

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

Guilherme Guerin Munareto

**A CURTA DURAÇÃO DO CICLO DA CULTURA AUMENTA A
LIMITAÇÃO DE NITROGÊNIO DA SOJA DE ALTA PRODUTIVIDADE**

Santa Maria, RS

2021

Guilherme Guerin Munareto

**A CURTA DURAÇÃO DO CICLO DA CULTURA AUMENTA A
LIMITAÇÃO DE NITROGÊNIO DA SOJA DE ALTA PRODUTIVIDADE**

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

Munareto, Guilherme
A CURTA DURAÇÃO DO CICLO DA CULTURA AUMENTA A
LIMITAÇÃO DE NITROGÊNIO DA SOJA DE ALTA PRODUTIVIDADE /
Guilherme Munareto.- 2021.
64 p.; 30 cm

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

1. lacuna-N 2. grupo de maturação 3. ciclo de
desenvolvimento 4. subtropical 5. potencial de
produtividade I. Zanon, Alencar II. Brunetto, Gustavo
III. Streck, Nereu IV. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, GUILHERME MUNARETO, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Guilherme Guerin Munareto

**A CURTA DURAÇÃO DO CICLO DA CULTURA AUMENTA A
LIMITAÇÃO DE NITROGÊNIO DA SOJA DE ALTA PRODUTIVIDADE**

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.**

Aprovada em 21 de setembro de 2021:

Alencar Junior Zanon

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

Amado

Telmo J. C. Amado, Dr. (UFSM) - (Videoconferência)



Octavio Pedro Caviglia, Dr. (UNER) – (Videoconferência)

Santa Maria, RS

2021

DEDICATÓRIA

À minha família, por todo amor e carinho, vocês são minha base, inspiração e orgulho.

Agradecimentos

Para realizar este sonho, muitas pessoas me guiaram, ajudaram e se dedicaram, agradeço:

- A Deus, por me acompanhar, guiar e por me dar discernimento nas ações em cada encruzilhada desta jornada.
- Aos meus pais Sabrina e Paulo, pelo apoio, incentivo, educação, compreensão, esforços e por toda confiança que depositam em mim, sendo essencial para que concluísse mais uma página na minha história.
- Aos meus avôs, por todo carinho, amor e das inúmeras palavras de incentivo. São exemplos para mim.
- A minha irmã Paula e minha namorada Ana Paula, pelo apoio, esforços, amor e compreensão de estar muitas vezes distante de vocês.
- A Universidade Federal de Santa Maria e ao programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, pela infraestrutura e oportunidade de realizar o mestrado.
- Ao meu orientador e amigo Prof. Alencar Junior Zanon, pelo incentivo, oportunidades, confiança, parceria e profissionalismo, um grande exemplo.
- Ao coautor do artigo Nicolas Cafaro La Menza, pelo imenso comprometimento, amizade, oportunidades, contribuições e ensinamentos na análise estatística e interpretação dos resultados para avançarmos a barreira do conhecimento.
- Aos coorientadores e amigos, Prof. Nereu Augusto Streck, Prof. Gustavo Brunetto, pelo profissionalismo, parceria e contribuições.
- A equipe FieldCrops, pela oportunidade de ingressar neste seleto time, pelos laços de amizades criados na sala dois da fitotecnia. Com vocês vivi momentos ímpares de troca de informações, evolução como pessoa e profissional. A equipe Soja, a qual fiz parte durante o curso. Agradeço, em especial, a ajuda na condução dos experimentos de campo ao Leonardo, Solon, Cristian e de laboratório ao Israel e ao Fabricio na digitação. Ao Eduardo Lago pelas orientações, disponibilidade e contribuições na análise dos dados.
- A ajuda laboratorial ao Max Escalona, aos prof. Gustavo Brunetto e Cesar Quintero e equipe.
- Aos produtores que cederam áreas ao experimento, Sementes Aurora, Agropecuária Cechin, Grupo Ceolin e ao meu Pai.

MUITO OBRIGADO!

Epígrafe

“Uma chave importante para o sucesso é a autoconfiança. Uma chave importante para a autoconfiança é a preparação.” - (Artur Ashe)

RESUMO

A CURTA DURAÇÃO DO CICLO DA CULTURA AUMENTA A LIMITAÇÃO DE NITROGÊNIO DA SOJA DE ALTA PRODUTIVIDADE

Autor: Guilherme Guerin Munareto

Orientador: Alencar Junior Zanon

Resumo: A produtividade de soja duplicou nas últimas duas décadas, impulsionada pelo aprimoramento genético (cultivares mais precoces) e práticas de manejo. Estudos recentes indicam fornecimento limitado de nitrogênio (lacuna-N) para soja de alta produtividade, ou seja, as fontes de nitrogênio do solo (NS) em conjunto com a fixação de N₂ (FBN) não são suficientes para suportar a demanda de N da cultura. Nossa hipótese é que uma menor duração do ciclo da cultura propicia uma maior lacuna-N. Para testar, seguimos um protocolo baseado na demanda de N da cultura de acordo com seu potencial, sincronizando o fornecimento do nutriente com a demanda de N e a fenologia da cultura, realizando aplicações fracionadas de N (tratamento, N-completo) comparado a um tratamento zero-N que forçou a cultura a depender da FBN e NS. Foram conduzidos experimentos em cinco locais do sul do Brasil, com um conjunto de dados com amplo potencial de produtividade PP 2.7 a 7.0 Mg ha⁻¹, grupo de maturação (GM) 5.0 a 6.8 e duração do ciclo (102 a 138 dias). A massa seca acima do solo (MSS) foi coletada ao longo do ciclo para avaliar a taxa de crescimento da cultura (TC) dos dois tratamentos de N. A produtividade de grãos, proteína e óleo e suas concentrações, massa do grão, número de grão e legumes foram mensurados em ambos tratamentos de N na maturidade fisiológica. O conjunto de dados foi separado em três grupos: curto (GM, 5.0 a 5.2); médio (GM, 5.5 a 5.9) e longo (GM, 6.2 a 6.8), doravante assim chamados. Os resultados indicam que quanto menor o ciclo, maior a lacuna-N na produtividade de grãos, GM curto com lacuna-N (18.5%, 0.85 Mg ha⁻¹), GM médio (3.5%, 0.15 Mg ha⁻¹) e GM longo lacuna-N próxima de zero contrastando o N-completo menos o zero-N. O GM curto teve a maior resposta quando fertilizado com N versus zero-N, incrementando a TC máxima (3 g m⁻² d⁻¹), MSS em R3 (1.1 Mg ha⁻¹), massa do

grão (16 mg) número de legumes e grãos (14.4% e 13.5%, respectivamente). A produtividade de proteína também incrementou (GM curto, 0.34 Mg ha⁻¹, GM longo, 0.07 Mg ha⁻¹) e óleo (GM curto, 0.12 Mg ha⁻¹). Os resultados indicam (i) a lacuna-N na produtividade de grãos aumenta conforme reduz a duração do ciclo da soja, (ii) o efeito da limitação de N no crescimento da soja e na produtividade de proteína e óleo é maior quanto menor a duração do ciclo, entretanto, quando fertilizada a concentração de proteína incrementa sem reduzir a concentração de óleo para os ciclos longos.

Palavras-chaves: lacuna-N, grupo de maturação, ciclo de desenvolvimento, subtropical, potencial de produtividade.

ABSTRACT

Short crop cycle duration increases the nitrogen gap of high-yield soybeans

Author: Guilherme Guerin Munareto

Advisor: Alencar Junior Zanon

Abstract: Soybean productivity has doubled in the last two decades, driven by genetic improvement (earlier cultivars) and management practices. Published studies indicate limited nitrogen (N-gap) for high-yield soybeans, that is, as soil nitrogen sources (NS) in conjunction with N₂ biological fixation (NBF) are not sufficient to require the crop's N demand. We hypothesize that a shorter crop cycle duration leads to a larger N-gap. To test, we followed a protocol based on the N demand of the crop according to its potential, synchronizing the nutrient supply with the N demand and the crop phenology, performing fractional N applications (treatment, N-complete) in relation to a zero-N treatment that forced a culture dependent on FBN and NS. Experiments were carried out in five locations in southern Brazil, with a dataset with large potential yield PP 2.7 to 7.0 Mg ha⁻¹, maturation group (GM) 5.0 to 6.8 and duration of cycle (102 to 138 days). Aboveground dry mass (MSS) was collected throughout the cycle to evaluate the crop growth rate (TC) of the two N treatments. Grain, protein and oil yield and their concentrations, grain mass, number of grain and legumes were measured in both N treatments at physiological maturity. The data set separated into three groups: short (GM, 5.0 to 5.2); medium (GM, 5.5 to 5.9) and long (GM, 6.2 to 6.8), henceforth called. The results indicate that the shorter the cycle, the greater the N-gap in grain yield, short GM with N-gap (18.5%, 0.85 Mg ha⁻¹), medium GM (3.5%, 0, 15 Mg ha⁻¹) and GM long N-gap close to zero contrasting the N-complete minus the zero-N. The shorter MG had the highest response to N addition, increasing a maximum TC (3 gm⁻² d⁻¹), MSS in R3 (1.1 Mg ha⁻¹), grain mass (16 mg) number of legumes and grains (14.4% and 13.5%, respectively). Protein productivity also increased (short GM, 0.34 Mg ha⁻¹, long GM, 0.07 Mg ha⁻¹) and oil (short GM, 0.12 Mg ha⁻¹). The results indicated (i) the N-gap in grain yield increases as the soybean cycle length decreases, (ii) the effect of limiting N on soybean growth and on protein and oil yield is greater when the cycle duration is

shorter, however, when fertilized, protein concentration increases without reducing the oil concentration in genotypes with longer cycle duration.

Keywords: N-gap, maturity group, development cycle, subtropical, yield potential.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Dados Meteorológicos médios, radiação solar incidente símbolo laranja, temperatura média símbolo azul e coeficiente fototérmico (Q) barra verde. Cada ponto de dados representa o valor médio de cada ambiente (ver tabela 1) durante a fase de desenvolvimento R1-R7 baseado em Fehr e Caviness (1977). Cada ambiente corresponde a uma combinação de (data de semeadura x GM x local x ano x tratamento de N).....34
- Figura 2. Comparação entre os tratamentos N-completo e zero-N para (A) produtividade de grãos, (B) matéria seca acima do solo no estágio R7, (C) massa do grão e (D) Número de grãos nos 17 ambientes. Cada ambiente representa a combinação de data de semeadura x GM x tratamento de N x local x ano. Grupo Curto (símbolos verdes), Médio (símbolos laranja) e Longo (símbolos vermelhos). A diferença média entre os tratamentos (N-completo menos zero-N) é mostrada em cada painel. A linha diagonal sólida em cada gráfico indica hipótese nula.....39
- Figura 3. Diferença de produtividade de grãos entre os tratamentos N-completo e zero-N em relação aos dias de ciclo para os 17 ambientes (ponto de dados). Cada ponto de dados representa o rendimento médio para uma determinada data de semeadura x GM x tratamento de N x local x ano. Parâmetros da regressão linear ajustada (linha sólida), coeficiente de determinação (r^2) e significância são mostrados. O conjunto de dados foi separado em três grupos: Curto (símbolos verdes), Médio (símbolos laranja) e Longo (símbolos vermelhos). O gráfico inserido de caixa representa a diferença no rendimento entre os tratamentos N-completo menos zero-N para os grupos. As caixas delimitam os percentis 25 e 75, enquanto os bigodes representam os percentis 90 e 10. Mediana (linha horizontal), $Y=0$ (linha tracejada) e média (+) são mostrados. Significância estatística do teste Tukey ao nível ($p<0.05$).....41
- Figura 4. (A, C, E) Matéria seca acima do solo (MSS) e taxa de crescimento diário da cultura (TC) mostrada em (B, D, F), ambos em função do estágio de desenvolvimento

(DS). (A, B) representa o grupo Curto; (C, D) Médio; (E, F) Longo. Símbolos azuis (N-completo) e vermelhos (zero-N). Os estágios Vn e Rn baseados em Fehr & Caviness (1977) são mostrados no eixo superior. As linhas azuis e vermelhas sólidas da MSS representam o ajuste da Equação 1 e sua derivada diária representa o (TC) para o tratamento N-completo e zero-N, calculado a partir de dados agrupados entre ambientes pertencentes ao mesmo grupo de GM. O coeficiente de determinação dos modelos ajustados >

0.89.....44

Figura 5. Diferença de produtividade de proteína (A) e óleo (B) entre os tratamentos N-completo e zero-N em relação aos dias de ciclo para os 17 ambientes (ponto de dados). Cada ponto de dados representa o rendimento médio para uma determinada data de semeadura x GM x tratamento de N x local x ano. Parâmetros da regressão ajustada (linha sólida), coeficiente de determinação (r^2) e significância são mostrados. O conjunto de dados foi separado em três grupos: Curto (símbolos verdes), Médio (símbolos laranja) e Longo (símbolos vermelhos). Os gráficos inseridos de caixa representam a diferença na produtividade de proteína (A inserido) e óleo (B inserido) entre os tratamentos N-completo menos zero-N para os grupos. As caixas delimitam os percentis 25 e 75, enquanto os bigodes representam os percentis 90 e 10. Mediana (linha horizontal), Y=0 (linha tracejada) e média (+) são mostrados. Significância estatística do teste Tukey ao nível ($p<0.05$).....46

Figura suplementar S1. Mapa do Rio Grande do Sul ilustrando onde foi conduzido os experimentos (símbolos vermelhos). Inserido canto superior esquerdo extensão territorial do Brasil com destaque para o RS.....55

Figura suplementar S2. (A) diferença de produtividade da soja entre o tratamento N-completo menos zero-N relacionada ao nitrogênio do solo (acumulado total de N na MSS do milho). (B) diferença de produtividade da soja do GM médio relacionada ao nitrogênio do solo. (C) Acumulado de nitrogênio na MSS do milho relacionado a produtividade do milho (seis campos com milho, Tabela 1). Parâmetros da regressão são mostrados, coeficiente de determinação, correlação de pearson (ou se aplicável

spearman). Linha sólida regressão linear ajustada. Cada ponto de dado representa um ambiente (cada ambiente é uma combinação de data de semeadura x GM x tratamento de N x local x ano). Os triângulos (GM curto da soja), círculos (GM médio) e quadrados (GM longo).....56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição do cultivo da soja e solo (0 a 30 cm) experimento conduzido em três safras (2018 a 2020) em cinco locais do Rio Grande do Sul, Brasil.....32

Tabela 2. Análise de variância para o efeito do tratamento com nitrogênio (N), grupo de maturação (GM) e a relação da interação GM x N nos componentes de produção, produtividade de grãos, concentração e produtividade de óleo e proteína no grão e no acúmulo de matéria seca (MSS). Cada combinação (locais x data de semeadura x densidade x GM x tratamento de N) foi considerado um ambiente (AMB). Também são mostrados os valores e probabilidades do teste F para os efeitos fixos, quadrados médios (MS) e para os efeitos aleatórios. Avaliamos se a diferença média do tratamento é significativamente diferente de zero para cada grupo (curto, médio e longo).....40

Tabela suplementar S1. As variáveis produtividade de grãos, componentes de produção, concentração e produtividade de proteína e óleo, MSS e TC foram avaliadas se a diferença média do tratamento de N (N-completo versus zero-N) é significativamente diferente de zero para cada grupo (curto, médio e longo) usando teste-t pareado ($P < 0.05$). Foi conduzida uma anova para verificar a variação entre os grupos de maturação para o tratamento zero-N (padrão dos produtores), usando Tukey ou Kruskal Wallis (sem normalidade na distribuição dos dados) ($P < 0.05$).....56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS.....	17
1.1.1 Objetivo geral.....	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 CULTURA DA SOJA.....	18
2.2 POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE E DURAÇÃO DO CICLO DE DESENVOLVIMENTO DA SOJA.....	19
2.3 ESTUDOS DE NITROGÊNIO NA SOJA.....	21
2.4 NITROGÊNIO.....	23
3. ARTIGO - A CURTA DURAÇÃO DO CICLO DA CULTURA AUMENTA A LIMITAÇÃO DE NITROGÊNIO DA SOJA DE ALTA PRODUTIVIDADE	26
Destaques.....	27
Resumo.....	27
1. Introdução.....	28
2. Materiais e Métodos.....	30
2.1. <i>Experimento de campo</i>	30
2.2. <i>Protocolo de fertilização nitrogenada e coleta de dados</i>	35
2.3. <i>Análise de dados</i>	36
3. Resultados.....	38
3.1. <i>Efeitos da fertilização com nitrogênio nos componentes de produção, MSS e na produtividade de grãos</i>	38
3.2. <i>Lacuna-N e os efeitos na produtividade de grãos por duração de ciclo</i>	41
3.3 <i>Acumulado de matéria seca e taxa de crescimento por grupos de maturação</i> ..	42
3.4 <i>Os impactos da limitação de N na concentração e produtividade de proteína e óleo da soja por duração do ciclo</i>	45
4. Discussão.....	46
5. Conclusão.....	50
Referências.....	50
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

1. INTRODUÇÃO

Projeções da FAO apontam para aumento da demanda mundial de alimentos, baseada no crescimento populacional, mudanças na dieta e expansão da utilização de biocombustíveis (CASSMAN & GRASSINI, 2020). Desta forma, impactando na principal leguminosa cultivada a soja (WILSON, 2008), verticalizar a produção, ao invés de, expandir área cultivada, com aumento na eficiência no uso de recursos (MUELLER et al., 2012) aliada a intensificação da produção são caminhos para atender às demandas globais de alimentos (FISCHER & CONNOR, 2018).

A América do Sul produz 55% da produção mundial da soja (USDA, 2021), com parte significativa localizada em clima subtropical. O estado do Rio Grande do Sul (RS) produz 20 Milhões Mg de Soja (USDA, 2021), localizado onde encontram-se os maiores potenciais de produtividade do mundo (CASSMAN, 2009). Aumentar a produtividade, a fim de preencher a lacuna entre demanda e produção é considerada a estratégia mais importante (LOBBEL et al., 2009; KEATING et al., 2014). Para isso, torna-se imprescindível identificar fatores causadores da lacuna de produtividade (LP) na soja. Assim sendo, para minimizar situações desordenadas nos processos metabólicos da planta e garantir a manifestação do potencial produtivo (PP), necessitamos suprir a exigência nutricional da cultura ao longo do ciclo.

O aumento da produtividade impulsiona o aumento da absorção de nitrogênio (N) (BALBOA et al., 2018; TAMAGNO et al., 2017). A produtividade média (PM) em 2050 no Brasil deve ser 5.1 Mg ha^{-1} , baseada em um aumento de 50% da média atual (MUELLER et al., 2012; CASSMAN & GRASSINI, 2020). Para isso, demandaria aproximadamente 400 kg N ha^{-1} , assumindo a linear de 12.7 kg de grão por kg^{-1} de N absorvido (SALVAGIOTTI et al., 2008; TAMAGNO et al., 2017). A exigência de N é cerca de três a quatro vezes maior na soja do que em culturas, como arroz, trigo ou milho (SALVAGIOTTI et al., 2008; YIN et al., 2019; BARRACLOUGH et al., 2010; BENDER, et al. 2013).

