

AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS AGRÔNOMICAS DE SOJA: uma abordagem no espaço acadêmico¹

EVALUATION OF SOY AGRONOMIC CHARACTERISTICS: an academic approach

Mateus Dias Duarte² - UEMASUL
Wallace de Paula Bernardo³ - UENF
Weverton Pereira Rodrigues⁴ - UEMASUL

RESUMO

Este experimento foi realizado com o intuito de mostrar aos discentes do curso de Engenharia Agrônoma o efeito da área foliar nos componentes de produtividade. O experimento foi realizado entre os meses de dezembro de 2022 e março de 2023, na região norte do estado do Tocantins, usando os genótipos Brasmax Olimpo IPRO e Brasmax Domínio IPRO. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com dois genótipos com quatro parcelas, sendo que cada parcela foi constituída de cinco linhas com 3 m de comprimento. Foi mensurada a altura; o número de nós e vagens por planta, a área foliar, o índice de área foliar e a produtividade. O genótipo Olimpo apresentou menor área foliar e índice de área foliar, o que permitiu maior distribuição de fotoassimilados para os grãos, garantindo um maior índice de colheita, resultando em maior produtividade.

PALAVRAS-CHAVE: Área foliar. Produtividade. Índice de colheita. Ensino.

ABSTRACT

This experiment was carried out in order to show students on the Agricultural Engineering course the effect of leaf area on yield components. The experiment was carried out between December 2022 and March 2023, in the northern region of the state of Tocantins, using the genotypes Brasmax Olimpo IPRO and Brasmax Domínio IPRO. The experimental design used was randomized blocks, with two genotypes and four plots, each of which consisted of five lines 3 m long. Height, number of nodes and pods per plant, leaf area, leaf area index and yield were measured. The Olimpo genotype had a lower leaf area and leaf area index, which allowed for greater distribution of photoassimilates to the grains, ensuring a higher harvest index, resulting in higher yields.

KEYWORDS: Leaf area. Productivity. Harvest index. Teaching.

¹Este manuscrito é parte do projeto de Bolsa de Produtividade concedida pela UEMASUL, no EDITAL N° 14/2022 - CPG/PROPGI/UEMASUL.

²Graduando em Engenharia Agrônoma na Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão - Centro de Ciências Agrárias, Naturais e Letras, Grupo de Pesquisa em Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, UEMASUL. Email: mateus.duarte@uemasul.edu.br. / ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4322-5872>.

³Doutorando na Universidade Estadual do Norte Fluminense - Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias - Laboratório de Melhoramento Genético Vegetal. Email: wallace-bernardo@hotmail.com. / ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1392-5611>.

⁴Doutor em Produção Vegetal pela UENF. Docente e Bolsista de Produtividade do Programa da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão - Centro de Ciências Agrárias, Naturais e Letras, Grupo de Pesquisa em Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, UEMASUL. Email: weverton.rodrigues@uemasul.edu.br. / ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9137-474X>.

INTRODUÇÃO

As emissões globais de CO₂ têm aumentado constantemente desde a revolução industrial, de 280 μL CO₂ L⁻¹ até 416 μL μL CO₂ L⁻¹ em 2021, podendo alcançar valores estimados entre 730 e 1.020 μL CO₂ L⁻¹ em 2100 caso as estratégias de mitigação não funcionem (IPCC, 2019; NOAA, 2022). Este aumento substancial na concentração de CO₂ pode vir acompanhado de um aumento global na temperatura de até 4,8 °C (IPCC, 2019). Além disso, é previsto também alterações nos padrões de precipitação, i.e, aumentos nos episódios de seca e excesso de precipitações.

Essas mudanças significativas nas condições climáticas, principalmente aumentos dos episódios de secas e elevadas temperaturas, preveem a redução da produtividade global das várias culturas agrícolas (Gupta *et al.*, 2020). Porém, isso se manifesta em um momento em que as previsões apontam para a necessidade de aumentos na produção global dos alimentos que compõem a base alimentar para atender o aumento populacional, que pode ultrapassar mais de 10 bilhões de habitantes até 2050 (Fróna *et al.*, 2019).

