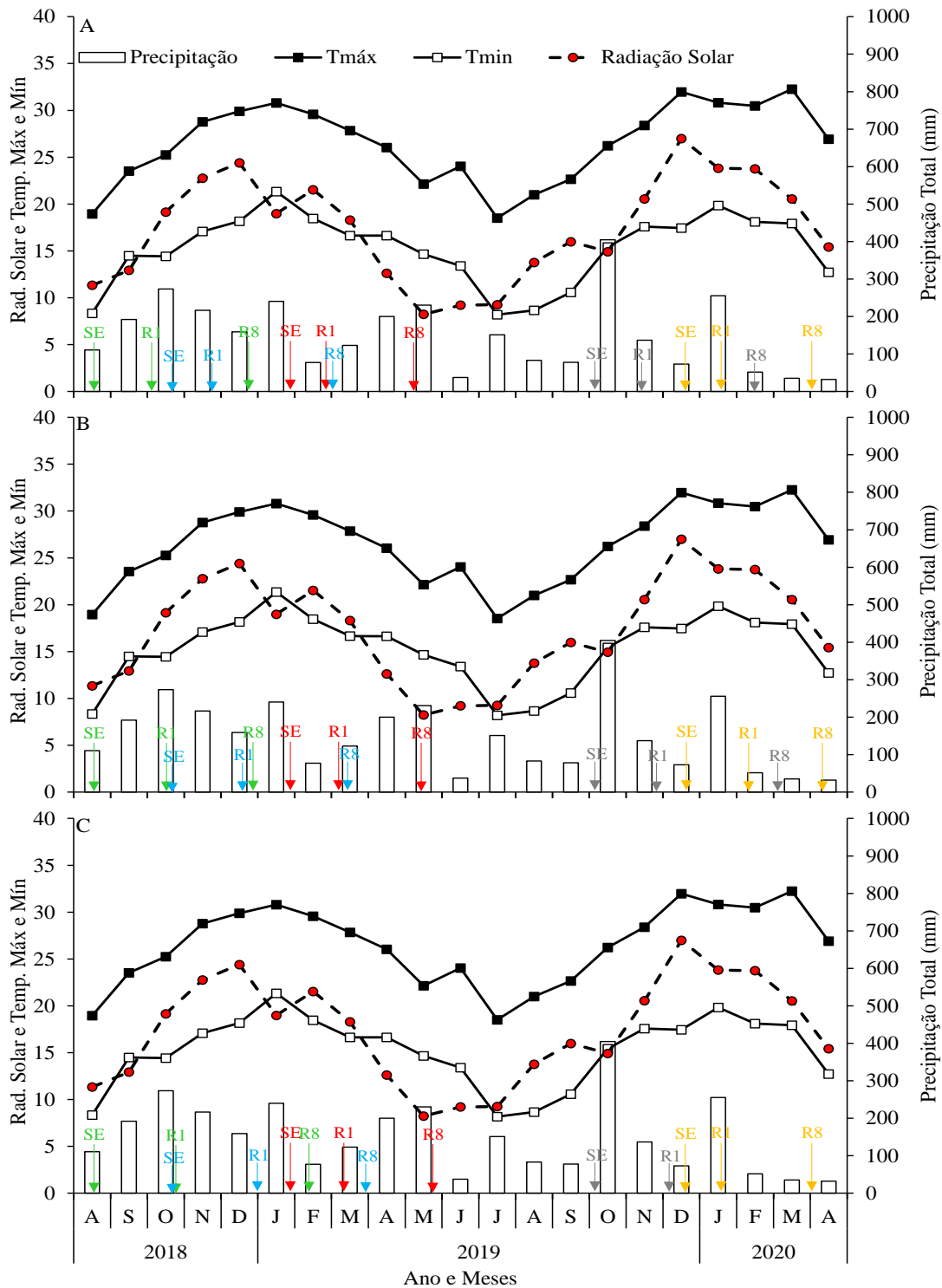


Figura 2: Média mensal da radiação solar incidente (círculos vermelhos) e temperatura máxima (Tmáx, quadrados preenchidos) e mínima (Tmín, quadrados vazados), e total precipitação (barras, correspondente ao eixo secundário). As setas indicam a data de sementeira (SE), florescimento (R1) e maturidade fisiológica (R8), segundo a escala fenológica da soja de Fehr e Caviness (1971) para as épocas de sementeira de agosto 17/08/2018 (verde), outubro 24/10/2018 (azul), janeiro 24/01/2019 (vermelha), outubro 10/10/2019 (cinza) e dezembro 19/12/2019 (amarela), Santa Maria, RS, Brasil.