Estudos recentes relatam a existência de um fornecimento limitado de nitrogênio “lacuna-N” (CIAMPITTI & SALVAGIOTTI, 2018; ORTEZ et al., 2018; CORDEIRO &

ECHER, 2019; AMBROSINI et al., 2019b; CAFARO LA MENZA et al., 2017, 2019, 2020). Os estudos revelam uma lacuna-N entre 4% (ORTEZ et al., 2018) a 22% (CORDEIRO & ECHER, 2019), em que as fontes de N (fixação biológica de N₂, mineralização da matéria orgânica, deposição atmosférica seca e úmida, água da irrigação) não supriram a necessidade da cultura. Porém, estes estudos não avaliam a relação da lacuna-N com a duração do ciclo da soja, sugerindo o questionamento se a lacuna-N pode ser gerida pela duração do ciclo da soja. Sendo assim, são necessários estudos utilizando uma metodologia que garanta ausência de outros fatores limitantes exceto (tratamento, zero-N), com ampla gama de PP e duração de ciclo de desenvolvimento utilizada pelos produtores. Há hipótese de que uma menor duração do ciclo da cultura propicia uma maior lacuna-N.

Mapear e compreender situações de lacuna-N é necessário para garantir condições não limitantes, que possam afetar a produtividade, composição do grão e pondo em risco a soberania alimentar mundial. Dessa maneira, em nível internacional, a contribuição almejada é esclarecer a relação da duração do ciclo da cultura com a ocorrência da lacuna-N na cultura da soja, cultivada em clima subtropical, utilizando uma metodologia aceita na comunidade científica internacional.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Compreender a relação da lacuna de nitrogênio com a duração do ciclo de desenvolvimento da soja de alta produtividade em clima subtropical.

1.1.2 Objetivos específicos

- i) Determinar a lacuna-N na produtividade de grãos por duração do ciclo de desenvolvimento;
- ii) Mensurar o impacto da limitação de N no crescimento da soja, concentração e produtividade de proteína e óleo do grão por duração do ciclo de desenvolvimento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CULTURA DA SOJA

A soja [*Glycine max* (L.) Merr.] é a leguminosa mais importante do mundo e a principal fonte de proteína vegetal para alimentos e rações (WILSON, 2008), além de uma importante fonte de óleo, sendo considerada uma cultura chave na segurança alimentar (CAFARO LA MENZA et al., 2017). Sua produção é de 344 milhões de toneladas em 124 milhões de hectares, os maiores produtores em ordem são: Brasil, Estados Unidos e Argentina, juntos produziram 77% da soja no mundo (FAOSTAT, 2021). A América do Sul é o local do globo onde mais se produz soja, somando apenas a produção do Brasil, Argentina e Paraguai representa 52% da produção mundial (FAOSTAT, 2021). Estes, em grande parte se localizam em região subtropical. O ambiente subtropical brasileiro se diferencia dos demais subtropicais do mundo, pois não apresenta ambiente árido e/ou desértico. Ao contrário, apresenta um regime pluviométrico isoigro (chuvas bem distribuídas ao longo do ano). O período crítico de desenvolvimento da soja (floração ao final do enchimento do grão) ocorre de Dezembro a Março no Sul do Brasil (ZANON et al., 2016), com temperatura do ar, radiação e precipitação de aproximadamente 23.5°C, 21 MJ m⁻² d⁻¹ e 600 mm, respectivamente (TAGLIAPIETRA et al. 2021) no RS.

A cadeia produtiva da soja no Brasil interfere diretamente no mercado mundial da soja, por ser o maior exportador mundial 50% (USDA, 2021) e nas últimas safras alternando com os Estados Unidos (EUA) o posto de maior produtor. O Estado do Rio Grande do Sul (RS) é o terceiro maior produtor do Brasil, contribuindo com 14.8% produzindo 20 milhões de toneladas de soja em 6,05 milhões de hectares, com produtividade média de 3,3 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2021). Sua área cultivada é apenas menor que a do Mato Grosso (MT). Deste modo, é o 3º estado maior produtor e 2º em área de cultivo de soja do Brasil e do mundo (FAOSTAT, 2021).

O incremento de produtividade (1961-2019) no mundo (27.8), Paraguai (26.4), EUA (27.6), Argentina (31.9), Brasil (37.2) e RS (38.5) em kg/ano, de acordo com a

(FAOSTAT, 2021; CONAB 2021). O melhoramento genético e o aperfeiçoamento de práticas de manejos utilizadas pelos produtores, contribuíram para o incremento de produtividade ao longo destes anos.

No entanto, estimativas apontam que a população mundial seja de 9,7 bilhões de pessoas no ano de 2050, conseqüentemente incrementando a demanda pela soja. Para suprir essa demanda, em um contexto global as produtividades médias devem aumentar próximo a 50%, para evitar uma conversão maciça de ecossistemas naturais em terras cultiváveis (CASSMAN & GRASSINI, 2020), pressionando a redução da LP existente entre a PM e o potencial de produtividade (PP) (CASSMAN et al., 2003; VAN ITTERSUM et al., 2013). As práticas de manejos a serem adotadas devem basear-se na intensificação sustentável da área agricultável atual, eficiência do uso de recursos, redução do impacto ambiental e aumento da produtividade. Vale ressaltar a importância de seguir agregando produtividade com o aumento da eficiência no sistema produtivo, para conseguir atender as desafiadoras demandas futuras.

2.2 POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE E DURAÇÃO DO CICLO DE DESENVOLVIMENTO DA SOJA

O potencial de rendimento (PP) é o rendimento de uma cultura quando cultivada em um ambiente ao qual está adaptado, com fornecimento ilimitado de água e nutrientes, com pragas, ervas daninhas e doenças efetivamente controladas (EVANS, 1993; EVANS & FISHER, 1999; VAN ITTERSUM & RABBINGE, 1997). Nessas condições ideais (potencial), o crescimento da cultura é determinado pela radiação solar, temperatura, concentração de CO₂ atmosférico e práticas de manejo, que influenciam a duração do ciclo da cultura e interceptação de luz, como data de semeadura, maturidade da cultivar e densidade. Por exemplo, o PP da soja em clima subtropical do RS varia de 6.1 a 7.2 Mg ha⁻¹ (TAGLIAPIETRA et al., 2021) e entre 6 a 8 Mg ha⁻¹ no cinturão do milho dos EUA (SPECHT et al., 1999; SINCLAIR e RUFTY, 2012).

O grupo de maturidade relativa (GM) corresponde a duração do ciclo de desenvolvimento da cultura (dias), da semeadura até a maturidade fisiológica (R7).

Essa classificação foi determinada através de experimentos semeados na primeira quinzena de novembro em todo Brasil (ALLIPRANDINI et al., 2009). Quando cultivares com diferentes GMs são semeadas em uma mesma região, espera-se que quanto maior for o GM, maior será a duração do ciclo de desenvolvimento da cultivar. Já, quando ocorre o atraso da época de semeadura, observa-se uma redução da duração do ciclo do desenvolvimento, independente do GM da cultivar (ZANON et al., 2015). Apesar desse avanço, o GM não tem uma boa precisão em representar a duração do ciclo de desenvolvimento em semeaduras realizadas até o início de outubro e após a segunda quinzena de dezembro, em virtude da variação da temperatura e fotoperíodo.

A duração das fases e do ciclo de desenvolvimento da soja é regulada pela temperatura do ar e fotoperíodo (KANTOLIC, 2008), e varia com o genótipo e com o estágio de desenvolvimento da cultura (SETIYONO et al., 2007). Por exemplo, o desenvolvimento das cultivares com grupos de maturação baixos é mais dependente da temperatura do ar que do fotoperíodo até o início do enchimento de grãos (SINCLAIR et al., 2005). A partir desse estágio, o desenvolvimento passa a ser mais afetado pelo fotoperíodo do que pela temperatura do ar (GRIMM et al., 1994).

Deste modo, a interação entre época de semeadura e GM irão determinar as condições meteorológicas que irão coincidir com os estágios de desenvolvimento da cultura. Para altas produtividades é imprescindível que os estágios mais críticos (florescimento até o final do enchimento de grãos) coincidam com as condições de ambiente mais favoráveis (temperatura, radiação solar), minimizando a ocorrência de estresses (KANTOLIC et al., 2008; MARTIGNONE et al., 2006). A data de semeadura estabelece o limite superior do potencial de produtividade da soja. Grassini et al. (2015b) encontrou redução de $51 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ de soja com o atraso da semeadura no nordeste do cinturão do milho (Corn Belt/EUA), já Zanon et al. (2016), em ambiente subtropical, identificou uma perda de $26 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ em semeaduras após o dia 4 de novembro. No estudo de Tagliapietra et al. (2021) também em clima subtropical, as perdas de produtividades foram de $30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ em semeaduras após 3 de novembro para $\text{GM} \leq 5.5$, para a faixa de GM (5.6 a 6.4) perda de $25 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ após 15 de novembro e o $\text{GM} \geq 6.5$ com perda de $25 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ após de 20 de novembro. O GM influencia a dinâmica de acúmulo de biomassa e N, GM maior acumula mais

biomassa e conteúdo de N do que GM menor em uma mesma latitude, porque tem uma duração maior do ciclo vegetativo (MASTRODOMENICO & PURCELL, 2012). No entanto, essas maiores quantidades de biomassa e N não foram transformadas em produção de sementes (ZEIHER et al., 1982; MASTRODOMENICO & PURCELL, 2012), gerando um menor índice de colheita de N (ICN). O índice de colheita diminui conforme a duração do ciclo da cultura aumenta (EGLI, 1993; EDWARDS & PURCELL, 2005).

As produtividades médias aumentaram consistentemente nos últimos 10 anos por melhorias genéticas e de gestão, por exemplo a aderência dos produtores por cultivares de GM menor (com menor duração do ciclo). Estas com maior potencial e melhor eficiência no uso da água (TAGLIAPIETRA et al., 2021) em clima subtropical. Neste sentido, Specht e colaboradores (2014) observam que a utilização de GMs menores propicia um maior incremento de produtividade nas lavouras americanas. Os maiores potenciais de produtividade foram alcançados com GM entre 5.3 e 5.7 no RS e para altitudes mais baixas GM maiores (próximo de 5.7) no estudo de Zdziarski et al. (2018), combinado com semeaduras até o início de novembro, atribuído as condições climáticas (maiores coeficientes fototérmicos) em que são expostas entre a floração ao enchimento de grãos (ZANON et al. 2016; TAGLIAPIETRA et al. 2021).

2.3 ESTUDOS DE NITROGÊNIO NA SOJA

Para atingir alto potencial produtivo, a soja deve sustentar alta taxa de fotossíntese, crescimento e acumular grandes quantidades de N nas sementes (SALVAGIOTTI et al., 2008). Gaspar et al. (2017) relataram que as taxas máximas diárias de absorção de N em seu estudo é $4,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}$, ocorrendo entre R4 a R5 (FEHR e CAVINESS, 1977) para produtividade de 5.5 Mg ha^{-1} , enquanto estudo de Bender et al. (2015) apresenta taxa máxima de $4,6 \text{ kg ha}^{-1}$ em R4 para produtividade de 3.5 Mg ha^{-1} , (CAFARO LA MENZA et al., 2020) com taxa máxima de 7.7 kg ha^{-1} , ocorrendo entre R4 a R5 para produzir em média 6.1 Mg ha^{-1} . A soja absorve em torno de 55% do N até o início do enchimento de grãos estágio R5 (THIES et al., 1995; BENDER et al., 2015; CAFARO LA MENZA et al., 2020).

Recentemente, têm surgido questionamentos quanto à capacidade da FBN e NS em atender as exigências em N para garantir altas produtividades ($>4,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) na cultura da soja (SALVAGIOTTI et al., 2008; CIAMPITTI & SALVAGIOTTI, 2018). Vários fatores contribuem à variabilidade da contribuição da FBN, incluindo a disponibilidade de água (PURCELL et al., 2004), fertilidade do solo (GELFAND & ROBERTSON, 2015), clima (GEORGE et al., 1988), manejo do solo (OBERSON et al., 2007), presença e efetividade do rizóbio (WEBER et al., 1989; HUNGRIA & MENDES, 2015) e suas interações (GEORGE et al., 1988; SANTACHIARA et al., 2017). O custo energético para aquisição de N pelo processo simbiótico da FBN é de ($6-7 \text{ kg C kg}^{-1} \text{ N}$) e ($4 \text{ kg C kg}^{-1} \text{ N}$) para o N mineral (KASCHUK et al., 2009). Aumentar a fixação pode aumentar o custo energético e pode potencialmente penalizar a concentração de proteína, óleo e a produção de sementes (TAMAGNO et al., 2018). Na soja, a FBN é maior em genótipos com períodos reprodutivos mais longos, ou seja, de maior ciclo de desenvolvimento (PATTERSON & LA RUE, 1983).

Atender às exigências de N é desafiador, pois requer sincronização temporal das diferentes fontes: FBN, NS (mineralização da MO, N da atmosfera e da água) e a fertilização como alternativa. Desmistificar possíveis situações responsáveis por gerir a limitação de N é foco de alguns estudos ao redor no mundo. Cafaro La Menza et al. (2017) conduziram estudos de N na Argentina (AR) e EUA, indicando uma limitação média de 11% da produtividade. Essa limitação foi modulada pelo potencial de produtividade, onde quanto maior o potencial maior a limitação. Pesquisa realizada por Ortez et al. (2018) nos EUA e AR, apresentaram limitações de 12% e 4%, respectivamente, condicionada pela redução da MSS, número de sementes. Cafaro La Menza et al. (2019) reproduziu o protocolo apenas em Nebraska, observando incremento de 12% na produtividade, atribuído a contribuição de N vindo do solo, quanto menor oferta de NS, maior a limitação. Ambrosini et al. (2019b) sugere quanto menos MO, maior seja a lacuna-N.

A contribuição de N pela FBN é próxima de 60% para sistemas de soja em todo o mundo (SALVAGIOTTI et al., 2008; CIAMPITTI & SALVAGIOTTI, 2018), em condições de maior eficiência da simbiose da FBN (67% - 86%) foram encontrados por

Herridge (1982), Tewari et al. (2004), Santachiara et al. (2017) e Tamagno & Ciampitti (2017). Porém, quando a FBN está acima de 80% e 370 kg N ha⁻¹ na MSS, Ciampitti & Salvagiotti (2018) observaram um aumento da lacuna-N de acordo com o aumento da produtividade, evidenciando que a fixação simbiótica é insuficiente, reduzindo o crescimento, eficiência do uso da radiação e mobilização de N para o grão (CAFARO LA MENZA et al., 2020).

Diante das áreas degradadas e com solo arenoso típicas de pastagem existentes no Brasil, Cordeiro & Echer (2019) em sua pesquisa revelaram que o aumento da produtividade (22%) com produtividade da soja (<3.0 Mg ha⁻¹) em áreas pós pastagem deve-se a combinação da fertilização (50 kg ha N) e ao aumento no número de doses do inoculante (12 doses), Córdova et al. (2020) encontraram rentabilidade com a fertilização (<135 kg ha⁻¹ N), na maioria dos casos no centro oeste dos EUA. Outro estudo realizado no Brasil, porém em áreas cultivadas com soja há vários anos possuindo alta população de cepas de rizóbio estabelecidas, não houve diferença em inocular ou não a semente de soja (AMBROSINI et al., 2019a). No estudo de Santachiara et al. (2017), a eficiência do uso do nitrogênio (EUN) correlacionou-se positivamente com a duração do ciclo, maior ciclo, maior eficiência. Outro fato evidenciado no estudo é a relação de troca “trade-off” entre FBN e NS, correlacionadas negativamente.

Em um cenário de incrementos de rendimentos e forte demanda mundial pela soja, motiva pesquisadores há identificar e quantificar os fatores moduladores da limitação, para posteriormente encontrar ferramentas para garantir condições não limitantes ao cultivo da principal leguminosa do mundo, sendo de suma importância considerar as interações entre genótipo, ambiente e manejo.

2.4 NITROGÊNIO

O Nitrogênio (N) é o quarto nutriente com maior participação na composição estrutural de uma planta antecedido pelo Carbono, Hidrogênio e Oxigênio (FAQUIN, 2005), em torno de 1 a 5% do total de matéria seca das plantas é N (MALAVOLTA, 2006). Devido a sua importância para as culturas agrícolas é o nutriente que mais limita

o crescimento e também o nutriente com maior número de transformações bioquímicas no sistema solo-planta-atmosfera (MALAVOLTA, 2006).

O N desenvolve papel central no metabolismo das plantas, como principal constituinte de: Macromoléculas (proteínas, ácidos nucleicos, coenzimas, componentes da membrana, clorofila) e de Metabólitos orgânicos (aminoácidos, aminas, fitófonos, metabólitos secundários), segundo de Bang et al. (2020). O N contendo íons / moléculas de nitrato (NO_3^-), amônio (NH_4^+) e óxido nítrico (NO) são importantes sinalizações moléculas. As plantas absorvem predominantemente N na forma de NO_3^- e NH_4^+ (GANETEG et al., 2017). Além disso, uma quantidade substancial de N pode ser fornecida por associações microbianas fixadoras de N, das quais a melhor estudada é aquela entre leguminosas e rizóbio. Este último fixando N_2 em NH_4^+ em órgãos radiculares especiais chamados nódulos (DE BANG et al., 2020). Processos de entrada de Nitrogênio no solo: (A) Mineralização (amoniificação): Transformação do N orgânico do solo para inorgânico (amoniacal) realizado por microrganismos amonificadores do solo. (B) Nitrificação: A nitrificação é uma sequência do processo de mineralização, ou oxidação do N amoniacal a nitrato. (C) Fixação Biológica de N_2 : é o processo pelo qual o nitrogênio presente na atmosfera é convertido em formas que podem ser utilizadas pelas plantas, por meio de nódulos formados nas raízes de plantas da família das Leguminosas (Fabaceae). O nitrogênio disponível no solo para as plantas pode ser perdido pelos processos de desnitrificação, lixiviação e a volatilização.

O nitrogênio possui um grande requerimento pela soja, acumulando 79 kg N ha^{-1} na matéria seca acima do solo (MSS) no estágio R 7.1 para cada mega grama (Mg) de produção de grãos produzido (SALVAGIOTTI et al., 2008; TAMAGNO et al., 2017). Para cumprir essa demanda de N, a soja depende da fixação biológica de N_2 (FBN), suprimento de N do solo por mineralização da matéria orgânica (MO), deposição atmosférica seca e úmida, N da água de irrigação ou até mesmo via fertilização. A FBN é responsável pela maior contribuição deste nutriente a planta, ou seja, em média entre 52-67% (CIAMPITTI & SALVAGIOTTI., 2018; SALVAGIOTTI et al., 2008; TAMAGNO et al., 2017; SANTACHIARA et al., 2017; CÓRDOVA et al., 2019). O N mineral do solo (NS) é a segunda maior fonte de N para a soja. Em um estudo realizado nos EUA foi de 63 a 208 kg N ha^{-1} (CAFARO LA MENZA et al., 2019), em estudo de Córdova et al.,

(2019) foi de 34 a 130 kg N ha⁻¹, na argentina variou de 89 a 143 kg N ha⁻¹ (SANTACHIARA et al., 2017) similar aos encontrados por Cafaro La Menza et al. (2017).