Entre as culturas que são previstas serem afetadas pelas mudanças climáticas está a soja (*Glicine max*). Isto é bastante preocupante, pois a soja é uma importante *commodity* que compõe a base alimentar, dada a sua utilização na alimentação humana e animal, o que implica no seu alto valor comercial. O Brasil produziu na safra 2022/2023 cerca de 154 milhões de toneladas, com uma produtividade média de 3.507 kg ha⁻¹ em uma área de 44 milhões de ha (CONAB, 2023). O estado do Maranhão produziu cerca de 3,9 milhões de toneladas em 1,1 milhão de ha, com rendimento de 3.514 kg ha⁻¹ (CONAB, 2023).

Diante deste contexto, o cenário futuro é muito desafiador, dado o paradoxo de produzir mais alimentos em um ambiente cada vez mais severo, o que pode resultar, caso estratégias viáveis não sejam alcançadas, em impactos negativos para a segurança alimentar (Diffenbaugh; Burkea, 2019). Dentre as estratégias que podem ser utilizadas para superar estes desafios, a produção de genótipos mais tolerantes para as novas condições e técnicas de manejo têm-se mostrado promissoras e recentes estudos têm explorado essas potencialidades (Kamphorst *et al.*, 2020), as quais necessariamente são baseadas no conhecimento dos aspectos fisiológicos das plantas.

A produção de genótipos resistentes aos estresses abióticos envolve o conhecimento das características morfológicas, anatômicas, fisiológicas e bioquímicas que conferem tal resistência (Kamphorst *et al.*, 2020). Entre as características de crescimento, área foliar é considerada fundamental, uma vez que ela reflete o potencial para interceptação radiação solar e fotossíntese da planta (Srinivasan *et al.*, 2016; Raza *et al.*, 2021). Apesar de ser bem documentada na literatura, vários trabalhos têm sido realizados para elucidar o efeito da área foliar na produtividade da soja, uma vez que tal efeito depende, entre outros fatores, das condições ambientais e da densidade de plantio (Raza *et al.*, 2021).

No ambiente acadêmico, muitas vezes os alunos do curso de Engenharia Agrônômica não têm acesso prático às variáveis que são inseridas nos componentes de produtividade e quais fatores influenciam estes componentes, como por exemplo, a área foliar e o índice de área foliar, que é a área somada de todas as folhas de um espaço (de uma face), por unidade de solo ocupada. Por essa razão, muitas vezes, os discentes acabam adquirindo a percepção que uma maior área foliar sempre se traduzirá em maior produtividade, o que nem sempre acontece. Portanto, a presente pesquisa teve como objetivo correlacionar as características de crescimento com produtividade visando aperfeiçoar a formação dos discentes do curso de Agronomia, bem como introduzir as ferramentas disponíveis para acompanhamento de tais variáveis.

METODOLOGIA

O experimento foi realizado entre os meses de dezembro de 2022 e março de 2023, na Fazenda Risada (Figura 1), localizada no município de Darcinópolis - TO, região norte do estado do Tocantins (Latitude 6°45'24.5" S, Longitude 47°47'44.1" W e 240 m altitude), com dois genótipos de soja cultivados na região com similar ciclo de desenvolvimento. O experimento foi realizado em estação semelhante para validação de campo. O clima da região é classificado como tropical chuvoso de acordo com a classificação de Köppen, com temperatura média de 27,0 °C e precipitação de 1473 mm anuais.

Figura 1 - Fazenda Risada localizada no município de Darcinópolis - TO, região norte do estado do Tocantins (A) and medição do folíolo central para estimar a área foliar (B)



Fonte: Arquivo dos autores (2023).