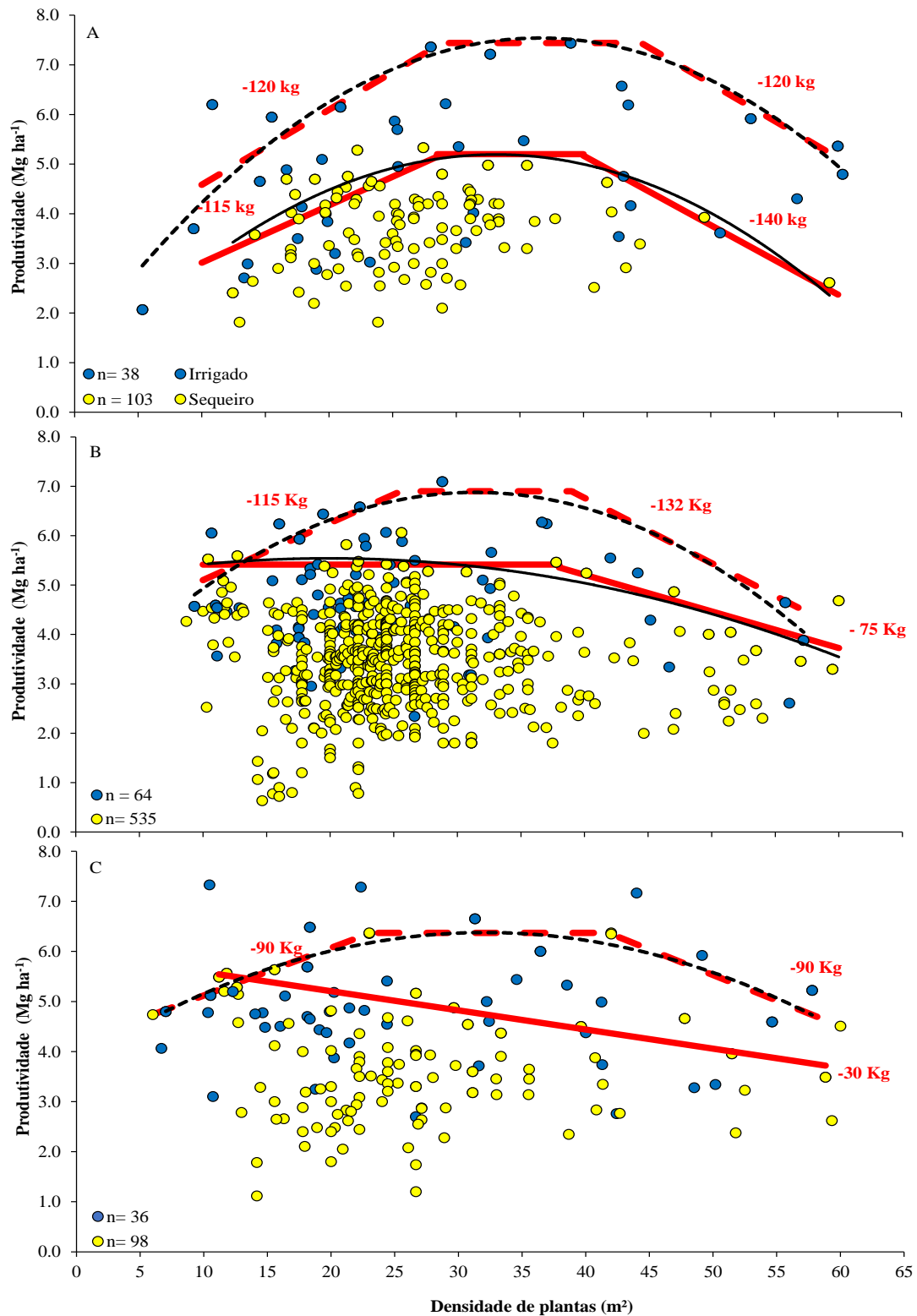


Figura 3: Relação entre a produtividade (Mg ha<sup>-1</sup>) e a densidade de plantas (m<sup>2</sup>) para grupos de maturidade relativa  $GMR \leq 5.5$  (A),  $5.5 > GMR < 6.5$  (B) e  $GMR \geq 6.5$  (C) e para ambientes irrigados (círculos azuis) e sequeiro (amarelo). A curva tracejada preta é a equação quadrática ou linear ajustada para ambientes irrigados e a linha sólida preta para ambientes de sequeiro. A linha tracejada vermelha é a platô de produtividade para densidade de plantas ótima acima do qual o ganho de produtividade é inferior a 1% por aumento de 1 planta por m<sup>2</sup>.