Para uma lavoura de alto rendimento (>4.5 Mg ha⁻¹), a demanda aproximadamente é de 360 kg N ha⁻¹ ao longo de seu desenvolvimento, para que não ocorra uma limitação de N (lacuna-N), baseado na linear de rendimento de 12.5 kg por unidade (kg) de N total absorvido (SALVAGIOTTI et al., 2008). Em situações deficitárias de N pode ocorrer limitação de crescimento, floração precoce, menor ramificação e folhas menores devido à redução da divisão e expansão celular (DE BANG et al., 2020), está bem estabelecido que a deficiência de N induz a quebra da clorofila via proteólise, levando à liberação de aminoácidos, amidas e NH₄⁺ (HAVÉ et al., 2016).

3. ARTIGO - A CURTA DURAÇÃO DO CICLO DA CULTURA AUMENTA A LIMITAÇÃO DE NITROGÊNIO DA SOJA DE ALTA PRODUTIVIDADE

(Será submetido para a revista Field Crops Research, IF=5.224)

1 **A curta duração do ciclo da cultura aumenta a limitação de nitrogênio da soja de alta**
2 **produtividade**

3

4 Guilherme Guerin Munareto^a, Nicolas Cafaro La Menza^b, Eduardo Lago Tagliapietra^a, César
5 Eugenio Quintero^c, Gustavo Brunetto^a, Patric Scolari Weber^a, Nereu Augusto Streck^a,
6 Evandro Henrique Figueiredo Moura da Silva^d, Fabio Ricardo Marin^d, Alencar Junior Zanon^a

7

8 ^a Universidade Federal de Santa Maria, Hall 77, Roraima Avenida 1000, Santa Maria, Rio
9 Grande do Sul, Brasil

10 ^b Department of Agronomy and Horticulture, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE 68583-
11 0915, USA

12 ^c Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos. Paraná, Entre Ríos,
13 Argentina

14 ^d Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), Universidade de São Paulo,
15 Piracicaba, SP 13418-900

16

17

18 **Destaques**

19

- 20 • O efeito negativo da Lacuna-N na produtividade de grãos, proteína e óleo aumenta
21 conforme reduz a duração do ciclo da soja.
- 22 • Não há lacuna-N na produtividade de grãos no GM longo, pois a FBN e o NS supriram a
23 demanda.
- 24 • Os efeitos da lacuna-N na soja de curta duração foram associados a imposição de um
25 limite inferior ao potencial de crescimento da cultura pelo tratamento zero-N.
- 26 • Há uma tendência de incremento na concentração de proteína sem reduzir a de óleo
27 quando fertilizamos com N no GM longo.

28

29

30 **Resumo**

31

32 As fontes de nitrogênio do solo (NS) em conjunto com a fixação de N₂ (FBN) não são
33 suficientes para atender a demanda de N em lavouras de soja de altas produtividades. Nossa

34 hipótese é que uma menor duração do ciclo da cultura propicia uma maior lacuna-N. Para
35 testar, seguimos um protocolo baseado na demanda de N da cultura de acordo com seu
36 potencial, sincronizando o fornecimento do nutriente com a demanda de N e a fenologia da
37 cultura, realizando aplicações fracionadas de N (tratamento, N-completo) comparado a um
38 tratamento zero-N que forçou a cultura a depender da FBN e NS. Foram conduzidos
39 experimentos em condições potenciais em cinco locais do sul do Brasil. Um conjunto de dados
40 com ampla faixa de potencial de produtividade (PP) 2.7 a 7.0 Mg ha⁻¹, grupo de maturação
41 (GM) 5.0 a 6.8 e duração do ciclo (102 a 138 dias). A massa seca acima do solo (MSS) foi
42 coletada ao longo do ciclo para avaliar a taxa de crescimento da cultura (TC) dos dois
43 tratamentos de N. A produtividade de grãos, proteína e óleo e suas concentrações, massa do
44 grão, número de grão e legumes foram mensurados em ambos tratamentos de N na maturidade
45 fisiológica. O conjunto de dados foi separado em três grupos: curto (GM, 5.0 a 5.2); médio (GM,
46 5.5 a 5.9) e longo (GM, 6.2 a 6.8), doravante assim chamados. Os resultados indicam que
47 quanto menor o ciclo, maior a lacuna-N na produtividade de grãos, GM curto com lacuna-N
48 (18.5%, 0.85 Mg ha⁻¹), GM médio (3.5%, 0.15 Mg ha⁻¹) e GM longo lacuna-N próxima de zero
49 contrastando o N-completo menos o zero-N. O GM curto teve a maior resposta quando
50 fertilizado com N versus zero-N, incrementando a TC máxima (3 g m⁻² d⁻¹), MSS em R3 (1.1 Mg
51 ha⁻¹), massa do grão (16 mg) número de legumes e grãos (14.4% e 13.5%, respectivamente). A
52 produtividades de proteína também incrementou (GM curto, 0.34 Mg ha⁻¹, GM longo, 0.07 Mg
53 ha⁻¹) e óleo (GM curto, 0.12 Mg ha⁻¹). Os resultados indicam (i) a lacuna-N na produtividade de
54 grãos aumenta conforme reduz a duração do ciclo da soja, (ii) o efeito da limitação de N no
55 crescimento da soja e na produtividade de proteína e óleo é maior quanto menor a duração do
56 ciclo, entretanto, quando fertilizada a concentração de proteína incrementa sem reduzir a
57 concentração de óleo para os ciclos longos.

58

59 Palavras-chaves: lacuna-N, grupo de maturação, ciclo de desenvolvimento, subtropical,
60 potencial de produtividade.

61

62 **1. Introdução**

63

64 A soja [*Glycine max* (L.) Merr.] é a base para alimentação humana e animal, por ser uma
65 preciosa fonte de proteína vegetal e óleo, além de ser uma alternativa sustentável para
66 combustíveis. O Brasil é o maior produtor (128,5 milhões Mg) e exportador (86 milhões Mg)
67 mundial da oleaginosa, produzindo aproximadamente um terço em clima subtropical (USDA,

68 2021). A produtividade da soja ao redor do mundo aumentou, impulsionada por fatores
69 genéticos, aperfeiçoamento de práticas de manejos, uso de cultivares mais precoces e adesão
70 as tecnologias e suas interações sinérgicas (Salvagiotti et al., 2008; Grassini et al., 2014a, b;
71 Specht et al., 1999, 2014; Tagliapietra et., 2021). Ainda assim, Cassman & Grassini (2020)
72 relatam a necessidade de aumentar a taxa, uma vez que projeções indicam um aumento
73 populacional mundial e de renda nos países em desenvolvimento, fazendo que a demanda de
74 alimentos e de energia cresça em até 50% em 2050.

75 Altas produtividades da soja são alcançadas em clima subtropical, com produtividades
76 de 5 - 7 Mg ha⁻¹ na Argentina (Merlos et al., 2015; Santachiara et al., 2017a) e de 6 - 8 Mg ha⁻¹
77 no Brasil (Ambrosini et al 2019; Tagliapietra et al. 2021; Corrasa et al 2018; Battisti et al., 2018).
78 Todavia, a média dos produtores está ao redor de 3.0 Mg ha⁻¹ (USDA, 2021). Reduzir a lacuna
79 de produtividade (LP) dos cultivos, ou seja, aproximar a produtividade média do produtor (PM)
80 da produtividade potencial (PP), fornece uma oportunidade para aumentar a produção das
81 culturas nas áreas agrícolas existentes (Cassman et al., 2003; van Ittersum et al., 2013), mas
82 exigirá mudanças na gestão de nutrientes e água (Mueller et al., 2012) aliada a intensificação
83 da produção (Cassman & Grassini, 2020).

84 O PP da soja é determinado pela época de semeadura (radiação solar e temperatura),
85 cultivar (grupo de maturidade e densidade de plantas) e CO₂ (Evans, 1993; van Ittersum &
86 Rabbinge, 1997; Evans & Fisher, 1999). O fornecimento insuficiente de nutrientes limita o PP
87 (van Ittersum et al., 2013), ocasionando uma lacuna nutricional. Um grande desafio para
88 incrementar a produtividade de soja é atender a alta demanda de nitrogênio (N), em razão da
89 sua disponibilidade ser crítica para a fixação fotossintética de carbono (Sinclair & Horie, 1989) e
90 pelo alto teor de proteína no grão (Giller & Cadisch, 1995). A exigência de N por unidade de
91 fotossintato produzida é a mais alta entre todas as culturas alimentares (Sinclair & De Wit,
92 1976), cerca de (3.3) mais que o Milho e (4.3) vezes mais que trigo e arroz (Salvagiotti et al.,
93 2008; Bender, et al., 2013; Barraclough et al., 2010; Yin et al., 2019). As maiores contribuições
94 de N dependem da: (a) fixação biológica de N₂ (FBN) em média 60% (Salvagiotti et al., 2008;
95 Ciampitti & Salvagiotti., 2018; Santachiara et al., 2017a), com maior protagonismo entre a
96 floração e o enchimento de grãos e (b) N mineral do solo (NS) contribuindo principalmente na
97 fase vegetativa. Reporta-se a existência de uma relação negativa “trade-off” entre estas fontes
98 (Santachiara et al., 2017a), coincidindo a máxima demanda de N pela soja (Zapata et al., 1987,
99 Córdova et al., 2019; Cafaro La Menza et al., 2020) entre os estágios R4 e R5 (Bender et al.,
100 2015; Córdova et al., 2019; Cafaro La Menza et al., 2020). Quando inicia o decréscimo da
101 Fixação de N₂ pela planta, a cultura ainda necessita absorver próximo a 50% da sua demanda

102 total de N do enchimento a maturação do grão (Thies et al., 1995; Gaspar et al., 2017; Cafaro
103 La Menza et al., 2020).

104 A FBN tem um alto custo energético e pode penalizar a concentração de proteína, óleo e
105 a produção de grãos (Tamagno et al., 2018), muitas vezes não atendendo à demanda da planta
106 (Salvagiotti et al., 2008; Ciampitti & Salvagiotti, 2018; Cafaro La Menza et al., 2020) até mesmo
107 somada ao NS ocorre limitação de nitrogênio (lacuna-N) na Argentina, nos Estados Unidos
108 (Ortez et al., 2019; Cafaro La Menza et al., 2017, 2019, 2020), e no Brasil (Ambrosini et al.,
109 2019; Cordeiro & Echer, 2019). No entanto, esses estudos não avaliaram a relação da lacuna-N
110 com a duração do ciclo da soja, sugerindo o questionamento: se a lacuna-N em lavouras de alta
111 produtividade pode ser gerida pela duração do ciclo da soja. Diante do atual cenário, cada vez
112 mais os produtores escolhem cultivares mais precoces (Specht et al., 2014) e estas com
113 maiores potenciais (Heatherly, 2005; Zanon et al., 2016; Tagliapietra et al., 2021) impulsionando
114 maiores taxas de absorção de N em um menor período de tempo (Santachiara et al., 2017b).
115 Nossa hipótese é de que uma menor duração do ciclo da cultura propicia uma maior lacuna-N.

116 Mapear e compreender a lacuna-N é necessário para garantir condições não limitantes
117 para atingir altas produtividades, composição do grão e pondo em risco a segurança alimentar
118 mundial. Os objetivos deste estudo foram: (a) determinar os efeitos da lacuna-N na
119 produtividade de grãos por duração do ciclo, (b) mensurar o impacto da limitação de N no
120 crescimento da soja, concentração e produtividade de proteína e óleo do grão por duração do
121 ciclo. Para tal, utilizamos um tratamento completo de N, suprindo a demanda ao longo de todo
122 ciclo contraposto a um tratamento zero-N, baseado no NS e na fixação biológica de N₂ como
123 fontes de N, conduzidos em cinco locais que retratam a área produtiva da região Subtropical do
124 Brasil, com um conjunto de dados de amplo PP e GMs, cultivadas em condições livres de
125 estresse.

126

127 **2. Materiais e Métodos**

128

129 *2.1. Experimento de campo*

130

131 Os experimentos de campo foram conduzidos no Estado do Rio Grande do Sul (RS),
132 Brasil. O Estado tem a maior área cultivada de soja do mundo em clima subtropical úmido
133 (USDA, 2021) com verão quente (Cfa), baseado no regime climático de Köppen. O experimento
134 foi conduzido durante três anos agrícolas (2018 a 2020), em cinco lavouras com histórico de
135 alta produtividade (5 – 7 Mg ha⁻¹), localizadas estrategicamente para abranger a variação

136 climática e de solo (Figura suplementar S1). Os experimentos foram conduzidos em 17
137 ambientes, onde o ambiente foi definido pela combinação de data de semeadura, grupo de
138 maturação (GM), local e ano; nesses ambientes foram aplicados o tratamento de N (N-completo
139 e zero-N, ver seção 2.2) doravante a combinação será chamada de ambiente (Tabela 1). A
140 escolha dos locais do experimento foi amparada em mapas de produtividades, logo, nos pontos
141 de maiores produtividades de cada ambiente estes conduzidos em condições irrigadas. O
142 fornecimento dos nutrientes foi baseado no potencial de produtividade, (exceto para o N no
143 tratamento zero-N, ver seção 2.2). O manejo de plantas daninhas, pragas e doenças foi de
144 forma preventiva com o propósito de eliminar qualquer fator limitante e redutor de produtividade.
145 Nos locais havia uma estação meteorológica para fornecer precisamente os dados
146 meteorológicos diários de cada ambiente (Figura 1). Todas sementes foram tratadas com
147 inseticida, fungicida e inoculadas com quatro doses (*Bradyrhizobium elkanii*, cepas SEMIA 587
148 e SEMIA 5019 na concentração de 5×10^9 UFC / mL).

149 **Tabela 1.**

150 Descrição dos experimentos e características do solo (0 a 30 cm) em três anos agrícolas (2018 a 2020) em cinco locais do Rio
151 Grande do Sul, Brasil.

152

Local	AMB	Data de semeadura	GM	Densidade de plantas (pl m ⁻²)	PP (Mg ha ⁻¹)	Ciclo (dias)	Tipo de solo ¹	Classe textural ²	PD (anos)	pH H ₂ O	MOS (g kg ⁻¹)	V (%)	N do solo ³ (Kg ha ⁻¹)
Cruz Alta (28°51'S, 53°36'W e 420 m altitude)	1	3 Nov, 2017	5.8	27	6.7	130	LV	Franco argiloso	>20	5.5	30	60	si
	2	20 Nov, 2018	6.5	22	6.0	127	LV	Franco argiloso	>20	5.5	30	60	150
	3	17 Nov, 2019	5.5	31	6.2	116	LV	Franco argiloso	>20	5.0	27	58	155
	4	21 Nov, 2019	5.8	26	6.3	111	LV	Franco argilo arenoso	>20	5.5	16	53	72
	5	3 Dez, 2019	6.5	22	5.5	120	LV	Franco argiloso	>20	5.8	22	65	155
Júlio de Castilhos (29°11'S, 53°36'W e 434 m altitude)	6	30 Out, 2017	5.0	28	6.9	114	LVA	Argila	>20	5.5	24	53	si
	7	30 Out, 2017	5.1	33	7.0	114	LVA	Argila	>20	5.5	24	53	si
	8	30 Out, 2017	5.6	16	6.5	132	LVA	Argila	>20	5.5	25	52	si
	9	26 Jan, 2020	5.8	42	3.6	116	LVA	Argila	>20	5.1	14	51	137
	10	26 Jan, 2020	6.2	18	2.7	118	LVA	Argila	>20	5.3	12	50	137
São Francisco de Assis (29°24'S, 54°54'W e 398 m altitude)	11	9 Nov, 2019	5.2	25	5.4	108	LVA	Franco siltoso	>5	5.5	26	55	130
Santa Maria (29°43'S, 53°43'W e 95 m altitude)	12	17 Ago, 2018	5.0	44	5.8	102	PVA	Franco	>3	5.5	22	55	si
	13	17 Ago, 2018	5.9	31	4.7	128	PVA	Franco	>3	5.5	22	55	si
	14	17 Ago, 2018	6.8	44	4.3	138	PVA	Franco	>3	5.5	22	55	si
	15	17 Nov, 2019	5.8	25	6.5	115	PVA	Franco	>4	5.1	12	50	103
	16	17 Dez, 2019	5.0	32	4.9	106	PVA	Franco	>4	5.5	13	56	103
Uruguaiana (29°45'S, 56°49'W e 90 m altitude)	17	20 Nov, 2018	5.8	21	6.5	123	SX	Franco argiloso	>2	5.0	15	49	si

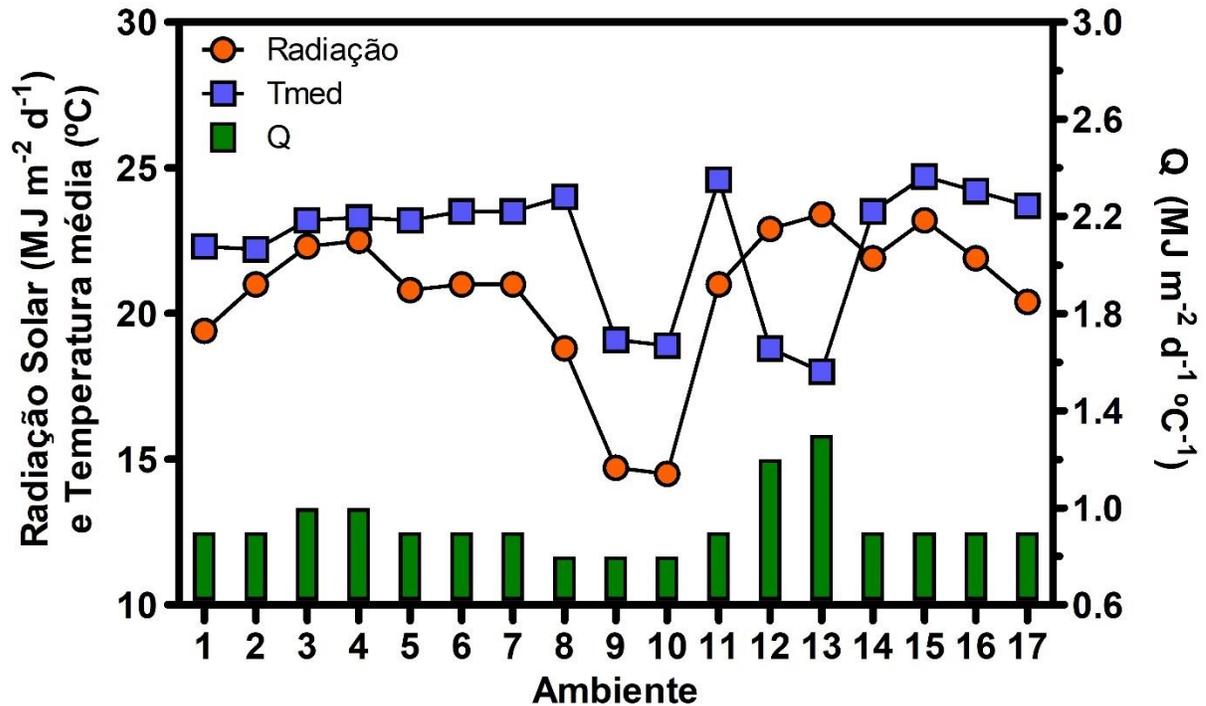
153

154 AMB: ambiente, PP: potencial de produtividade, PD: Plantio direto, SOC: matéria orgânica do solo, V: saturação de base, LV: latossolo vermelho,
155 LVA: latossolo vermelho-amarelo, PVA: argissolo vermelho-amarelo, SX: planossolo háplico, si: sem informação (não mensurado)

156 ¹ [Sistema Brasileiro de Classificação de Solos](#) (Embrapa, 2013). ² Classificação do triângulo textural (USDA). ³ N acumulado na MSS de milho na
157 maturidade fisiológica (Janssen et al., 1990; Setiyono et al., 2011), para mensurar a contribuição de N do solo (Cafaro La Menza et al., 2019).