O preparo do solo e as práticas de manejo foram trabalhadas de acordo com a literatura específica e as adubações realizadas de acordo com a análise de solo e as exigências da cultura. O espaçamento entre fileiras foi 0,50 m e a quantidade de plantas por metro linear foi determinado de acordo com poder germinativo de cada genótipo, sendo 13 e 14 plantas por metro para os genótipos Brasmax Olimpo IPRO e Brasmax Domínio IPRO, respectivamente.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados (DBC), com dois tratamentos (2 genótipos) com quatro blocos. Cada bloco foi constituído de cinco linhas de cada genótipo com 3 m de comprimento. Em cada linha, foram utilizadas as três linhas centrais com 3 metros, as demais utilizadas como bordaduras, sendo avaliadas três plantas por linha resultando no total de nove plantas por bloco. A altura (cm) foi mensurada com a utilização de régua graduada, enquanto o número de nós por planta e número de vagens por planta foi contabilizado manualmente no estágio reprodutivo R5 - início de enchimento de grãos.

A área foliar (cm²) foi mensurada utilizando o método de Richter *et al.* (2014). Brevemente, mensurou-se a maior largura e comprimento de cada folíolo central para calcular a área foliar (Figura 1) de cada folha conforme equação geral estabelecida por Richter *et al.* (2014). O índice de área foliar foi estimado por dividir a área foliar individual pela área ocupada por cada planta, na mesma unidade de área (Richter *et al.*, 2014).

As raízes, caule e folhas das plantas de cada genótipo, foram colocados separadamente em sacos de papel devidamente identificados e em seguida foram levados para estufa de circulação forçada de ar a 70°C por 72 horas (Figura 2). Foi utilizada uma balança analítica para determinar a massa seca de cada parte da planta, obtendo-se assim a massa seca das raízes, a

massa seca do caule e a massa seca da parte aérea. A massa seca total foi obtida pela soma da massa seca das raízes, da massa seca do caule e da massa seca da parte aérea. A colheita foi realizada manualmente para posterior secagem para que o grão atingisse percentagem de umidade do grão em torno de 13%. Em seguida os grãos foram pesados para estimar a produtividade de grãos (kg ha^{-1}). De posse dos dados foi realizada análise estatística entre as variáveis e a comparação entre os genótipos. Os resultados foram submetidos à análise de variância utilizado no software R. 4.1.0. (R CORE TEAM, 2021; <https://www.r-project.org/>). Correlação fenotípica também foram obtidas com o pacote 'corrplot' e 'Hmisc'.

RESULTADOS

O presente projeto trouxe uma abordagem interessante para os discentes do curso de Engenharia Agrônoma, apresentando metodologias para análise das variáveis que são inseridas nos componentes de produtividade da soja, bem como uma visão prática da influência da área foliar nestas variáveis. Assim, o projeto transmite informações permissivas ao cultivo na soja na região Matopiba, as quais serão abordadas mais adiante e fundamentais para a atuação do Engenheiro Agrônomo no cultivo da soja na referida região.

A altura das plantas, a massa seca da parte aérea e a massa seca das raízes foram similares entre os genótipos, enquanto o genótipo Olimpo teve mais que o dobro de massa de grãos por planta. (Figura 2). Por outro lado, a área foliar foi maior (ca. 85%) para o genótipo Domínio ($1,56 \text{ m}^2$) em comparação ao genótipo Olimpo ($0,84 \text{ m}^2$) (Figura 3). Similarmente, o índice de área foliar no genótipo Domínio foi duas vezes maior em comparação ao genótipo Olimpo (Figura 3). Para a variável número de nós por planta, foi observado que as cultivares não apresentam diferença significativa, no entanto, o genótipo Domínio apresentou maior número de vagens por planta (Figura 3). O número de sementes por vagem foi similar entre os genótipos, no entanto, a produtividade, número de grãos e o índice de colheita foi superior para o genótipo Olimpo em 105,44%, 121% e 15,76% e respectivamente (Figura 4).