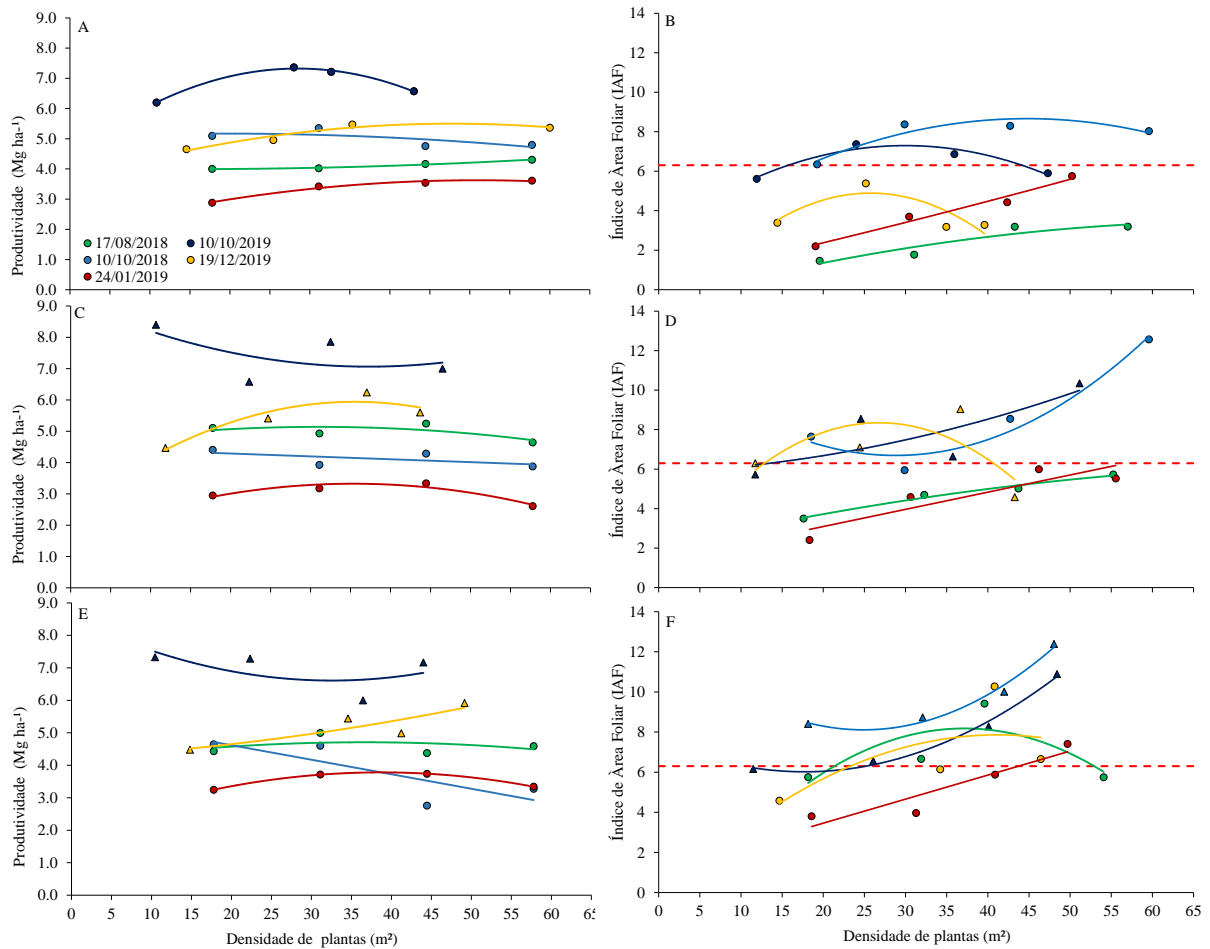


Figura 4: Relação entre a produtividade (Mg ha<sup>-1</sup>) e a densidade de plantas (m<sup>2</sup>) grupos de maturidade relativa GMR 5.5 (A), GMR 5.9 (círculos) e 5.7 (triângulos) (C) e GMR 6.8 (círculos) e 6.5 (triângulos) (E). Relação entre o máximo índice de área foliar (IAF) e a densidade de plantas (m<sup>2</sup>) para os grupos de maturidade relativa GMR 5.5 (B), GMR 5.9 (círculos) e 5.7 (triângulos) (D) e GMR 6.8 (círculos) e 6.5 (triângulos) (F) e épocas de semeadura 17/08/2018 (verde), 24/10/2018 (azul), 24/01/2019 (vermelho), 10/10/2019 (azul escuro) e 19/12/2019 (amarelo) irrigação suplementar. Santa Maria, RS, Brasil. A linha vermelha tracejada representa o IAFmáx ótimo para altas produtividades (Tagliapietra et al. 2018).

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os menores GMRs, e conseqüentemente menor duração do ciclo de desenvolvimento, exigem maiores densidades para altas produtividades e apresentam as maiores perdas caso a densidade de plantas for abaixo ou acima da DPAO em ambientes irrigados e sequeiro. A indicação para esse GMR é para semeaduras na época preferencial pois o IAF é limitante em semeaduras antecipadas e tardias. Os GMRs intermediários apresentam a maior faixa de densidade de plantas, e por isso, é o grupo de GMRs mais semeados em ambiente subtropical, principalmente, em ambientes de sequeiro. Apresentam perdas de produtividade menores que  $GMR < 5.5$ , pela plasticidade e adaptação a uma maior janela de semeadura (entre outubro e dezembro) com valores de IAF entre 6.0 e 8.0 ótimos para altas produtividades. Os GMRs maiores exigem as menores densidade de plantas, que está associada a duração da fase vegetativa e alto IAF dessas cultivares sendo mais recomendadas para semeaduras antecipadas (agosto) e tardias (dezembro e janeiro) com estabilidade de produtividade e as menores perdas de produtividade. Desse modo, agrônomos, consultores técnicos, e produtores podem definir a densidade de plantas e aumentar a eficiência no uso de recursos e obter altas produtividades.