158 As características químicas do solo (Tabela 1) foram determinadas com a metodologia
159 de análise de pH, matéria orgânica e das bases (Cálcio, Magnésio e Potássio) realizada de
160 acordo com Tedesco et al. (1995). A saturação de bases (V) baseia-se no Comitê sobre
161 Química do solo e Fertilidade (CQFS-RS / SC, 2016). Os campos de Cruz Alta (CA) e Júlio de
162 Castilhos (JC) são manejados com rotação. A cada três anos a soja é substituída pelo milho no
163 verão, no inverno alterna-se a cada ano aveia [*Avena strigosa* Schreb.] e trigo em CA. Já, em
164 JC o inverno que antecede a soja cultiva-se aveia, para o inverno que antecede o milho cultiva-
165 se nabo [*Raphanus sativus* L.] com aveia em ambos locais. Em São Francisco de Assis (SF) e
166 Santa Maria (SM), a aveia preta antecedeu a soja, já em Uruguaiana (UR) o azévem [*Lolium*
167 *multiflorum* Lam.] antecedeu a soja. Os campos são cultivados com plantio direto (Tabela 1), ou,
168 também, chamada de agricultura de conservação por Kassam, Friedrich e Derpsch (2018).

169 As semeaduras foram realizadas de meados de agosto até final de janeiro (Tabela 1),
170 afim de representar a região subtropical, com faixa de mais de cinco meses de semeadura,
171 submetendo a cultura há diferentes potenciais de produtividades. Para isso, usamos uma
172 variação de GM entre 5.0 a 6.8 com o intuito de simular a duração do ciclo (entre, emergência e
173 a maturidade fisiológica) utilizada a campo pelos produtores. A classificação do GM é baseada
174 em semeaduras na primeira quinzena de novembro em todo Brasil (Alliprandini et al., 2009).
175 Quando cultivares com diferentes GM são semeadas em uma mesma região (latitude), espera-
176 se que quanto maior for o GM, maior será a duração do ciclo de desenvolvimento da cultivar
177 (Heatherly, 2005; Zanon et al., 2015). A fertilização (em kg ha⁻¹) dos ambientes variou na
178 semeadura: N (18-22), P (26-39), S (10-15), Mg (10-12) e Ca (17-21) e pré-semeadura K (83-
179 108), em razão do potencial produtivo esperado e da fertilidade. O espaçamento entre fileiras
180 de soja foi de 0.45 m e o tamanho das parcelas de 6 fileiras por 10 m, cada ambiente era
181 composto por oito parcelas (quadro repetições por tratamento de N, ver seção 2.3). A
182 densidade final de plantas foi ajustada após desbaste manual em V1 (Fenh & Caviness, 1977).



183

184 **Figura 1.** Dados Meteorológicos médios da fase reprodutiva (R1-R7) baseado em Fehr e
 185 Caviness (1977) para a radiação solar incidente (símbolo laranja), temperatura média (símbolo
 186 azul) e coeficiente fototérmico (Q) (barra verde). Cada ponto de dados representa o valor médio
 187 de cada ambiente (ver tabela 1). Cada ambiente corresponde a combinação de (data de
 188 semeadura × GM × local × ano × tratamento de N).

189

190 Tínhamos uma parcela de milho (8 linhas x 10 m) com omissão de N localizado ao lado
 191 do experimento da soja em CA (2018 e 2019), JC (2020), SF (2019) e SM (2019). Foi utilizado o
 192 híbrido DKB 230 VT pro 3®, com espaçamento entre fileiras de 0,45 m e população de 8
 193 plantas m² após raleio manual (primeira folha desenvolvida). O manejo da fertilização foi
 194 potencial de acordo com (CQFS, 2016) (exceto, ao fornecimento de N). O milho foi irrigado e
 195 mantido livre de plantas daninhas, doenças e patógenos durante toda a safra.

196 2.2. Protocolo de fertilização nitrogenada e coleta de dados

197

198 Confrontamos dois tratamentos, N-completo e zero-N, distribuídos aleatoriamente em
199 cada ambiente. O Tratamento com N-completo tem como propósito garantir condições não
200 limitantes no fornecimento de N ao longo do desenvolvimento da planta, por meio de adições de
201 fertilizantes de acordo com a demanda da cultura. Todavia, o tratamento zero-N tem escopo de
202 reproduzir o manejo dos produtores, ou seja, o fornecimento de N dependa da fixação biológica
203 de N₂, NS e doses de N mineral na semeadura (<22 kg de N ha⁻¹). O fornecimento do N mineral
204 na semeadura deve-se por ser prática comum dos agricultores, ao utilizar formulações
205 fosfatadas compostas com baixa concentração de N.

206 Utilizamos o protocolo de fertilização de Cafaro La Menza et al. (2017) para o tratamento
207 (N-completo), este, projetado para suprir toda demanda da cultura de acordo com PP. O PP foi
208 simulado para cada ambiente, usando o modelo CSM CROPGRO-Soybean (Boote et al., 2002),
209 inserindo dados meteorológicos diários medidos nos últimos 15 anos, sendo suficiente para ter
210 estimativas precisas e seguras (Grassini et al., 2015). Este modelo foi calibrado e validado em
211 clima subtropical por Aramburu Merlos et al. (2015) e utilizado por Tagliapietra et al. (2021). A
212 faixa de PP simulado foi de 2.7 Mg ha⁻¹ em semeadura tardia (safrinha pós milho) e 7.0 Mg ha⁻¹
213 (final de outubro). Desta forma, o PP está em concordância com o encontrado por Tagliapietra
214 et al., (2021) que variou de 6.1 a 7.2 Mg ha⁻¹ para o RS. A fertilização do tratamento N-
215 completo baseia-se: (a) potencial de produtividade do ambiente específico, (b) necessidade de
216 N da soja por unidade de produção de sementes 79 kg N Mg⁻¹ (Bender et al., 2015; Tamagno et
217 al., 2017; Ortez et al., 2019; Ortel et al., 2020), (c) eficiência do aproveitamento do N do
218 fertilizante 70%. Embasado na acumulação de N pela planta (Thies et al., 1995; Gaspar et al.,
219 2017; Bender et al., 2015; Cafaro La Menza et al., 2020), dividiu-se em cinco aplicações
220 (estágios V2, V4, R1, R3 e R5), com as seguintes contribuições (10%, 10%, 20%, 30% e 30%
221 respectivamente) do total de fertilizante utilizado (305-790 kg N ha⁻¹). As aplicações antecediam
222 as irrigações (<24 horas) com volume próximo de (20mm), fertilizante (ureia) aplicado
223 manualmente entre as fileiras de plantas, para mais informações (Cafaro La Menza et al.,
224 2017).

225 A fenologia das plantas foi acompanhada a cada três dias, seguindo a escala de Fehr &
226 Caviness (1977). Seguindo Lindquist et al. (2005), os estágios fenológicos foram comparados
227 entre ambientes (com diferentes regimes de temperatura, época de semeadura e GM),
228 definindo cada estágio de desenvolvimento (DS) usando uma escala adimensional onde 0, 1 e 2
229 correspondem aos estágios VE, R3 e R7, respectivamente (Figura 4). Cada DS foi calculado

230 com base na temperatura média diária do ar usando uma função beta definida por Wang &
231 Engel (1998), com temperaturas cardinais apropriadas para cada fase, conforme relatado por
232 Setiyono et al. (2007). Não levamos em consideração o fotoperíodo em nosso cálculo de DS
233 devido os experimentos estarem em uma estreita faixa latitudinal ($<1^\circ$). Coletamos a massa
234 seca acima do solo (MSS) nos estágios (V2, V4, R1, R5, R6 e R7) em 1 metro de fileira de cada
235 repetição para os dois tratamentos de N. No estágio R3 uma rede foi colocada entre as fileiras
236 para coletar as folhas senescidas a cada 9 dias, após coletadas foram secas em estufa a 70°C
237 até atingir massa constante. A MSS no estágio R7 é a soma da coleta de R7 mais as folhas
238 senescidas após R3, coletadas em 10 ambientes, sendo que nosso conjunto de dados foi
239 dividido em grupos (ver seção 2.3).

240 No estágio R7, também foi coletado mais um metro de fileira em cada repetição para
241 quantificarmos o número de legumes e de grãos. Em uma área de 2 m^2 central de cada
242 repetição foi usada para mensurar a produtividade e a massa de grãos, foram ajustados a $0,130$
243 $\text{kg H}_2\text{O kg}^{-1}$ de grão. Para mensurar a massa de grãos 200 grãos foram pesados. Os grãos
244 foram secos em estufa até atingir massa constante, a seguir foram moídos para determinação
245 de proteína pelo método Kjeldahl (Mckenzie & Wallace, 1953) e de óleo pelo método de Bligh &
246 Dyer (1959) nas quatro repetições por tratamento de N. A produtividade e a concentração de
247 proteína e óleo foram expressas com base na matéria seca do grão, a produtividade (Mg ha^{-1}) é
248 derivada da multiplicação entre a concentração e a produtividade de grãos, as concentrações
249 são mostradas (em unidades de $\text{kg constituinte kg}^{-1}$ grão).

250 Na maturação fisiológica do milho, foi coletada a MSS em 2.7 m^2 centrais, as partições
251 foram separadas em colmo, folha e espiga e colocadas na estufa a 70°C até atingir massa
252 constante, após foram moídas e em laboratório determinado o N total acumulado pelo milho
253 (JANSSEN et al., 1990; SETIYONO et al., 2011) pelo método Kjeldahl (Mckenzie & Wallace,
254 1953) para estimar o suprimento de NS (Cafaro La Menza et al., 2019).

255

256 *2.3. Análise de dados*

257

258 A produtividade, massa de grãos, MSS no estágio R3, número de grãos e legumes para
259 o tratamento N-completo foram plotados contra as médias do tratamento zero-N utilizando as
260 figuras de linha 1:1 (que representa a hipótese nula de nenhuma resposta diferencial entre N
261 completo e zero-N). Separamos nosso conjunto de dados em três grupos de GM: curto (GM
262 entre 5.0 a 5.2, com 5 ambientes); médio (GM entre 5.5 a 5.9, com 8 ambientes) e longo (GM
263 entre 6.2 a 6.8, com 4 ambientes), doravante assim chamados.

264 As regressões lineares foram usadas para investigar a relação entre a diferença de
 265 produtividade de grãos, proteína e óleo (N-completo menos zero-N) com os dias de ciclo. Foi
 266 estimada a inclinação, intercepte (se aplicável) e coeficiente de determinação (r^2) avaliados pelo
 267 teste F. Os gráficos de caixa foram usados para ilustrar a diferença de produtividade de grãos,
 268 proteína e óleo (N-completo menos zero-N), a diferença estatística entre os grupos foi avaliada
 269 pelo teste de Tukey ao nível de significância ($p < 0.05$).

270 Utilizamos um modelo logístico (France & Thornley, 1984), que foi ajustado aos dados
 271 da MSS acumulado coletados de VE a R7. Onde W_0 é a MSS estimado (g m^{-2}) na emergência,
 272 W_f é a MSS máximo durante a estação de crescimento, t é o tempo em dias após a emergência
 273 e u é uma proporcionalidade constante do crescimento da planta e sua deterioração com o
 274 tempo. A derivada da Equação 1, com relação ao tempo, representa a taxa do crescimento da
 275 cultura (TC) em ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$). Estimar TC usando esta abordagem ajuda a remover o erro de
 276 medição associado a tempos de amostragem específicos foi usada por (Hall, Connor & Sadras,
 277 1995; Bange, Hammer, & Rickert, 1997; Lindquist et al., 2005; Cafaro La Menza et al., 2020).
 278 Para calcular a MSS e a TC, seguimos a divisão dos grupos de GM. Assim, temos três
 279 ambientes no grupo curto (GM entre 5.0 e 5.2), quatro ambientes para o grupo médio (GM entre
 280 5.5 e 5.9) e três ambientes no grupo longo (GM entre 6.2 e 6.8).

281

$$282 \quad \text{MSS acumulado} = \frac{W_0 * W_f}{W_0 + (W_f - W_0) * e^{-u * t}} \quad (1)$$

283

284

285 Uma análise combinada de variância (ANOVA) foi conduzida para testar se a limitação
 286 de nitrogênio na soja tem relação com os grupos de maturação. Para isso, analisamos os
 287 efeitos dos grupos de maturação e sua interação com um amplo fornecimento de nitrogênio (N-
 288 completo) na produtividade de grãos, número e massa de grãos, número de legumes, MSS no
 289 estágio R3, concentração e produtividade de proteína e óleo (SAS ® PROC MIXED v.9.3;
 290 Moore & Dixon, 2015). Nesta análise, cada combinação de ano, data de semeadura, GM e o
 291 local foram chamados de ambiente. Cada ambiente teve dois tratamentos de N (N-completo e
 292 zero-N), com quatro repetições. Grupo de maturação e tratamentos de N foram tratados como
 293 efeitos fixos. A interação do grupo de maturação com o tratamento de N pode ser usada para
 294 avaliar a consistência geral da resposta. Após, avaliamos separadamente o efeito do tratamento
 295 N em cada grupo, usando teste-t (ou teste de Wilcoxon, quando a distribuição dos valores
 296 desviou da normalidade) para avaliar a significância estatística entre a diferença das médias

297 dos tratamentos (N-completo e zero-N) em relação a uma hipótese nula de interceptação igual a
298 zero usamos GraphPad®.

299

300 **3. Resultados**

301

302 *3.1. Efeitos da fertilização com nitrogênio nos componentes de produção, MSS e na* 303 *produtividade de grãos*

304

305 Com experimentos conduzidos nas principais áreas produtoras do Rio Grande do Sul,
306 em lavouras historicamente de alta produtividade, submetidas a um amplo conjunto de GM e
307 épocas de semeaduras, a produtividade de grãos média dos 17 ambientes para o tratamento N-
308 completo variou de 3.7 - 6.6 Mg ha⁻¹ e de 3.7 - 6.1 Mg ha⁻¹ no tratamento zero-N. A média dos
309 ambientes foi superior para o tratamento N-completo (7%; 0.31 Mg ha⁻¹) comparado ao zero-N
310 (Figura 2A) com efeito significativo ($P < 0.001$) na ANOVA (Tabela 2).

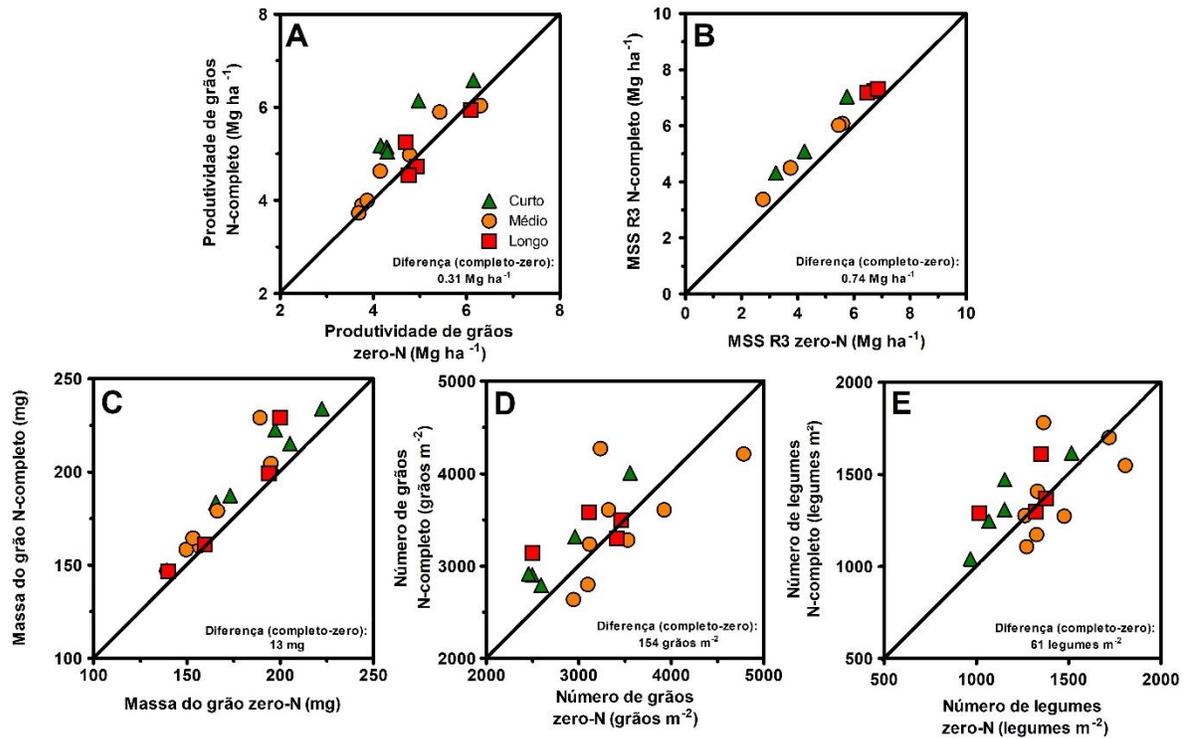
311 A MSS no estágio R3 foi afetada pelos grupos de GM, tratamento de N e pela interação
312 GM e N ($P < 0.001$; Tabela 2). Quando comparamos o tratamento N-completo com o zero-N,
313 observa-se um incremento de 14.5% a mais de MSS para o tratamento sem limitação de N
314 (Figura 2B). O GM curto apresentou a maior resposta a fertilização com N entre os grupos com
315 diferença de 24.5% (Figura 2B; Tabela 2) do tratamento N-completo comparado ao zero-N, para
316 o GM médio a diferença (14%; Figura 2B) entre N-completo menos zero-N. Já, as maiores MSS
317 foram encontradas no GM longo (> 7 Mg ha⁻¹), com incremento (8.4%) para o tratamento N-
318 completo comparado ao zero-N (Figura 2B; Tabela 2).