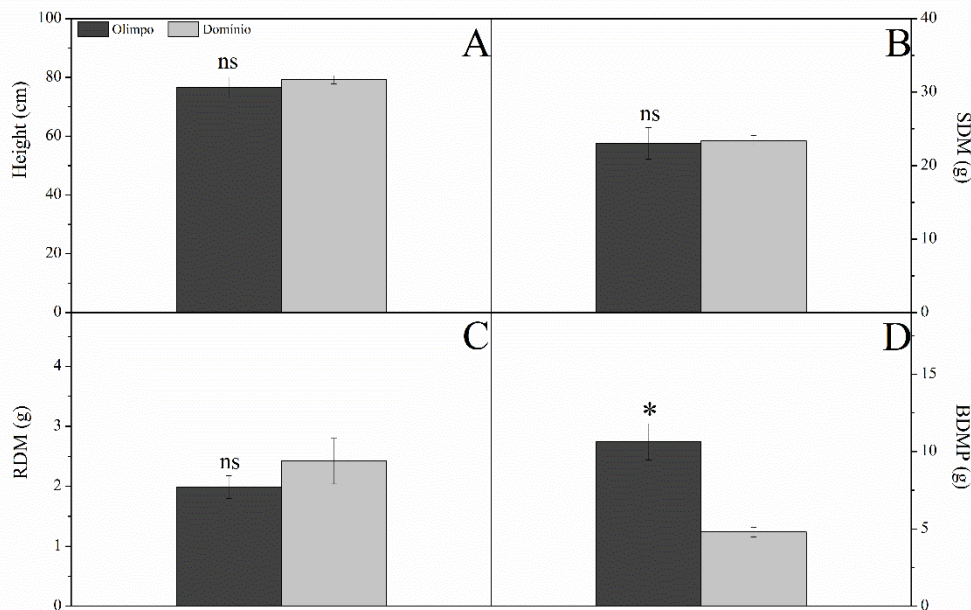
Em relação às correlações, a massa seca da parte aérea apresentou correlação positiva com o número de vagens por planta e número de grãos por planta. A massa seca da raiz apresentou correlação positiva área foliar, índice de área foliar, número de nós por planta, número de vagens por planta e número de grãos. A massa seca dos grãos por planta apresentou correlação negativa com área foliar e índice de área foliar, produtividade e índice de colheita. A área foliar e o índice de área foliar apresentou correlação negativa com produtividade índice de colheita e por outro lado correlação positiva com número de nós por planta e número de vagens por planta e número de grãos. Por fim, a produtividade apresentou alta correlação positiva com o índice de colheita (Figura 5).

DISCUSSÃO

A área foliar, bem como o índice de área foliar, está diretamente ligado ao potencial fotossintético das plantas. Isso porque estas variáveis refletem a capacidade de interceptação luminosa a qual é fonte de energia para os processos fotossintéticos (Srinivasan *et al.*, 2017). De fato, seria esperado que o genótipo Domínio tivesse maior produtividade em função da maior área foliar e índice de área foliar (Figura 3 e 4). No entanto, o genótipo Olimpo teve maior produtividade apesar da menor área foliar e índice de área foliar. Isso provavelmente ocorreu

porque o genótipo Domínio investiu mais energia na área foliar as custas do rendimento de grãos.