## 5 REFERÊNCIAS

- AGUDAMU, T.Y., e SHIRAIWA, T. Branch development responses to planting density and yield stability in soybean cultivars. **Plant Production Science**. 19(3):331–339. 2016. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1343943X.2016.1157443>>. DOI: 10.1080/1343943X.2016.1157443.
- ASFAW, A. et al. AMMI and SREG GGE biplot analysis for matching varieties onto soybean production environments in Ethiopia. **Scientific Research and Essay**, v.4, p.1322-1330, Dez. 2009. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/228806167>>.
- BORTOLUZZI et al. Adjustment of probability functions to water excesso and déficit soybeans cultivated in lowland soils. **Irriga**, v.25. n.2, p.402-419. Abr. 2020. Disponível em: <<http://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3839>>. DOI: 10.15809/irriga.2020v25n2p402-419.
- BUENO, L.C.S, et al. Efeitos de espaçamento, densidade época de plantio sobre duas variedades de soja. **Experientiae**. v.20, n.10, p.263-287, 1975.
- BUNSELMeyer, H. A. e LAUER, J. G. Using Corn and Soybean Yield History to Predict Subfield Yield Response. **Agronomy Journal**, v.107, p558- 562, Abr. 2015. Disponível em: <<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/csa2015-60-4-3>>. DOI: 10.2134/csa2015-60-4-3.
- BALBINOT JUNIOR, A.A et al. Phenotypic plasticity in a soybean cultivar with indeterminate growth type. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 53(9), 1038–1044, Set. 2018. Disponível em: <[https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-204X2018000901038](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2018000901038)>. DOI: 10.1590/s0100-204x2018000900007.
- CARCHIOCHI, W.D. et al. Soybean Seed Yield Response to Plant Density by Yield Environment in North America. **Agronomy Journal**. v.111, p. 1923-1932, Jul. 2019. Disponível em: <<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2134/agronj2018.10.0635>>, DOI: 10.2134/agronj2018.10.0635
- CORASSA, G.M. et al. Optimum soybean seeding rates by yield environment in southern Brazil. **Agronomy Journal**. v.110, p.2430–2438, Nov. 2018. Disponível em: <<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/agronj2018.04.0239>>. DOI: 10.2134/agronj2018.04.0239.
- COX, W.J.; J.H. CHERNEY. Growth and yield responses of soybean to row spacing and seeding rate. **Agronomy Journal**. v.103, p.123–128, Jan. 2011. Disponível em: <<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/agronj2010.0316>> . DOI: 10.2134/agronj2010.0316.
- EMBRAPA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro nacional de Pesquisa da Soja. **Recomendações técnicas para a cultura da soja na região central do Brasil 1985**. Londrina, 1985. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br>>.

FERREIRA, A. S., et al. Plant density and mineral nitrogen fertilization influencing yield, yield components and concentration of oil and protein in soybean grains. **Bragantia**, v.75, p.362-370, Jun. 2016. Disponível em: <  
[https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0006-87052016000300362](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052016000300362)>. DOI:  
 0.1590/1678-4499.479.

FERREIRA, A. S., et al. Plant Spatial arrangement affects grain production from branches and stem of soybean cultivars. **Bragantia**, v.77, p.567-576, Out. 2018. Disponível em: <  
<https://www.researchgate.net/publication/328565044>>. DOI: 10.1590/1678-4499.2017285.

FERREIRA, A.S., Minimum optimal seeding rate for indeterminate soybean cultivars grows in the tropics. **Agronomy Journal**. v.112, p.2092–2102, Fev. 2020. Disponível em: <  
<https://acess.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/agj2.20188>>. DOI:  
 10.1002/agj2.20188.

GRASSINI, P. et al. Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. **Field Crops Research**, v. 179, p. 150–163, Ago. 2015. Disponível em: <  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378429015001392>>. DOI:  
 10.1016/j.fcr.2015.04.015.

KANTOLIC, A.G., et al. Seed number responses to extended photoperiod and shading during reproductive stages in indeterminate soybean. **European Journal Agronomy**. 51:91–100, Nov. 2013. Disponível em: <  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1161030113001019>>. DOI:  
 0.1016/j.eja.2013.07.006.

SANCHES, A., VELOSO, E.J. Efeito do espaçamento e da densidade de plantio, sobre várias características agronômicas na cultura da soja *Glycine max* (L.) Merrill), variedade “Viçoja” em Jaboticabal, SP. **Cientifica**, v2.n2, p.137-148, 1974.