319 A fertilização com N aumentou a massa do grão de todos ambientes quando comparado
320 ao zero-N (7.2%; 189 versus 176 mg, respectivamente) (Tabela 2 e Figura 2C). O fator GM
321 também influenciou na massa do grão ($P < 0.001$; Tabela 2). Dessa forma, o grupo curto
322 apresentou a maior diferença entre os tratamentos de N ($P = 0.004$; Tabela 2) e o tratamento N-
323 completo incrementou a massa de grão em 16 mg comparado ao zero-N, já no grupo médio o
324 incremento foi de 12.3 mg da massa de grão ($P = 0.019$; Tabela 2).

325 O número de grãos foi afetado pelo tratamento N ($P = 0.03$) com diferença média (6.1%;
326 3359 versus 3305 grãos m², Figura 2D) do tratamento N-completo contrastado com o zero-N e
327 com diferença entre os GM ($P = 0.027$). Apenas o grupo curto teve diferença significativa entre
328 os tratamentos ($P = 0.001$; Tabela 2), produzindo 376 grãos m² ou 13.5% a mais no tratamento
329 N-completo do que no zero-N. O número de legumes foi influenciado pelo GM, tratamento de N
330 e a interação de ambos (Tabela 2), com diferença média dos ambientes entre o tratamento N-

331 completo menos o zero-N (5.9%; 1383 versus 1322 legumes m²; Figura 2E). Somente o grupo
 332 curto apresentou diferença entre os tratamentos (14.4% ou 165 legumes m²; $P=0.017$) a mais
 333 para o N-completo do que no zero-N (Tabela 2).

334



335

336

337 **Figura 2.** Comparação entre os tratamentos N-completo e zero-N para (A) produtividade de
 338 grãos, (B) matéria seca acima do solo no estágio R3, (C) massa do grão e (D) número de grãos
 339 nos 17 ambientes. Cada ambiente representa a combinação de data de semeadura × GM ×
 340 tratamento de N × local × ano. Grupo Curto (símbolos verdes), Médio (símbolos laranja) e
 341 Longo (símbolos vermelhos). A diferença média entre os tratamentos (N-completo menos zero-
 342 N) é mostrada em cada painel. A linha diagonal sólida em cada gráfico indica hipótese nula.

343

344 **Tabela 2.**

345 Análise de variância para o efeito do tratamento com nitrogênio (N), grupo de maturação (GM) e a relação da interação GM x N nos
 346 componentes de produção, produtividade de grãos, concentração e produtividade de óleo e proteína no grão e no acúmulo de
 347 matéria seca (MSS). Cada combinação (locais x data de semeadura x densidade x GM x tratamento de N) foi considerado um
 348 ambiente (AMB). Também são mostrados os valores e probabilidades do teste F para os efeitos fixos, quadrados médios (MS) e
 349 para os efeitos aleatórios. Avaliamos se a diferença média do tratamento é significativamente diferente de zero para cada grupo
 350 (curto, médio e longo).

		Prod. de grãos	Massa do grão	Número de Legumes	Número de Grãos	Óleo	Prod. de óleo	Proteína	Prod. de proteína	MSS
Efeito fixo	g.l.	F	F	F	F	F	F	F	F	F
GM	2	2.5	8.8***	3.3*	3.8*	2.15	3.3*	0.8	1.1	20***
N	1	13.8***	37.5***	5.0*	4.7*	5.12*	2.7	10.1**	19.7***	168.6***
GM x N	2	9.3***	0.7	3.2*	2.2	0.5	6.3**	0.9	4.5*	6.9**
Efeito aleatório		MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS
Rep (AMB x GM)	65	1.353	1099.01	115226	734108	19.59	0.074	18.49	0.18	1.97
Residual	65	0.228	132.70	44943	265823	1.55	0.009	4.46	0.04	0.063
Médias por GM		(Mg ha ⁻¹)	(mg)	(m ²)	(m ²)	(%)	(Mg ha ⁻¹)	(%)	(Mg ha ⁻¹)	(Mg ha ⁻¹)
Curto	N-completo	5.62	208.6	1336	3187	17.3	0.96	35.5	1.97	5.5
	zero-N	4.77	192.8	1171	2812	17.9	0.84	34.9	1.63	4.4
	dif	0.85**	15.8**	165*	376**	-0.6	0.12*	0.6	0.34***	1.1*
Médio	N-completo	5.0	180.4	1408	3457	15.4	0.78	36.4	1.83	5.0
	zero-N	4.85	168.1	1444	3493	16.1	0.78	35.3	1.73	4.4
	dif	0.15	12.3*	-36	-36	-0.7	0	1.1	0.1	0.6**
Longo	N-completo	4.55	184.1	1392	3379	16.1	0.74	37.5	1.70	7.2
	zero-N	4.60	173.3	1266	3121	16.3	0.76	35.6	1.63	6.6
	Dif	-0.05	10.7	126	259	-0.2	-0.02	1.9	0.07*	0.6*

351

352 Prod, produtividade. Rep, replica. Dif, diferença entre o tratamento N-completo menos zero-N. MSS, no estágio R3 (início da formação do
 353 legume). Os asteriscos indicam significância estatística em *p < 0.05, **p < 0.01, e ***p < 0.001.

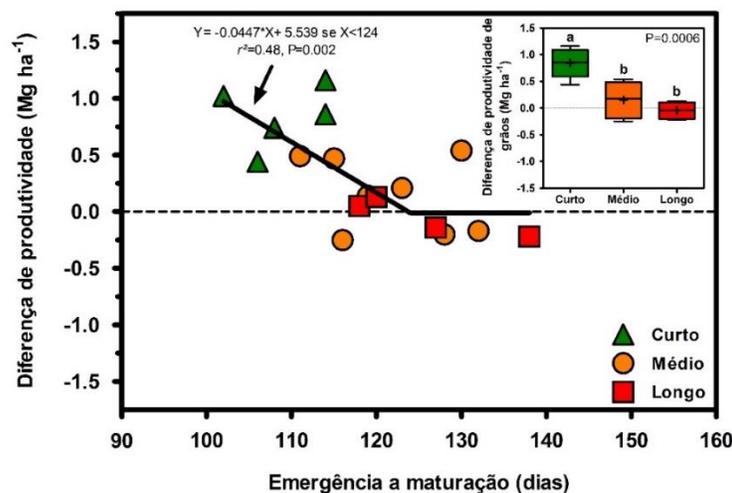
354 3.2. *Lacuna-N e os efeitos na produtividade de grãos por duração de ciclo*

355

356 A análise de variância revelou um efeito significativo para a interação GM x N ($P < 0.001$)
 357 (Tabela 2). Assim sendo, avaliamos o efeito da interação em cada grupo de GM. Não houve
 358 diferença na produtividade do tratamento zero-N entre os três grupos ($P = 0.56$; Tabela
 359 suplementar S1), evidenciando que a diferença não se deve a divisão dos grupos ($P < 0.08$) na
 360 ANOVA (Tabela 2).

361 O grupo curto foi o que mais respondeu ao tratamento sem limitação de nitrogênio (N-
 362 completo), se diferenciando dos demais (Figura 3, inserido), com diferença média de produtividade
 363 (18.5%; 850 kg ha⁻¹; $P = 0.002$) superior ao tratamento zero-N (Tabela 2) e todos os cinco
 364 pontos de dados aumentaram sua produtividade quando fertilizados (Figura 3). O grupo médio
 365 apresentou uma lacuna-N de produtividade (3.5%; 150 kg ha⁻¹; $P = 0.23$) entre o tratamento (N-
 366 completo menos zero-N) (Tabela 2), 5/8 dos pontos de dados responderam a fertilização
 367 (Figura 3). A diferença de produtividade entre os tratamentos de N para o grupo longo foi (0.5%;
 368 50 kg ha⁻¹; $P = 0.59$) a mais para o zero-N comparado ao N-completo (Tabela 2), apenas 2/4 dos
 369 pontos de dados responderam a fertilização, tendo a menor diferença de produtividade entre os
 370 grupos (Figura 3). O grupo médio e o longo não apresentaram diferença entre ambos (Figura 3,
 371 inserido). A diferença de produtividade do tratamento N-completo em relação ao zero-N, reduz
 372 em 44.7 kg ha⁻¹ dia⁻¹ para duração do ciclo (<124 dias), após sem diferença, ou seja, não houve
 373 limitação de N no tratamento zero-N (Figura 3).

374



375

376 **Figura 3.** Diferença de produtividade de grãos entre os tratamentos N-completo e zero-N em
 377 relação aos dias de ciclo para os 17 ambientes (ponto de dados). Cada ponto de dados
 378 representa a produtividade média para uma determinada data de semeadura x GM x

379 tratamento de N × local × ano. Parâmetros da regressão linear ajustada (linha sólida),
380 coeficiente de determinação (r^2) e significância são mostrados. O conjunto de dados foi
381 separado em três grupos: Curto (símbolos verdes), Médio (símbolos laranja) e Longo (símbolos
382 vermelhos). O gráfico inserido de caixa representa a diferença no rendimento entre os
383 tratamentos N-completo menos zero-N para os grupos. As caixas delimitam os percentis 25 e
384 75, enquanto os bigodes representam os percentis 90 e 10. Mediana (linha horizontal), $Y=0$
385 (linha tracejada) e média (+) são mostrados. Significância estatística do teste Tukey ao nível
386 ($p<0.05$).

387

388 *3.3 Acumulado de matéria seca e taxa de crescimento por grupos de maturação*

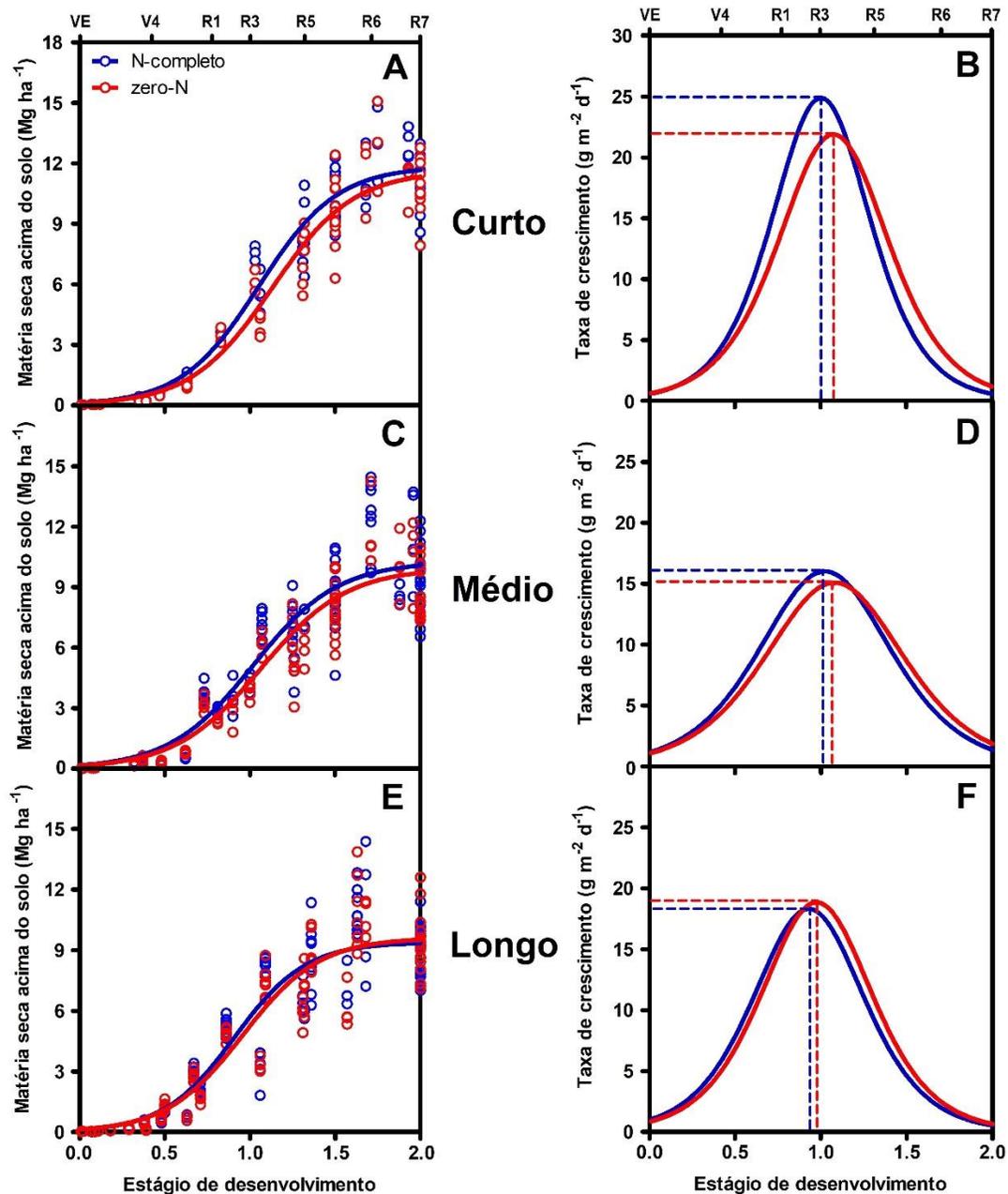
389

390 A MSS seguiu padrão sigmoidal (Figura 4 A, C e E), o ponto de inflexão sigmoidal
391 equivale aproximadamente ao estágio R3, assim sendo, com um valor DS de aprox. 1.0, ficando
392 mais evidente e de modo mais preciso nas figuras da TC (Figura 4 B, D e F). As curvas dos
393 tratamentos N-completo comparado ao zero-N da MSS do grupo curto começam visivelmente a
394 se distanciar no estágio V7, para o grupo médio a partir de R1 e já para o grupo longo as curvas
395 se distanciam apenas entre R1 e R4 (Figura 4 A, C e E) no momento em que o tratamento sem
396 limitação fica acima do zero-N. Se compararmos as curvas de MSS do tratamento zero-N dos
397 três grupos, notamos que o grupo curto apresenta os maiores valores no estágio R7 (Tabela 2;
398 Figura 4 A, C e E) diferenciando-se dos demais grupos ($P=0.034$; Tabela suplementar S1). O
399 GM curto apresentou os maiores MSS no estágio R7 dentre os grupos quando contrastamos os
400 tratamentos (N-completo com o zero-N) com diferença de (2.8%; 11.0 versus 10.7 Mg ha⁻¹,
401 respectivamente). A maior diferença entre os tratamentos encontramos no GM médio, onde o
402 tratamento sem limitação de N produziu mais que o zero-N (5.7%; 9.3 versus 8.8 Mg ha⁻¹,
403 respectivamente). Entretanto, para o grupo longo, o tratamento zero-N produziu mais (4%; 9.7
404 versus 9.3 Mg ha⁻¹) que o N-completo (Figura 4 A, C e E).

405 A TC máxima do tratamento zero-N não se diferenciou entre os grupos de GM ($P=0.16$;
406 Tabela suplementar S1), ou seja, os grupos de GM quando expostos a campos sem
407 fornecimento amplo de nitrogênio apresentam semelhantes TC máximas. Diante disto, a
408 diferença encontrada entre o N-completo e zero-N deve-se ao potencial de resposta de cada
409 grupo a fertilização com N. A TC máxima do grupo curto foi maior no N-completo do que no
410 zero-N (25,1 versus 22,1 g m⁻² d⁻¹; $P=0.001$), tendo o estágio (em DS) o pico máximo
411 antecipado para o N-completo (N-completo e zero-N, respectivamente, DS=1.03 contra
412 DS=1.12; $P=0.02$) (Figura 4B). A TC máxima do grupo médio foi (16,2 versus 15,4 g m⁻² d⁻¹;

413 $P=0.187$; Figura 4D), e do longo (18,5 versus 19 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$; $P=0.75$; Figura 5F) com o
414 tratamento N-completo versus zero-N, respectivamente. Nos demais grupos, os picos e os
415 estágios não diferiram entre os tratamentos N. Nota-se que a TC de modo geral para o grupo
416 curto e médio decrescem substancialmente após o estágio R3, e que no estágio R4 a curva que
417 representa o tratamento zero-N fica acima da curva do N-completo (Figura 4 B e D) e seguem
418 se distanciando até a maturação. No GM longo o decréscimo da TC ocorre também após o
419 estágio R3, porém, a curva do zero-N é constantemente superior a curva do N-completo até a
420 maturação (Figura 4F).

421 Em média, a TC entre o estágio V4-R3 foi superior para o tratamento N-completo
422 contrastado ao zero-N em 21% GM curto, 14% no GM médio e 10% no GM longo. Essas
423 diferenças entre os tratamentos de N nos GM afetou os acumulados de MSS no estágio R3 dos
424 três grupos. Deste modo, incrementando o acúmulo de MSS no grupo curto em (1080 kg ha^{-1} ;
425 $P=0.013$), médio (610 kg ha^{-1} ; $P=0.002$) e no longo (560 kg ha^{-1} ; $P=0.017$) quando contrastamos
426 o tratamento com amplo fornecimento de N para a cultura com o zero-N.



427

428 **Figura 4.** (A, C, E) Matéria seca acima do solo (MSS) e taxa de crescimento diário da cultura
 429 (TC) mostrada em (B, D, F), ambos em função do estágio de desenvolvimento (DS). (A, B)
 430 representa o grupo Curto; (C, D) Médio; (E, F) Longo. Símbolos azuis (N-completo) e vermelhos
 431 (zero-N). Os estágios Vn e Rn baseados em Fehr & Caviness (1977) são mostrados no eixo
 432 superior. As linhas azuis e vermelhas sólidas da MSS representam o ajuste da Equação 1 e sua
 433 derivada diária representa o (TC) para o tratamento N-completo e zero-N, calculado a partir de
 434 dados agrupados entre ambientes pertencentes ao mesmo grupo de GM. O coeficiente de
 435 determinação dos modelos ajustados > 0.89.