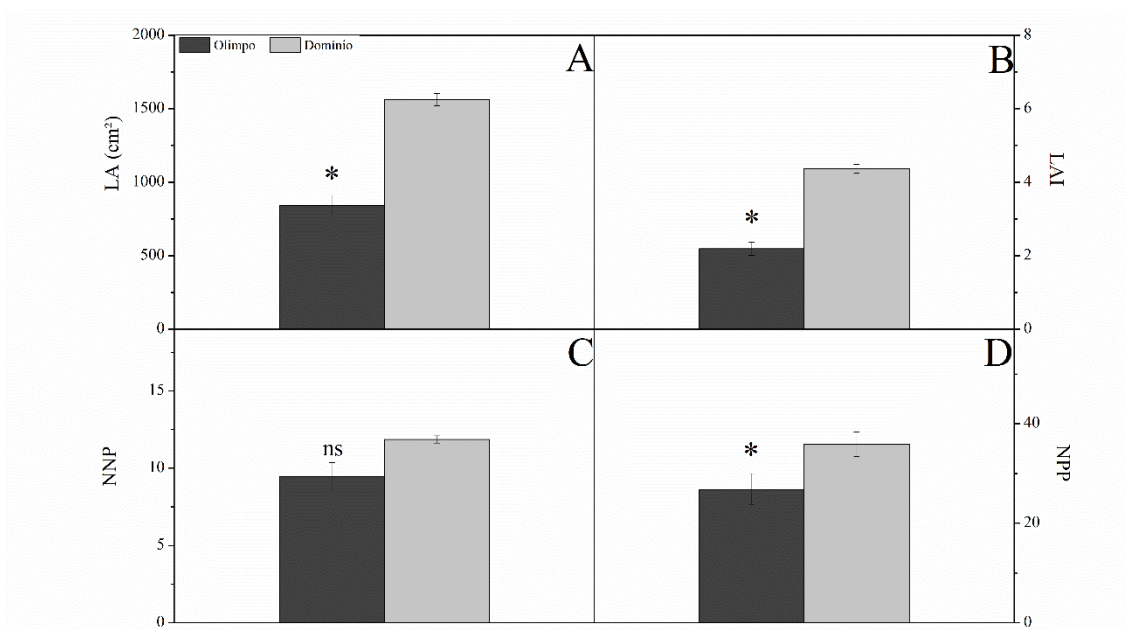
Figura 2 - Altura de planta - Height (A), massa seca da parte aérea - SDM (B), massa seca das raízes - RDM (C) e massa seca de grãos por planta - BDMP (D) em cultivares de soja (Olimpo) e (Domínio) na Fazenda Risada, município Darcinópolis - TO, localizada região norte do estado do Tocantins



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

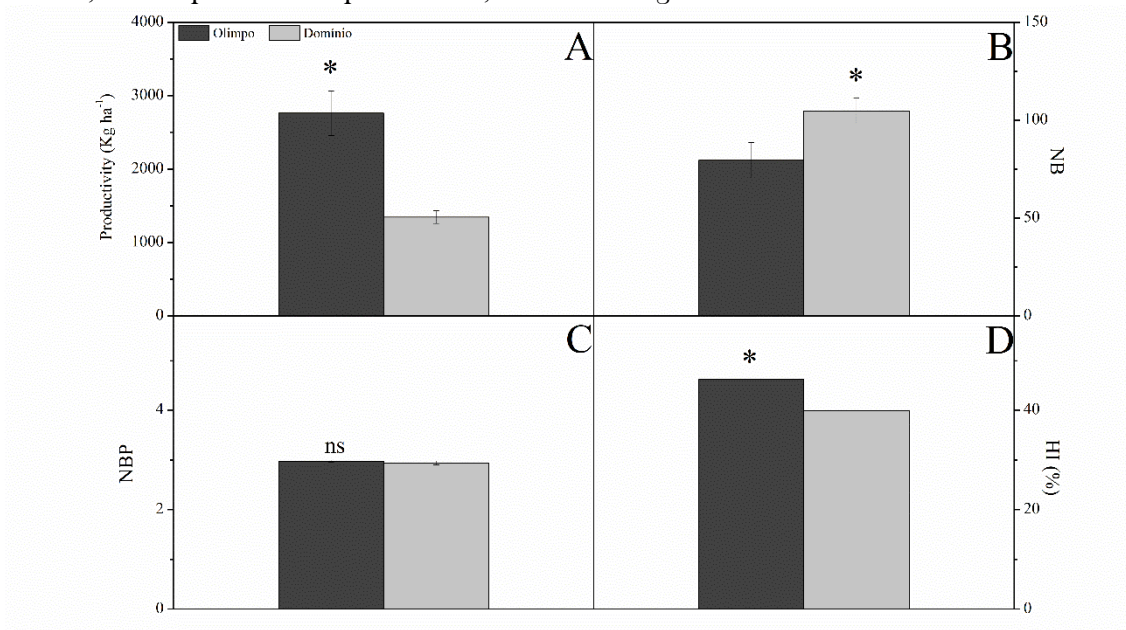
Cultivares modernas de soja provavelmente parece produzir mais folhas do que o necessário em detrimento à produtividade (Srinivasan *et al.*, 2017; Raza *et al.*, 2021). Isso pode ser uma característica do ancestral para aumentar a competição ou mesmo como mecanismo para suportar a herbivoria (Goto *et al.*, 2016). Além disso, maior área foliar poder reduzir a penetração de luz e diminuir a taxa de fotossíntese nas folhas localizadas na parte inferior da copa (Raza *et al.*, 2021), além de diminuir o número de flores e de vagens (Jiang; Egli, 1993). Portanto, o decréscimo na área foliar e no índice de área foliar, pode resultar em aumentos de produtividade devido à economia adicional com o custo de construção de folha (Srinivasan *et al.*, 2017).