MATCHAM, E.G et al. Management strategies for early-and late-planted soybean in the north-central United States. **Agronomy Journal**, v.112, p.2928-2943, Mai. 2020. Disponível em; , <https://acess.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/agj2.20289>>. DOI:  
 10.1002/agj2.20289:

MAUAD, M. et al. Influência da densidade de sementeira sobre características agronômicas na cultura da soja. **Agrarian**, v.3, p.175-181, Jul. 2010. Disponível em: <  
<https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/agrarian/article/view/75>>.

MOURTZINIS, S. et al. Planting date, Maturity and temperature effects on soybean seed yield and composition. **Agronomy Journal**, v.109, n. 5, Set. 2017. Disponível em: <  
<https://acess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2134/agronj2017.05.0247>>. DOI:  
 10.2134/agronj2017.05.0247.

RIBEIRO, A.B. et al. Productive performance of soybean cultivars grown in different plant densities. **Ciência Rural**, v.47: 07, e20160928, Mai. 2017. Disponível em:<  
[https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782017000700202](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782017000700202)>. DOI:  
 10.1590/0103-8478cr20160928.

REIS, M.S. et al. Efeitos do espaçamento e da densidade de plantio sobre a variedade de soja UFV-1 no Triângulo Mineiro. **Revista Ceres**, v.24, n.134, p.412-419, 1977.

SALMERON, M. et al. Yield Response to Planting Date Among Soybean Maturity Groups for Irrigated Production in the US Midsouth. **Crop Science**, v.56, p.747-759, Jan. 2016. Disponível em: < <https://www.researchgate.net/publication/291555976>>. DOI: 10.2135/cropsci2015.07.0466.

SANTACHIARA, G. et al. Physiological Processes Leading to Similar Yield in Contrasting Soybean Maturity Groups. **Agronomy Journal**, v. 109, p. 158-167, Jan. 2017. Disponível em: < <https://www.researchgate.net/publication/311341230>>. DOI: 10.2134/agronj2016.04.0198.

SUHRE, J. J. et al. Soybean Yield Partitioning Changes Revealed by Genetic Gain and Seeding Rate Interactions. **Agronomy Journal**, v.106, p.1631-1642, Set.2014. Disponível em:< <https://acess.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/agronj14.0003>>. DOI: 10.2134/agronj14.0003.

TAGLIAPIETRA, E. L. et al. Optimum leaf area index to reach soybean yield potential in subtropical environment. **Agronomy Journal**, v.110, p.932-938, Mai. 2018. Disponível em:< <https://www.researchgate.net/publication/324094160>>. DOI: 10.2134/agronj2017.09.0523.

THOMPSON, N.M. et al. Mid-South soybean yield and net return as affected by plant population and row spacing. **Agronomy Journal**. v.107, p.979–989, Mai. 2015. Disponível em: < <https://www.researchgate.net/publication/276418689>>. DOI: 10.2134/agronj14.0453.

VAN ITTERSUM, M.K. et al. Yield gap analysis with local to global relevance— A review. **Field Crops Research**. v.143, p.4–17, Mar. 2013. Disponível em:< <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037842901200295X>>. DOI: 10.1016/j.fcr.2012.09.009.

YAN, W. GGE biplot – a Windows application for graphical analysis of multienvironment trial data and other types of two-way data. **Agronomy Journal**, v.93, p.1111-1118, Set. 2001. Disponível em:< <https://acess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2134/agronj2001.9351111x>>. DOI: 10.2134/agronj2001.9351111x.

ZANON, A. J., et al. **Ecofisiologia da soja: visando altas produtividades**. Ed. 1, 136 p. 2018

ZANON, A.J. et al. Climate and management factores influence soybean yield potential in a Subtropical Environment. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 4, p. 1447-1454, Jul. 2016. Disponível em: < <https://acess.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/agronj2015.0535>>. DOI: 10.2134/agronj2015.0535.

ZDZIARSKI, A.D. et al. Key soybean maturity groups to increase grain yield in Brazil. **Crop Science**, v. 57, p. 1155-1165, Mar. 2018. Disponível em: < <https://www.researchgate.net/publication/324088721>>. DOI: 10.2135/cropsci2017.09.0581.