436

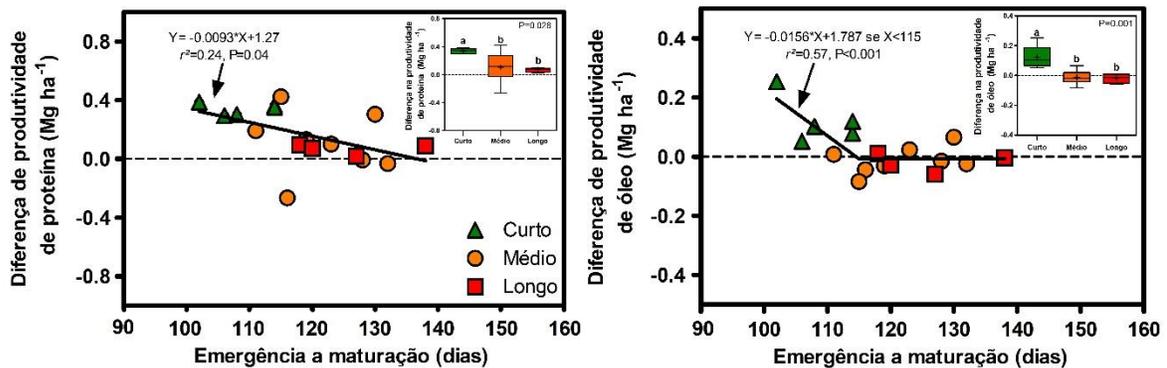
437 *3.4 Os impactos da limitação de N na concentração e produtividade de proteína e óleo da soja*
438 *por duração do ciclo*

439

440 A concentração de proteína foi influenciada pelo tratamento de N ($P=0.002$), bem como,
441 a concentração de óleo ($P=0.027$) (Tabela 2). Porém, de forma oposta, em média os ambientes
442 aumentaram a proteína 1.2 % (ou seja, 36.4 versus 35.2) e reduziram o óleo em 0.6 % (ou seja,
443 16.1 versus 16.7) comparando o tratamento N-completo menos zero-N. A interação entre o
444 tratamento de N e GM também não se diferiu para concentração de proteína ($P=0.46$; Tabela
445 2), contudo observa-se uma tendência dos grupos longos em responder a fertilização com N
446 aumentando a concentração no grão. O impacto negativo da fertilização com N na
447 concentração de óleo é levemente atenuado no grupo longo, mas sem diferença ($P=0.61$;
448 Tabela 2).

449 A produtividade de proteína foi estreitamente relacionada ao tratamento de N
450 ($P<0.0001$), produzindo em média (10.5%; 170 kg ha⁻¹) mais no N-completo do que no zero-N.
451 Por sua vez, a produtividade de óleo foi afetada pelo GM ($P=0.04$), onde o grupo curto detém os
452 maiores valores médios (Tabela 2). Houve interação entre o tratamento de N e GM, impactando
453 a produtividade de proteína ($P=0.015$; Tabela 2) e óleo ($P=0.003$). O grupo curto apresentou a
454 maior diferença na produtividade de proteína entre os tratamentos N-completo versus zero-N
455 (21%; Figura 5A). Para o grupo médio os tratamentos de N não se diferiram (Tabela 2 e Figura
456 5A inserido), no entanto, o grupo longo exibiu diferença entre os tratamentos de N (4.6%; 70 kg
457 ha⁻¹; Tabela 2). Para a diferença de produtividade de óleo entre os grupos afetados pela
458 fertilização de N, apenas o grupo curto exibiu lacuna entre os tratamentos de N (14.5%; 120 kg
459 ha⁻¹; Tabela 2), sendo maior para o N-completo que o zero-N, se distinguindo do grupo médio e
460 longo que entre eles não se diferenciaram (Figura 5B inserido). A diferença de produtividade de
461 proteína (tratamento, N-completo menos zero-N) é reduzida em 9.3 kg ha⁻¹ dia⁻¹ (Figura 5A) e a
462 de óleo em 15.6 kg ha⁻¹ dia⁻¹ para duração do ciclo entre 102 a 115 dias, duração (>115 dias)
463 diferença nula (Figura 5B).

464



465

466 **Figura 5.** Diferença de produtividade de proteína (A) e óleo (B) entre os tratamentos N-
 467 completo e zero-N em relação aos dias de ciclo para os 17 ambientes (ponto de dados). Cada
 468 ponto de dados representa o rendimento médio para uma determinada data de semeadura x
 469 GM x tratamento de N x local x ano. Parâmetros da regressão ajustada (linha sólida),
 470 coeficiente de determinação (r^2) e significância são mostrados. O conjunto de dados foi
 471 separado em três grupos: Curto (símbolos verdes), Médio (símbolos laranja) e Longo (símbolos
 472 vermelhos). Os gráficos inseridos de caixa representam a diferença na produtividade de
 473 proteína (A inserido) e óleo (B inserido) entre os tratamentos N-completo menos zero-N para os
 474 grupos. As caixas delimitam os percentis 25 e 75, enquanto os bigodes representam os
 475 percentis 90 e 10. Mediana (linha horizontal), $Y=0$ (linha tracejada) e média (+) são mostrados.
 476 Significância estatística do teste Tukey ($p < 0.05$).

477

478 4. Discussão

479

480 Para soja de alta produtividade encontramos uma lacuna-N, em que o fornecimento
 481 combinado da fixação biológica e do N mineralizado do solo não conseguiram suprir a demanda
 482 de nitrogênio da cultura, com lacuna-N média dos ambientes de 7%, ou seja, a diferença da
 483 produtividade de grãos do tratamento sem limitação de N menos zero-N, ficando entre os
 484 valores de Ambrosini et al. (2019) no Estado Paraná (4.6%) e em Nebraska (12%) por Cafaro
 485 La Menza et al. (2019). Para avaliarmos a existência da lacuna-N, seguimos um protocolo
 486 baseado na demanda de N da cultura de acordo com o potencial dos ambientes simulados,
 487 sincronizando o fornecimento do nutriente com a demanda de N e a fenologia da cultura,
 488 realizando aplicações fracionadas correspondente ao padrão sazonal na dinâmica de absorção
 489 de N (tratamento, N-completo) comparado ao manejo do produtor do Sul do Brasil (tratamento,
 490 zero-N), em um conjunto de 17 ambientes na condição potencial para garantir que apenas os

491 objetivos do estudos prevalecessem. Nosso conjunto de ambientes tem um amplo PP variando
492 de 2.7 a 7.0 Mg ha⁻¹, composto por GM (5.0 a 6.8) e duração do ciclo (102 a 138 dias), o qual
493 propiciou avaliar o efeito da lacuna-N na produtividade de grãos por duração do ciclo.

494 O GM curto apresentou a maior lacuna-N entre os grupos (850 kg ha⁻¹; Tabela 2 e Figura
495 3, inserido), visto seu maior potencial produtivo corroborando com (Zanon et al., 2016; Zdziarski
496 et al., 2018; Tagliapietra et al., 2021). A maior lacuna-N pode estar relacionada a maior taxa de
497 absorção de N (Santachiara et al., 2017b), com menor eficiência do uso de N (Santachiara et
498 al., 2017a), a qual o tratamento zero-N não supriu a alta exigência, ocasionando uma lacuna
499 temporal e espacial entre a demanda e o fornecimento de N para a planta. Já, o GM médio
500 apresentou a maior magnitude de diferença de produtividade dos tratamentos de N entre os
501 grupos (Figura 3, inserido), estando negativamente associada ao fornecimento de NS,
502 corroborando os resultados de Cafaro La Menza et al. (2019), ou seja, a grande variação no
503 fornecimento de NS (72 – 155 kg N ha⁻¹, Tabela 1) refletiu na variação da diferença entre
504 tratamentos de N, reduzindo a diferença de produtividade em 8.6 kg ha⁻¹ por cada kg ha⁻¹ de N
505 adicional do solo, em que a estreita diferença de ciclo (<8 dias) entre os ambientes do GM
506 médio não afetou a regressão (Figura suplementar S2). Para o GM curto e longo, a baixa
507 variabilidade no fornecimento de NS (103 – 155 kg N ha⁻¹, Tabela 1) inviabilizou a tentativa de
508 relacionar o NS com a diferença de produtividade entre tratamentos de N. Há diferença na
509 dinâmica de absorção de N (fenologia e demanda) entre a soja e o milho, bem como, seus
510 sistemas radiculares (Giller, 2001), dado que, foi utilizado a parcela de milho com omissão de N
511 para mensurar o NS através do acúmulo de N no milho, seguindo protocolo de Cafaro La
512 Menza et al. (2019). Os resultados indicam que o grau de limitação de nitrogênio está
513 negativamente associado a duração do ciclo (até 124 dias), após 124 dias não ocorreu limitação
514 no fornecimento de N (Figura 3), ou seja, o tratamento zero-N (padrão dos produtores) quando
515 comparado a um manejo com amplo N para soja, não diferiu, apontando que as fontes de NS e
516 FBN atenderam a demanda de N da soja.

517 Observa-se uma maior sensibilidade do GM curto quando exposto a uma condição
518 limitante de N. Pois com um amplo fornecimento de N incrementou a produtividade de grãos,
519 consistentemente ocorreu um aumento na produtividade de proteína e óleo nos tratamentos N-
520 completo contrastados zero-N (Figura 5A e B; Tabela 2). O ganho de produtividade do GM curto
521 em condições não limitantes de N foi associado a maior diferença entre o tratamento N-
522 completo menos zero-N, (24.5%; Figura 4A) na MSS no estágio R3, ocasionando TC máxima
523 superiores no tratamento N-completo (3 g m⁻² d⁻¹; Figura 4B), o qual provavelmente refletiu no
524 incremento da massa do grão, número de grão e legumes (Tabela 2) comparado ao zero-N

525 (Tabela 2). Para o GM médio, nota-se um incremento na massa do grão em condições não
526 limitantes de N versus zero-N e, principalmente, na produção de MSS no estágio R3 (+600 kg
527 ha⁻¹ de MSS), estes ganhos contribuíram para os efeitos da lacuna-N na produção de grãos ser
528 próximo a 3.5% (Tabela 2). O GM longo quando fertilizado com N, aumentou a produtividade de
529 proteína (Tabela 2), com ausência de efeito da lacuna-N na produtividade de grãos. De mesmo
530 modo, não houve impacto no crescimento da soja se compararmos o tratamento zero-N versus
531 N-completo, indicando que o tratamento zero-N conseguiu suprir a exigência de N. De acordo
532 com Patterson & La Rue (1983) a contribuição da FBN é maior em genótipos de maior ciclo.

533 Analisamos a MSS no estágio R3, pois é nele que ocorre a maior diferença entre os
534 tratamentos de N, devido coincidir com o pico máximo da TC dos três GM (Figura 4 B, D e F).
535 Os acumulados de MSS em R3 foram superiores aos encontrados por Córdova et al. (2019) e
536 Cafaro La Menza et al. (2020) independente do GM com tratamento N-completo. Dentre os GM,
537 o longo apresentou as maiores médias de MSS no estágio R3, podendo estar relacionado ao
538 maior acumulado de MSS na fase vegetativa das cultivares tardias em relação as precoces,
539 devido a maior duração dessa fase (Egli, 1993; Jiang & Egli, 1995; Zanon et al., 2015). O grupo
540 curto apresentou a maior MSS no estágio R7 entre os grupos de GM, com acumulados
541 superiores aos de Ortez et al. (2018) e Córdova et al. (2019), mas inferiores aos de Cafaro La
542 Menza et al. (2019, 2020). Nossos resultados do GM curto para a dinâmica de crescimento da
543 MSS (Figura 4A) e diferença de produtividade (Figura 3, inserido) vão ao encontro aos achados
544 de Gaspar et al. (2017), que as produtividades estão relacionadas positivamente a maiores
545 MSS na maturação e ainda mais associado a MSS acumulada (entre, enchimento do grão e a
546 maturação), contribuindo assim para produzir mais legumes por área (Tabela 2).

547 As TC máximas do GM médio e longo dos tratamentos de N foram semelhantes
548 comparado com máximas encontradas por (Gaspar et al., 2017; Córdova et al., 2019; Bender et
549 al., 2015). Em contraste, as TC máximas do GM curto foram superiores a ambas, tal como, o
550 estágio que ocorreu o pico da TC foi antecipado para nossos três GM comparado ao das
551 referências citadas (R3 versus R4-R5, respectivamente). Há uma fase de latência na TC que
552 dura até um pouco antes de V4, após a TC aumenta com a segunda aplicação de N do
553 tratamento N-completo (ver seção 2.2) e as curvas dos tratamentos de N iniciam a se afastar,
554 com TC (N-completo acima do tratamento zero-N) o impacto da limitação de N na TC foi maior
555 quanto menor a duração do ciclo até atingir o pico máximo da TC (Figura 4 B, D e F). A
556 magnitude da diferença entre a TC dos tratamentos (N-completo menos zero-N), provavelmente
557 esteja relacionada a disponibilidade de N, pois de acordo com Tolley-Henry & Raper (1986) e

558 Chaudhary et al. (2008) a disponibilidade afeta a taxa fotossintética assim refletindo na TC e
559 seus componentes, a interceptação e a eficiência do uso da radiação solar.

560 A fertilização de N em relação ao tratamento zero-N incrementou a concentração de
561 proteína e reduziu a de óleo para todos os GM, porém a conhecida e frequente associação
562 altamente negativa da proteína com o óleo do grão foi diferente entre os GM. Quanto menor a
563 duração do ciclo, maior o efeito da relação negativa “troca” (Tabela 2). Para o GM longo a
564 relação foi positiva aumentando consistentemente a proteína ($37.5/35.6=1.052$) e reduzindo
565 insignificamente o óleo ($16.1/16.3= 0.99$) para o tratamento N-completo versus zero-N. Essa
566 tendência de responder a fertilização com N, atribui-se a um provável alto custo de carbono no
567 processo de fixação (Andrews et al., 2009), capaz de penalizar estes dois constituintes do grão
568 pelo déficit de N relatado por Tamagno et al. (2018). Divergindo da relação negativa
569 normalmente encontrada (Chung et al., 2003; Tamagno et al., 2018), contudo confere com a
570 ausência de relação de troca entre esses constituintes do grão (Cafaro La Menza et al., 2019).
571 A performance dos componentes de produção, produtividade de grãos, proteína e óleo, MSS
572 estágio R3 e TC máxima, concentração de proteína e óleo do tratamento zero-N não se
573 diferenciou entre os GMs (Tabela suplementar S1), evidenciando que os efeitos da lacuna-N na
574 soja de curta duração foram associados a imposição de um limite inferior ao potencial de
575 crescimento da cultura pelo tratamento zero-N, ou seja, pela FBN e o NS.

576 Compreendemos que a quantidade de fertilizante N aplicada no estudo não é
577 sustentável (sem viabilidade ambiental e econômica), todavia o protocolo nos permitiu fornecer
578 N acima da capacidade da FBN e NS juntas, fornecendo N em condições não limitantes para
579 altos potenciais produtivos de soja, viabilizando testar nossa hipótese. Finalmente, nossos
580 resultados indicam que uma curta duração do ciclo da soja propicia uma maior lacuna-N em
581 ambientes de alto PP com fornecimento moderado de NS. Os nossos resultados contemplam a
582 maior parte das áreas cultivadas com soja no Brasil, Argentina e Paraguai, que utilizam a
583 mesma faixa de duração de ciclo do estudo, e busca atender perspectivas futuras, diante de
584 dois prováveis cenários: (i) tendência de intensificar o sistema produtivo com possibilidade de
585 realizar mais safras por ano (van Ittersum et al., 2016; Cassman & Grassini, 2020) e alcançar
586 maiores produtividades com a utilização de cultivares de menor duração do ciclo (Tagliapietra et
587 al., 2021), (ii) expansão de cultivo em áreas degradadas de pastagem arenosas com baixo
588 fornecimento de N (Cordeiro & Echer, 2019). À vista disso, pesquisas futuras devem convergir
589 em busca de formas sustentáveis para suprir a lacuna-N da soja de curta duração de ciclo, pois
590 em circunstância oposta, cada vez mais nos defrontaremos com campos de soja em condições
591 limitantes de N. Assim, sugerimos alguns possíveis caminhos: incrementar NS com uso de

592 plantas de cobertura pré-soja, aumentar a contribuição da FBN com coinoculação, fertilização
 593 mineral, provavelmente necessite realizar associações entre as alternativas. O nitrogênio, caso
 594 não seja, provavelmente será um dos fatores mais limitantes para a produtividade da soja
 595 (Cafaro La Menza et al., 2017), principalmente com curta duração de ciclo, motivado pela
 596 necessidade continua de incrementar as produtividades médias (Mueller et al., 2012) para
 597 garantir a segurança alimentar (Fischer & Connor, 2018).

598

599 **5. Conclusão**

600

601 O estudo investigou os efeitos da limitação de nitrogênio para uma ampla faixa de
 602 duração de ciclo da soja e PP em campos de alta produtividade no Sul do Brasil. Nossos
 603 resultados apontam para uma maior lacuna-N na produtividade de grãos conforme reduz a
 604 duração do ciclo da cultura. A lacuna-N na produtividade de grãos no GM médio foi associada
 605 ao fornecimento de N do solo. Não há lacuna-N na produtividade de grãos no GM longo,
 606 revelando que a combinação (FBN e NS) atendeu a demanda de N.

607 A limitação de N tem relação direta com a magnitude do incremento da MSS no início da
 608 formação do legume, comparando o tratamento não limitante de N ao zero-N. O incremento foi
 609 inversamente associado ao ciclo, ou seja, menores ciclos maiores incrementos, refletindo em
 610 maiores TC máximas, massa do grão, número de grão e legumes, além de maiores
 611 produtividades de proteína e óleo, indicando que o tratamento zero-N não suportou fornecer N
 612 para as altas TC. O tratamento zero-N penalizou a concentração de proteína do grão, portanto a
 613 fertilização de N permitiu ganhos na concentração de proteína sem reduzir a concentração de
 614 óleo, os ganhos foram maiores para ciclos mais longos.

615

616 **Referências**

617

- 618 Alliprandini, L. F., Abatti, C., Bertagnolli, P. F., Cavassim, J. E., Gabe, H. L., Kurek, A., Matsumoto, M., N,
 619 Oliveira, M. A. R., Pintol, C., Prado, L. C., Steckling, C., 2009. Understanding soybean maturity groups
 620 in brazil: environment, cultivar classification and stability. *Crop Science*, 49, 801-808.
 621
- 622 Ambrosini, V. G., Fontoura, S. M. V., de Moraes, R. P., Carciochi, W., Ciampitti, I. A., Bayer, C., 2019.
 623 Assessing nitrogen limitation in inoculated soybean in Southern Brazil. *Agrosystems, Geosciences &*
 624 *Environment*, 190016, 1-6. <https://doi.org/10.2134/age2019.03.0016>
 625
- 626 Andrews, M., Lea, P.J., Raven, J.A., Azevedo, R.A., 2009. Nitrogen use efficiency. 3. Nitrogen fixation:
 627 Genes and costs. *Ann. Appl. Biol.* 155:1–13. doi:10.1111/j.1744-7348.2009.00338.x
 628
- 629 Bange, M. P., Hammer, G. L., Rickert, K. G., 1997. Environmental control of potential yield of sunflower in
 630 the subtropics. *Australian Journal of Agricultural Research*, 48, 231–240.