Figura 3 - Área foliar - LA (A), índice de área foliar - LAI (B), número de nós por planta - NPP (C) e número de vagens por planta - NPP (D) em cultivares de soja (Olimpo) e (Domínio) na Fazenda Risada, município Darcinópolis - TO, localizada região norte do estado do Tocantins



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

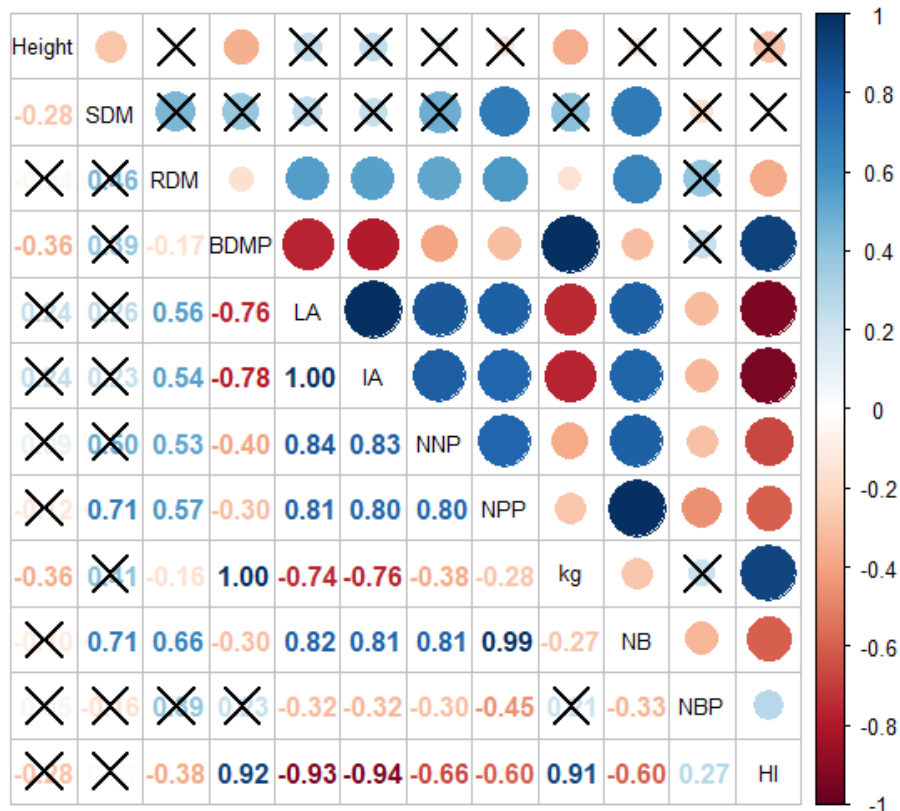
Figura 4 - Produtividade (A), número de grãos - NB (B), número de grãos por vagens - NBP (C) e índice de colheita - HI (D) em cultivares de soja (Olimpo) e (Domínio) na Fazenda Risada, município Darcinópolis - TO, localizada região norte do estado do Tocantins