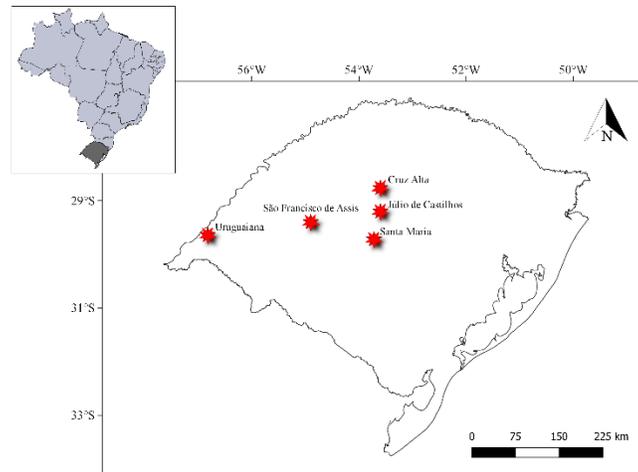
- 631
632 Barraclough, P. B., Howarth, J. R., Jones, J., Lopez-Bellido, R., Parmar, S., Shepherd, C. E., Hawkesford,
633 M. J., 2010. Nitrogen efficiency of wheat: genotypic and environmental variation and prospects for
634 improvement. *European Journal of Agronomy*, 33(1), 1-11.
635
- 636 Battisti, R., Sentelhas, P. C., Pascoalino, J. A. L., Sako, H., Dantas, J. P. S., Moraes, M. F., 2018.
637 Soybean yield gap in the areas of yield contest in Brazil. *International Journal of Plant Production*, 12,
638 159– 168. <https://doi.org/10.1007/s42106-018-0016-0>
639
- 640 Bender, R. R., Haegele, J. W., Ruffo, M. L., Below, F. E., 2013. Nutrient uptake, partitioning, and
641 remobilization in modern, transgenic insect-protected maize hybrids. *Agronomy Journal*, 105(1), 161-
642 170.
643 Bender, R. R., Haegele, J. W., Below, F. E., 2015. Nutrient uptake, partitioning: and remobilization in
644 modern soybean varieties. *Agronomy Journal*, 107, 563–573.
645
- 646 Bligh, E.G., Dyer, W. J., 1959. A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian Journal of*
647 *Biochemistry and Physiology*, 37(8), 911-917.
648
- 649 Boote, K. J., Mínguez, M. I., Sau, F., 2002. Adapting the CROPGRO legume model to simulate growth of
650 faba bean. *Agronomy Journal*, 94, 743-756.
651
- 652 Cafaro La Menza, N., Monzon, J. P., Specht, J. E., Grassini, P., 2017. Is soybean yield limited by nitrogen
653 supply?. *Field Crops Research*, 213, 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.08.009>
654
- 655 Cafaro La Menza, N., Monzon, J. P., Specht, J. E., Lindquist, J. L., Arkebauer, T. J., Graef, G., Grassini,
656 P., 2019. Nitrogen limitation in high-yield soybean: Seed yield, N accumulation, and N use efficiency.
657 *Field Crops Research*, v. 237, p. 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.009>
658
- 659 Cafaro La Menza, N., Monzon, J. P., Lindquist, J. L., Arkebauer, T. J., Knops, J. M., Unkovich, M., Specht,
660 J. E., Grassini, P., 2020. Insufficient nitrogen supply from symbiotic fixation reduces seasonal crop
661 growth and nitrogen mobilization to seed in highly productive soybean crops. *Planta, Cell &*
662 *environment*, 43, 8, 1-15. <https://doi.org/10.1111/pce.13804>
663
- 664 Cassman, K. G., Dobermann, A., Walters, D. T., Yang, H., 2003. Meeting cereal demand while protecting
665 natural resources and improving environmental quality. *Annual Review of Environment and Resources*,
666 28, 315-358. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.040202.122858>
667
- 668 Cassman, K. G., GRASSINI, P., 2020. A global perspective on sustainable intensification research. *Nature*
669 *Sustainability*, 3, 262-268.
670
- 671 Chaudhary, M.I., Adu-Gyamfi, J.J., Saneoka, H., Nguyen, N.T., Suwa, R., Kanai, S., ElShemy, H.A.,
672 Lightfoot, D.A., Fujita, K., 2008. The effect of phosphorus deficiency on nutrient uptake, nitrogen
673 fixation and photosynthetic rate in mashbean, mungbean and soybean. *Acta Physiol. Plant.* 30, 537-
674 544. <https://doi.org/10.1007/s11738-008-0152-8>
675
- 676 Chung, J., Babka, H. L., Graef, G. L., Staswick, P. E., Lee, D. J., Cregan, P. B., Shoemaker, R. C.,
677 Specht, J. E., 2003. The seed protein, oil, and yield QTL on soybean linkage group I. *Crop Science*,
678 43, 1053–1067.
679
- 680 Ciampitti, I. A., Salvagiotti, F., 2018. New insights into soybean biological nitrogen fixation. *Agronomy*
681 *Journal*, 110, 1185–1196.
682
- 683 Corassa, G. M., Amado, T. J., Strieder, M. L., Schwalbert, R., Pires, J. L., Carter, P. R., Ciampitti, I. A.,
684 2018. Optimum soybean seeding rates by yield environment in southern Brazil. *Agronomy*
685 *Journal*. 110: 2430– 2438. doi: <https://doi.org/10.2134/agronj2018.04.0239>
686

- 687 Cordeiro, C. F. S., Echer, F. R., 2019. Interactive effects of nitrogen-fixing bacteria inoculation and
 688 nitrogen fertilization on soybean yield in unfavorable edaphoclimatic environments. *Scientific Reports*,
 689 9, 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52131-7>
 690
- 691 Córdova, S. C., Castellano, M. J., Dietzel, R., Licht, M. A., Togliatti, K., Martinez-Feria, R., Archontoulis, S.
 692 V., 2019. Soybean nitrogen fixation dynamics in Iowa, USA. *Field Crops Research*, 236, 165-176.
 693 <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.03.018>
 694
- 695 Córdova, S. C., Archontoulis, S. V., Licht, M. A., 2020. Soybean profitability and yield component
 696 response to nitrogen fertilizer in Iowa. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 3, e20092, 2020.
 697
- 698 CQFS-RS/SC, 2016. Manual de Calagem e Adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa
 699 Catarina. (Liming and Fertilizing Manual for Rio Grande do Sul and Santa Catarina States). Núcleo
 700 Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Frederico Westphalen.
 701
- 702 Egli, D.B., 1993. Cultivar maturity and potential yield of soybean. *Field Crops Res.* 32, 147-158.
 703 doi:10.1016/0378-4290(93)90027-K
 704
- 705 Embrapa, 2013. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. rev. ampl. Brasília.
 706
- 707 Evans, L.T., 1993. *Crop Evolution, adaptation and yield*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
 708
- 709 Evans, L. T., Fischer, R. A., 1999. Yield Potential. *Crop Science*, 39 (6), 1544-
 710 1551. doi:10.2135/cropsci1999.3961544x
 711
- 712 Fehr, W. R., Caviness, C.E., 1977. *Stages of Soybean Development*. Iowa Agriculture and Home
 713 Economics Experiment Station, Iowa State University, Ames. 87. Disponível em:
 714 <<http://lib.dr.iastate.edu/specialreports/> 87>. Acesso em: 20 de mai. de 2021.
 715
- 716 Fischer, R. A., Connor, D.J., 2018. Issues for cropping and agricultural science in the next 20 years. *Field*
 717 *Crops Research*, 222, 121-142. doi:10.1016/j.fcr.2018.03.008
 718
- 719 France, J., Thornley, J. H., 1984. *Mathematical models in agriculture*. London, UK: Butterworths.
 720
- 721 Gaspar, A. P., Laboski, C. A., Naeve, S. L., Conley, S. P., 2017. Dry matter and nitrogen uptake,
 722 partitioning, and removal across a wide range of soybean seed yield levels. *Crop Science*, 57(4), 2170-
 723 2182.
 724
- 725 Giller, K.E., 2001. Assessment of the role of N₂-fixation. *Nitrogen Fixation in Tropical Cropping Systems*,
 726 2nd eds. CAB International, Wallingford.
 727
- 728 Giller, K.E., Cadisch, G., 1995. Future benefits from biological nitrogen fixation: an ecological approach to
 729 agriculture. In *Management of Biological Nitrogen Fixation for the Development of More Productive and*
 730 *Sustainable Agricultural Systems*. Springer, Netherlands, 255-277.
 731
- 732 Grassini, P., van Bussel, L. G., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., Boogaard, H., Groot, H.,
 733 van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., 2015. How good is good enough? Data requirements for reliable
 734 crop yield simulations and yield-gap analysis. *Field Crops Research*, 177, 49-63.
 735
- 736 Grassini, P., Specht, J., Tollenaar, T., Ciampitti, I., Cassman, K.G., 2014a. High-yield maize-soybean
 737 cropping systems in the U.S. Corn Belt. In: Sadras, V.O., Calderini, D.F. (Eds.), *Crop Physiology—*
 738 *Applications for Genetic Improvement and Agronomy*, 2nd edition. Elsevier, The Netherlands.
 739
- 740 Grassini, P., Torrión, J.A., Cassman, K.G., Yang, H.S., Specht, J.E., 2014b. Drivers of spatial and
 741 temporal variation in soybean yield and irrigation requirements in the western US Corn Belt. *Field*
 742 *Crops Res.* 163, 32-46.

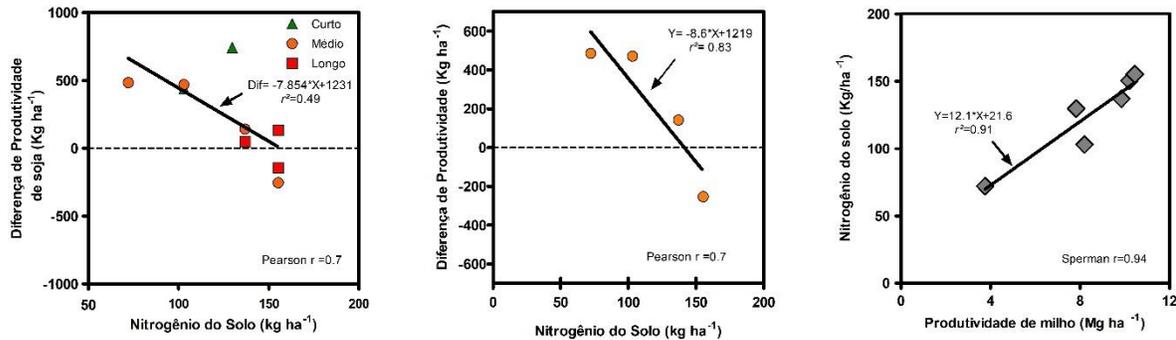
- 743
744 Heatherly, L. G., 2005. Midsouthern USA soybean yield affected by maturity group and planting
745 date. *Crop Management*, 4(1), 1-8.
746
- 747 Janssen, B. H., Guiking, F. C. T., van der Eijk, D., Smaling, E. M., Wolf, J., & van Reuler, H., 1990. A
748 system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma* 46, 299-318.
749
- 750 Jiang, H., Egli, D.B., 1995. Soybean seed number and crop growth rate during flowering. *Agron. J.* 87, 264-
751 267. doi:10.2134/agronj.1995.00021962008700020020x
752
- 753 Kassam, A., Friedrich, T., Derpsch, R., 2018. Global spread of conservation agriculture. *International*
754 *Journal of Environmental Studies*. 76, 29–51.
755
- 756 Lindquist, J. L., Arkebauer, T. J., Walters, D. T., Cassman, K. G., Dobermann, A., 2005. Maize radiation
757 use efficiency under optimal growth conditions. *Agronomy Journal*, 97, 72-78.
758
- 759 McKenzie, H. A., Wallace, H. S., 1953. The Kjeldahl determination of nitrogen: a critical study of digestion
760 conditions-temperature, catalyst, and oxidizing agent. *Aust J Chem* 7, 55-70.
761
- 762 Merlos, F. A., Monzon, J. P., Mercau, J. L., Taboada, M., Andrade, F. H., Hall, A. J., Jobbagy, E.,
763 Cassman, K. G., Grassini, P., 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure
764 of existing yield gaps. *Field Crops Research*, 184, 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.001>
765
- 766 Moore, K. J., Dixon, P. M., 2015. Analysis of combined experiments revisited. *Agronomy Journal*, 107,
767 763-771.
768
- 769 Mueller, N. D., Gerber, J. S., Johnston, M., Ray, D. K., Ramankutty, N., Foley, J. A., 2012. Closing yield
770 gaps through nutrient and water management. *Nature*, 490 (7419), 254–257.
771 doi:<https://doi.org/10.1038/nature11420>
772
- 773 Ortel, C. C., Roberts, T. L., Hoegenauer, K. A., Purcell, L. C., Slaton, N. A., Gbur, E. E., 2020. Soybean
774 maturity group and planting date influence grain yield and nitrogen dynamics. *Agrosystems, Geo-*
775 *sciences & Environment*, 3, e20077. <https://doi.org/10.1002/agg2.20077>
776
- 777 Ortez, O. A., Salvagiotti, F., Enrico, J. M., Prasad, P. V., Armstrong, P., Ciampitti, I. A., 2018. Exploring
778 nitrogen limitation for historical and modern soybean genotypes. *Agronomy Journal*, 110, 2080-2090.
779 doi:10.2134/ agronj2018.04.0271
780
- 781 Ortez, O. A., Tamagno, S., Salvagiotti, F., Prasad, P. V., Ciampitti, I. A., 2019. Soybean nitrogen sources
782 and demand during the seed-filling period. *Agronomy Journal*, 111(4), 1779-1787.
783
- 784 Patterson, T. G., La Rue, T. A., 1983. N₂ Fixation (C₂H₂) and Ureide Content of Soybeans:
785 Environmental Effects and Source-Sink Manipulations. *Crop Science*, 23 (5), 819-824.
786
- 787 Salvagiotti, F., Cassman, K. G., Specht, J. E., Walters, D. T., Weiss, A., Dobermann, A., 2008. Nitrogen
788 uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research*, 65, 137-149.
789 doi:10.1016/j.fcr.2008.03.001
790
- 791 Santachiara, G., Borrás, L., Salvagiotti, F., Gerde, J. A., Rotundo, J. L., 2017. Relative importance of
792 biological nitrogen fixation and mineral uptake in high yielding soybean cultivars. *Plant Soil*, 418, 191-
793 203.
794
- 795 Santachiara, G., Borrás, L., Rotundo, J. L., 2017. Physiological Processes Leading to Similar Yield in
796 Contrasting Soybean Maturity Groups. *Agron. J.* 109, 158.
797

- 798 Setiyono, T. D., Weiss, A., Specht, J., Bastidas, A. M., Cassman, K. G., Dobermann, A. 2007.
799 Understanding and modeling the effect of temperature and day length on soybean phenology under
800 high-yield conditions. *Field Crops Research*, 100, 257-271.
801
- 802 Setiyono, T. D., Yang, H., Walters, D. T., Dobermann, A., Ferguson, R. B., Roberts, D. F., Lyon, D. J.,
803 Clay, D. E., Cassman, K. G., 2011. Maize-N: a decision tool for nitrogen management in maize. *Agron.*
804 *J.* 103, 1276-1283.
805
- 806 Sinclair, T. R., de Wit, C. T., 1976. Analysis of the carbon and nitrogen limitations to soybean yield.
807 *Agronomy Journal*, 68, 319-324. <https://doi.org/10.2134/agronj1976.00021962006800020021x>
808
- 809 Sinclair, T.R., Horie, T., 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency. A review.
810 *Crop Sci.* 29, 90-98.
811
- 812 Specht, J. E., Hume, D. J., Kumudini, S. V., 1999. Soybean yield potential—a genetic and physiological
813 perspective. *Crop Science*, 39 (6), 1560-1570.
814
- 815 Specht, J. E., Diers, B. W., Nelson, R. L., de Toledo, J. F. F., Torrion, J. A., Grassini, P., 2014.
816 "Soybean." Yield Gains in Major US. CSSA Special Publication in *Field Crops*, 33, 311-355.
817 doi:10.2135/cssaspecpub33.c12
818
- 819 Tagliapietra, E. L., Zanon, A. J., Streck, N. A., Balest, D. S., da Rosa, S. L., Bexaira, K. P., Richter, G. L.,
820 Ribas, G. G., da Silva, M. R., 2021. Biophysical and management factors causing yield gap in soybean
821 in the subtropics of Brazil. *Agronomy Journal*, 113, 1882-1894. <https://doi.org/10.1002/ajq2.20586>
822
- 823 Tamagno, S., Sadras, V. O., Haegerle, J. W., Armstrong, P. R., Ciampitti, I. A., 2018. Interplay between
824 nitrogen fertilizer and biological nitrogen fixation in soybean: Implications on seed yield and biomass
825 allocation. *Scientific reports*. 8 (17502). doi:10.1038/s41598-018-35672-1
826
- 827 Tamagno, S., Balboa, G. R., Assefa, Y., Kovács, P., Casteel, S. N., Salvagiotti, F., García, F. O., Stewart,
828 W. M., Ciampitti, I. A., 2017. Nutrient partitioning and stoichiometry in soybean: A synthesis-analysis.
829 *Field Crops Research*, 200, 18-27. doi:10.1016/j.fcr.2016.09.019
830
- 831 Thies, J. E., Singleton, P. W., Bohlool, B. B., 1995. Phenology, growth, and yield of fieldgrown soybean
832 and bush bean as a function of varying modes of N nutrition. *Soil Biology and Biochemistry*, 27, 575-
833 583. doi:10.1016/0038-0717(95)98634-Z
834
- 835 Tolley-Henry, L., Raper, C.D., 1986. Expansion and photosynthetic rate of leaves of soybean plants
836 during onset of and recovery from nitrogen stress. *Bot. Gaz.* 147, 400-406.
837 <https://doi.org/10.1086/337607>.
838
- 839 USDA, 2021. World production of soybean. USDA National Agricultural Statistics Service, Washington,
840 DC. Disponível em: <<https://www.fas.usda.gov/cropexplorer/>>. Acesso: 17 jan. 2021.
841
- 842 van Ittersum, M. K., Rabbinge, R., 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of
843 agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*, 52, 197-208.
844
- 845 van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z., 2013. Yield gap
846 analysis with local to global relevance—a review. *Field Crops Research*, v. 143, p. 4–17, 2013. Doi:
847 <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
848
- 849 van Ittersum, M. K., van Bussel, L. G. J., Wolf, J., Grassini, P., van Wart, J., Guilpart, N., Claessens, L., de
850 Groot, H., Wiebe, K., Mason-D’Croz, D., Yang, H., Boogaard, H., van Oort, P. A. J., van Loon, M. P.,
851 Saito, K., Adimo, O., Adjei-Nsiah, S., Agali, A., Bala, A., Chikowo, R., Kaizzi, K., Kouressy, M., Makoi
852 J. H. J. R., Ouattara, K., Tesfaye, K., Cassman, K. G., 2016. Can sub-Saharan Africa feed itself? *Proc*
853 *Natl Acad Sci* 113:14964–14969.