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 5 - Estimativas das correlações fenotípicas entre características mensuradas em cultivares de soja (Olimpo) e (Domínio) na Fazenda Risada, município Darcinópolis - TO, localizada região norte do estado do Tocantins. As características avaliadas foram: altura (Height), massa seca da parte aérea (SDM), massa seca da raiz (RDM), massa seca de grãos por planta (BDMP), área foliar (LA), índice de área foliar (LAI), número de nós por planta (NNP), número de vagens por planta (NPP), produtividade (Kg), número de grãos (NB), número de grãos por

vagens (NBP) e índice de colheita (HI). Áreas dos círculos mostram o valor correspondente aos coeficientes da Correlação de Sperman. Valores de correlação são apresentados, juntamente com as colorações, sendo correlações positivas apresentadas em azuis e as correlações negativas em vermelho. Intesidade das cores (claro para escuro) e o tamanho do círculo (pequeno para grande) são proporcionais aos coeficientes de correlação (0 a 1 para coeficientes positivos e 0 a -1 para coeficientes negativos). Os X mostram as correlações que não foram significativas ao teste de 5% de probabilidade



Fonte: Fonte: Arquivo dos autores (2023).

Interessante ressaltar que o índice de área foliar é substancialmente influenciado, entre outros fatores, pela altura e densidade de plantas (Holshouser; Whittaker, 2002). Portanto, maior densidade de plantas no genótipo Domínio resultou em maior índice de área foliar, porém, com redução da produtividade (Figura 4 e 5).

Sob condições de elevado DPV do ar, a menor área foliar e índice de área foliar pode resultar em menor demanda hídrica para manter os tecidos hidratados e preservar as funções bioquímicas, especialmente no caso da soja onde as interações simbióticas com rizóbio podem reduzir a capacidade do sistema radicular de fornece água à parte área nos períodos de maior demanda (Lopes *et al.*, 2019). Menor índice de área foliar também pode ser uma característica importante para aumentar a eficiência do uso e melhorar a resistência para o estresse hídrico diante das mudanças climáticas (Ort; Long, 2014).

Apesar do genótipo Domínio apresentar maior área foliar, o mesmo não apresentou maior massa seca da parte aérea nem massa seca da raiz (Figura 2). Portanto, isso indica que maior área foliar foi resultado de maior expansão em área na densidade de células (i.e., maior área específica foliar) o que indica que as folhas da parte inferior não receberam luz suficiente

para saturar a fotossíntese (Liu *et al.*, 2016).

Os mais importantes dos componentes da produtividade na cultura da soja são o número de grãos por metro quadrado e a massa de grãos, que abrange o início da floração (R1) até logo após o início do enchimento das sementes (entre R5 e R6) (Board; Tan, 1995; Wei; Molin, 2020). Porém, o genótipo Domínio teve maior número de grãos por metro quadrado, sendo 2931 grãos por metro quadrado para o genótipo domínio contra 2091 para o genótipo Olimpo (dados não mostrados). Mas por outro lado, o genótipo Olimpo apresentou maior massa de grãos em comparação ao genótipo domínio, ou seja, compensou o menor número de grãos com investimento em massa, resultando em maior produtividade (Figura 2 e 5). Interessante que o genótipo Domínio apresentou maior número de vagens por planta (Figura 3), bem como por área (996 contra 745, dados não mostrados), no entanto, a massa de grãos foi o fator preponderante para compensar este efeito.

A maior massa de grãos no genótipo Olimpo pode ter ocorrido em função da maior taxa fotossintética em escala de planta, uma vez que a menor área foliar e índice de área foliar permite maior penetração da luz. Outro fator crucial foi o maior índice de colheita observado no genótipo Olimpo (Figura 4). A proporção da biomassa total produzida acima do solo que é convertida em biomassa de grãos é o índice de colheita, e é o resultado de mudanças em processos fisiológicos fundamentais que impactam a cultura durante uma ou mais fases do desenvolvimento (Evans, 1996; Tollenaar; Lee, 2006).