- 854
 855 Wang, E., Engel, T., 1998. Simulation of phenological development of wheat crops. *Agricultural Systems*,
 856 58, 1-24.
 857
 858 Yin, Y., Ying, H., Zheng, H., Zhang, Q., Xue, Y., & Cui, Z., 2019. Estimation of NPK requirements for rice
 859 production in diverse Chinese environments under optimal fertilization rates. *Agricultural and Forest*
 860 *Meteorology*, 279 (107756).
 861
 862 Zanon, A. J., Winck, J. E. M., Streck, N. A., Rocha, T. S. M. D., Cera, J. C., Richter, G. L., Lago, I., dos
 863 Santos, P. M., Maciel, L. R., Guedes, J. V. C., Marchesan, E., 2015. Desenvolvimento de cultivares de
 864 soja em função do grupo de maturação e tipo de crescimento em terras altas e terras baixas.
 865 *Bragantia*, 74, 400-411.
 866
 867 Zanon, A. J., Streck, N. A., Grassini, P., 2016. Climate and management factors influence soybean yield
 868 potential in a subtropical environment. *Agronomy Journal*, 108, 1447–1454.
 869
 870 Zapata, F., Danso, S. K. A., Hardarson, G., Fried, M., 1987. Time course of nitrogen fixation in field-grown
 871 soybean using nitrogen-15 methodology. *Agron. J.* 79, 172-176.
 872
 873 Zdziarski, A. D., Todeschini, M. H., Milioli, A. S., Woyann, L. G., Madureira, A., Stoco, M. G., Benin, G.,
 874 2018. Key soybean maturity groups to increase grain yield in Brazil. *Crop Science*, 57, 1155-1165.
 875



- 876
 877 **Figura suplementar S1.** Mapa do Rio Grande do Sul ilustrando onde foi conduzido os
 878 experimentos (símbolos vermelhos). Inserido canto superior esquerdo extensão territorial do
 879 Brasil com destaque para o RS.
 880



881

882 **Figura suplementar S2.** (A) diferença de produtividade da soja entre o tratamento N-completo
 883 menos zero-N relacionada ao nitrogênio do solo (acumulado total de N na MSS do milho). (B)
 884 diferença de produtividade da soja do GM médio relacionada ao nitrogênio do solo. (C)
 885 Acumulado de nitrogênio na MSS do milho relacionado a produtividade do milho (seis campos
 886 com milho, Tabela 1). Parâmetros da regressão são mostrados, coeficiente de determinação,
 887 correlação de pearson (ou se aplicável spearman). Linha sólida regressão linear ajustada. Cada
 888 ponto de dado representa um ambiente (combinação de data de semeadura x GM x tratamento
 889 de N x local x ano). Os triângulos (GM curto da soja), círculos (GM médio) e quadrados (GM
 890 longo).

891

Variável	GM Curto	GM Médio	GM Longo	ANOVA
	P value (teste-t pareado)			P value (zero-N)
Produtividade de grãos (Mg ha ⁻¹)	0.002	0.23	0.59	0.56
Massa do grão (mg)	0.004	0.019	0.19	0.15
Número de Legumes (m ²)	0.017	0.65	0.22	0.18
Número de Grãos (m ²)	0.0013	0.85	0.22	0.20
Óleo (%)	0.30	0.09	0.73	0.81
Produtividade de Óleo (Mg ha ⁻¹)	0.025	0.60	0.34	0.81
Proteína (%)	0.34	0.14	0.06	0.31
Produtividade de Proteína (Mg ha ⁻¹)	0.0001	0.21	0.025	0.87
MSS R3 (Mg ha ⁻¹)	0.27	0.0018	0.017	0.05
MSS R7 (Mg ha ⁻¹)	0.27	0.057	0.08	0.03
TC máxima (g m ⁻² d ⁻¹)	0.004	0.52	0.008	0.23
DS da TC máxima	0.02	0.11	0.70	0.16

892

893

894 **Tabela suplementar S1.**

895 As variáveis produtividade de grãos, componentes de produção, concentração e produtividade
 896 de proteína e óleo, MSS e TC foram avaliadas se a diferença média do tratamento de N (N-
 897 completo versus zero-N) é significativamente diferente de zero para cada grupo (curto, médio e
 898 longo) usando teste-t pareado ($P < 0.05$). Foi conduzida uma anova para verificar a variação

899 entre os grupos de maturação para o tratamento zero-N (padrão dos produtores), usando Tukey
900 ou Kruskal Wallis (sem normalidade na distribuição dos dados) ($P < 0.05$).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para soja de alta produtividades no Sul do Brasil, nossos resultados apontam para uma maior lacuna-N na produtividade de grãos conforme reduz a duração do ciclo da cultura, onde a combinação (FBN e NS) não conseguiu atender a demanda de N. Já a limitação de N no GM médios foi associada ao fornecimento de N do solo. GM longos não tiveram a produtividade afetada pelo tratamento zero-N, não sofrendo limitação de N.

Ciclos mais curtos foram mais sensíveis a limitação de nitrogênio, pois quando fertilizados incrementaram a MSS refletindo em maiores TC máximas, massa do grão, número de grão e legumes, além de maiores produtividades de proteína e óleo, indicando que o tratamento zero-N não suportou fornecer N para as altas TC. O tratamento zero-N penalizou a concentração de proteína do grão, portanto a fertilização de N permitiu ganhos na concentração de proteína sem reduzir a concentração de óleo, os ganhos foram maiores para ciclos mais longos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLIPRANDINI, L. F. et al. Understanding soybean maturity groups in brazil: environment, cultivar classification and stability. **Crop Science**, v.49, p.801-808, 2009.
- AMBROSINI, V. G. et al. Soybean yield response to Bradyrhizobium strains inoculation in fields with inoculation history in Southern Brazil. **Journal of Plant Nutrition**, p. 1–11, 2019a. doi:10.1080/01904167.2019.1648680
- AMBROSINI, V. G. et al. Assessing nitrogen limitation in inoculated soybean in Southern Brazil. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 190016, p.1-6, 2019b. <https://doi.org/10.2134/age2019.03.0016>
- BALBOA, G. R. et al. Shifts in soybean yield, nutrient uptake, and nutrient stoichiometry: A historical synthesis analysis. **Crop Science**, V. 58, p. 43–54, 2018. doi:10.2135/cropsci2017.06.0349
- BARRACLOUGH, P. B. et al. Nitrogen efficiency of wheat: Genotypic and environmental variation and prospects for improvement. **European Journal of Agronomy**, v. 33, p. 1–11, 2010.

BENDER, R. R. et al. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern, transgenic insect-protected maize hybrids. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 1, p. 161-170, 2013.

BENDER, R. R. et al. Nutrient uptake, partitioning: and remobilization in modern soybean varieties. **Agronomy Journal**, v. 107, p. 563–573, 2015.

CASSMAN, K. G. et al. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 28, p. 315–358, 2003. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.040202.122858>

CASSMAN, K. G. GRASSINI, P. A global perspective on sustainable intensification research. **Nature Sustainability**, v. 3, p. 262–268, 2020.

CAFARO LA MENZA, N. et al. Is soybean yield limited by nitrogen supply? **Field Crops Research**, v. 213, p. 204–212, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.08.009>

CAFARO LA MENZA, N. et al. Nitrogen limitation in high-yield soybean: Seed yield, N accumulation, and N use efficiency. **Field Crops Research**, v. 237, p. 74–81, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.009>

CAFARO LA MENZA, N. et al. Insufficient nitrogen supply from symbiotic fixation reduces seasonal crop growth and nitrogen mobilization to seed in highly productive soybean crops. **Planta, Cell & environment**, v. 43, n. 8, p. 1 – 15, 2020. <https://doi.org/10.1111/pce.13804>

CIAMPITTI, I. A., SALVAGIOTTI, F. New insights into soybean biological nitrogen fixation. **Agronomy Journal**, v. 110, p. 1185–1196, 2018.

CORDEIRO, C. F. dos S.; ECHER, F. R. Interactive effects of nitrogen-fixing bacteria inoculation and nitrogen fertilization on soybean yield in unfavorable edaphoclimatic environments. **Scientific Reports**, v.9, p.1-11, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52131-7>

CÓRDOVA, S. C. et al. Soybean nitrogen fixation dynamics in Iowa, USA. **Field Crops Research**, v. 236, p. 165– 176, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.03.018>

CÓRDOVA, S. C. et al. Soybean profitability and yield component response to nitrogen fertilizer in Iowa. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v.3, p. e20092, 2020.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Soja - Brasil: Série histórica de área plantada e de produtividade**. Brasília, 2021. Online. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>. Acesso em: 10 de fev. de 2021.

DE BANG, T. C. et al. The molecular–physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. **New Phytologist**, v. 229, n. 5, p.2446–2469, 2021.

EDREIRA, J. I. R. et al. Assessing causes of yield gaps in agricultural areas with diversity in climate and soils. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 247, n. July, p. 170–180, 2017.

EDWARDS, J.T., PURCELL, L.C. Soybean yield and biomass response to increasing plant population among diverse maturity groups: 1. agronomic characteristics. **Crop Science**. v. 45, p. 1770-1777, 2005. doi:10.2135/cropsci2004.0564

EGLI, D.B. Cultivar maturity and potential yield of soybean. **Field Crops Research**. v. 32, p.147-158, 1993. doi:10.1016/0378- 4290(93)90027-K

EVANS, L. T. Crop Evolution, adaptation and yield. **Cambridge University Press**, 1993.

EVANS, L.T., FISHER, R.A. Yield potential: its definition, measurement, and significance. **Crop Science**. v. 39, n. 6, p. 1544–1551, 1999.

FAO. FAOSTAT: **Agricultural production**. [Database] **FAO**, Rome, 2021. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em: 10 de mai. de 2021.

FAQUIN, V. **Nutrição Mineral de Plantas**, UFLA, FAEPE, Lavras, 2005. p. 5.

FEHR, W. R., CAVINESS, C.E. Stages of Soybean Development. **Iowa Agriculture and Home Economics Experiment Station**, Iowa State University, Ames. v. 87, 1977. Disponível em: <<http://lib.dr.iastate.edu/specialreports/87>>. Acesso em: 20 de mai. de 2021.

FISCHER, R. A., CONNOR, D.J. Issues for cropping and agricultural science in the next 20 years. **Field Crops Research**, v. 222, p. 121–142, 2018. doi:10.1016/j.fcr.2018.03.008

GANETEG, U. et al. Amino acid transporter mutants of Arabidopsis provides evidence that a non-mycorrhizal plant acquires organic nitrogen from agricultural soil. **Plant, Cell & Environment**, v. 40, p. 413–423, 2017.

GELFAND, I., ROBERTSON, G.P. A reassessment of the contribution of soybean biological nitrogen fixation to reactive N in the environment. **Biogeochemistry**, v. 123, p. 175–184, 2015. doi:10.1007/ s10533-014-0061-4

GEORGE, T. et al. Yield, soil nitrogen uptake, and nitrogen fixation by soybean from four maturity groups grown at three elevations. **Agronomy Journal**, v.80, p. 563–567, 1988. doi:10.2134/agronj1988.0 0021962008000040004x

GRASSINI, P. et al. How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. **Field Crops Research**, v. 177, p. 49–63, 2015a.

GRASSINI, P. et al. Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. *Field Crops Research*, [s. l.], v. 179, p. 150–163, 2015b.

GRIMM, S.S. et al. Modeling the occurrence of reproductive stages after flowering for four soybean cultivars. ***Agronomy Journal***, v. 86, n. 1, p. 31-38, 1994.

HAVÉ, M. et al. 2016. Nitrogen remobilization during leaf senescence: lessons from *Arabidopsis* to crops. ***Journal of Experimental Botany***, v. 68, p. 2513–2529.

HERRIDGE, D. F. 1982. Use of the ureide technique to describe the nitrogen economy of field-grown soybeans. ***Plant Physiology***, v.70, p. 7–11, 1982. doi:10.1104/pp.70.1.7

HUNGRIA, M., MENDES, I.C. Nitrogen fixation with soybean: the perfect symbiosis?. ***Biological Nitrogen Fixation***, v. 2, p.1005–1023, 2015.

KANTOLIC, A. Control ambiental y genético de la fenología del cultivo de soja: impactos sobre el rendimiento y la adaptación de genótipos. ***Revista da Facultad de Agronomía UBA***, v. 28, n. 1, p. 63-88, 2008.

KASCHUK, G., et al. Are the rates of photosynthesis stimulated by the carbon sink strength of rhizobial and arbuscular mycorrhizal symbioses? ***Soil Biology and Biochemistry***, v. 41, n. 6, p. 1233-1244, 2009.

KEATING, B. A. et al. Food wedges: framing the global food demand and supply challenge towards 2050. ***Global Food Security***, v. 3, p. 125–132, 2014.

LOBELL, D. B. et al. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. ***Annual Review of Environment and Resources***, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 179–204, 2009.

MALAVOLTA, E. (2006). ***Manual de nutrição mineral de plantas***. São Paulo: Agronômica Ceres, p. 638.

MARTIGNONE, R. et al. Efecto de la fecha de siembra sobre el comportamiento fenológico y agronómico en cultivares de soja de diferentes grupos de maduración. In: *Anais 3º Congreso Soja del Mercosur*, Rosario, p. 47-50, 2006.

MASTRODOMENICO, A. T., PURCELL L. C. Soybean nitrogen fixation and nitrogen remobilization during reproductive development. ***Crop Science***, v.52, p.1281–1289, 2012.

MUELLER, N. D. et al. Closing yield gaps through nutrient and water management. ***Nature***, v. 490, n. 7419, p. 254–257, 2012. doi:<https://doi.org/10.1038/nature11420>

OBERSON, A. et al. Symbiotic N₂ fixation by soybean in organic and conventional cropping systems estimated by ¹⁵N dilution and ¹⁵N natural abundance. ***Plant Soil***, v.290, p. 69–83, 2007.

ORTEZ, O. A. et al. Exploring nitrogen limitation for historical and modern soybean genotypes. **Agronomy Journal**, v. 110, p. 2080–2090, 2018. doi:10.2134/agronj2018.04.0271

PATTERSON, T. G., LA RUE, T. A. N₂ Fixation (C₂H₂) and Ureide Content of Soybeans: Environmental Effects and Source-Sink Manipulations. **Crop Science**, v. 23, n.5, p. 819–824, 1983.

POEHLMAN, J. M. Breeding soybean. **Breeding Field Crops**, 3^o ed. Van Nostrand Reinhold, New York. p.421-450, 1987. doi:10.1007/978-94-015-7271-2_17

PURCELL, L. C. et al. Soybean N₂ fixation estimates, ureide concentration, and yield responses to drought. **Crop Science**, v. 44, p. 484–492, 2004.

SALVAGIOTTI, F. et al. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. **Field Crops Research**, v. 65, p. 137–149, 2008. doi:10.1016/j.fcr.2008.03.001

SANTACHIARA, G. et al. Relative importance of biological nitrogen fixation and mineral uptake in high yielding soybean cultivars. **Plant Soil**, v. 418, p. 191–203, 2017.

SENTELHAS, P. C. et al. The soybean yield gap in Brazil - Magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, [s. l.], v. 153, n. 8, p. 1394–1411, 2015.

SETIYONO, T. D. et al. Understanding and modeling the effect of temperature and day length on soybean phenology under high-yield conditions. **Field Crops Research**, v.100, p.257-271, 2007.

SETIYONO, T. D. et al. Estimating maize nutrient uptake requirements. **Field Crops Research**, v. 118, p. 158–168, 2010.

SINCLAIR, T.R., RUFTY, T.W. Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases: not necessarily plant genetics. **Global Food Security**. v. 1, p. 94–98, 2012.

SINCLAIR, T. R. et al. Comparison of vegetative development in soybean cultivars for low-latitude environment. **Field Crops Research**, v.92, p.53-59, 2005.

SPECHT, J.E. et al. Soybean yield potential—a genetic and physiological perspective. **Crop Science**, v. 39, n. 6, p.1560–1570, 1999.

SPECHT, J. E. et al. "Soybean." Yield Gains in Major US. CSSA Special Publication in **Field Crops**, v. 33, p. 311-355, 2014. doi:10.2135/cssaspepub33.c12

TAGLIAPIETRA, E. L. et al. Biophysical and management factors causing yield gap in soybean in the subtropics of Brazil. **Agronomy Journal**, v. 113, p. 1882-1894, 2021. <https://doi.org/10.1002/agj2.20586>

TAMAGNO, S. et al. Nutrient partitioning and stoichiometry in soybean: A synthesis-analysis. **Field Crops Research**, v. 200, p. 18–27, 2017. doi:10.1016/j.fcr.2016.09.019

TAMAGNO, S., CIAMPITTI I.A. Seed yield and biological N fixation for historical soybean genotypes. **Kansas field research report**, 2017. Online: Disponível em: <ewprairiepress.org/kaesrr/vol3/iss6/19/>. acesso em: 12 mai. 2021. doi:10.4148/2378-5977.7436

TAMAGNO, S. et al. 2018. Interplay between nitrogen fertilizer and biological nitrogen fixation in soybean: Implications on seed yield and biomass allocation. **Scientific reports**. v. 8, n. 17502. doi:10.1038/s41598-018-35672-1

TEWARI, K. et al. Effect of deep placement of N fertilizers and different inoculation methods of Bradyrhizobia on growth, N₂ fixation activity and N absorption rate of field-grown soybean plants. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 190, p. 46–58, 2004. doi:10.1046/j.0931-2250.2003.00073.x

THIES, J. E. et al. Phenology, growth, and yield of fieldgrown soybean and bush bean as a function of varying modes of N nutrition. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 27, p. 575–583, 1995. doi:10.1016/0038-0717(95)98634-Z

USDA. **World production of soybean**. USDA, Washington, DC. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/cropeexplorer/>. Acesso: 17 jan. 2021.

VAN ITTERSUM, M. K., RABBINGE, R. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. **Field Crops Research**, v.52, n., p.197-208, 1997.

VAN ITTERSUM, M. K. et al. Yield gap analysis with local to global relevance—a review. **Field Crops Research**, v. 143, p. 4–17, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>

WEBER, D. F. et al. Serological Distribution of Bradyrhizobium japonicum das áreas de produção de soja dos EUA. **Agronomy Journal**, v.81, p. 786–789, 1989.

WILSON, R. F. Soybean: market driven research needs. **Genetics and Genomics of Soybean**, Springer, New York. v. 2, p. 3–15, 2008. Doi: 10.1007 / 978-0-387-72299-3_1

YIN, Y. et al. Estimation of NPK requirements for rice production in diverse Chinese environments under optimal fertilization rates. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 279, n. 107756, 2019.

ZANON, A. J. et al. Desenvolvimento de cultivares de soja em função do grupo de maturação e tipo de crescimento em terras altas e terras baixas. **Bragantia**, v.74, p.400-411, 2015.

ZANON, A. J. et al. Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, v. 108, p. 1447–1454, 2016. <https://doi.org/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, 2018.

ZEIHER, C. et al. Cultivar differences in N redistribution in soybeans. **Agronomy Journal**, v. 74, p. 375-379, 1982. doi:10.2134/agronj1982.00021962007400020027x