A análise de correlação evidencia o efeito negativo de uma maior área foliar e índice de área foliar na produtividade (Figura 5). Vale ressaltar que os genótipos utilizados apresentaram produtividades bem inferiores ao potencial que eles possuem quando crescidos em outras regiões (foram 2.762 kg ha⁻¹ e 1.344 kg ha⁻¹ para os genótipos Olimpo e Domínio, respectivamente), ou mesmo inferior à média brasileira (3.507 kg ha⁻¹; CONAB, 2023). Isso pode ter ocorrido em função dos genótipos apresentarem maior sensibilidade aos estresses abióticos, uma vez que a região de estudo apresenta elevado DPV do ar e solo arenoso o que aumenta o nível de estresse sob o qual as plantas foram submetidas. Esse fenômeno é explicado pela sensibilidade dos genótipos em razão do (DPV), levando a planta a ativar mecanismo de defesa hídrica por mais tempo retardando seu desenvolvimento (Kunert; Vorster, 2020), principalmente genótipos que apresentem maior índice de área foliar, como no caso da cultivar domínio (Figura 3).

Os resultados parciais obtidos neste trabalho sugerem que é preciso considerar a área foliar e o índice de área foliar como variáveis fundamentais que afetam os componentes de produtividade, reflexo da escolha da densidade de plantio. Portanto, reduzir até certo limite, ao invés de aumentar o índice de área foliar pode ser uma estratégia viável para produzir soja em ambientes estressantes onde o aumento na eficiência do uso da água pode ser requerida em função das mudanças climáticas. Por isso, os estudos de genótipos adaptados à região de cultivo bem como estudos voltados para determinar a densidade de plantio se tornaram cada vez mais importantes, uma vez que as mudanças climáticas estão sendo bastante desafiadora no cenário atual, resultando na ocorrência com mais frequência de estresses abióticos, resultando em perdas significativas de produtividade.

Por fim, o presente trabalho conseguiu transmitir, via conhecimento prático, a importância de considerar os efeitos da área foliar nos componentes de produtividade. Portanto, a formação dos profissionais na área de Engenharia Agrônoma com uma visão holística sobre este tema pode melhorar o desempenho agrônomo da cultura em questão para a região do MATOPIBA, por meio de estratégias de manejo, incluindo a escolha acertada de genótipos para a região.

CONCLUSÕES

Os discentes envolvidos no estudo constataram que o genótipo (Olimpo) apresentou menor área foliar e índice de área foliar, o que permitiu maior distribuição de fotoassimilados para os grãos, garantindo um maior índice de colheita IC (%), resultando em maior produtividade. Aqui foram tratadas questões importantes para a formação dos discentes do curso de Engenharia Agrônoma.

APOIO FINANCEIRO

A equipe agradece a Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão pela concessão da bolsa de Produtividade.

REFERÊNCIAS

BOARD, J.; TAN, Q. Assimilatory capacity effects on soybean yield components and pod number. *Crop Science*, v. 35, p. 846–851, 1995.

CONAB - Companhia nacional do abastecimento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 14 dez 2023.

DIFFENBAUGH, N.; BURKEA, M. Global warming has increased global economic inequality. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 116, p. 9808–9813, 2019.

EVANS, L. T. (ed.). *Crop Evolution, Adaptation and Yield*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996, 514p.

FRÓNA, D.; SZENDERÁK, J.; HARANGI-RÁKOS, M. The Challenge of Feeding the World. *Sustainability*, v. 11, p. 5816, 2019.

GOTO, H. *et al.* Characterization of natural and simulated herbivory on wild soybean (*Glycine soja* Seib. et Zucc.) for use in ecological risk assessment of insect protected soybean. *PLoS ONE*, v. 11, p. e0151237, 2016.

GUPTA, A.; RICO-MEDINA, A.; CAÑO-DELGADO, A. The physiology of plant responses to drought. *Science*, v. 368, p. 266–269, 2020.

HOLSHOUSER, D.; WHITTAKER, J. Plant population and row spacing effects on early soybean production systems in the Mid-Atlantic USA. *Agronomy Journal*, v. 94, p. 603–611, 2002.

IPCC: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification,*

land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Portner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)], 2019, 864p. Disponível em: https://reliefweb.int/report/world/climate-change-and-land-ipcc-special-report-climate-change-desertification-land?gad_source=1&gclid=Cj0KCQIA5fetBhC9ARIsAP1UMgExumn-VIb_LldnpHmbFTTrcIazBIYBaXhMJE43FS24dalvc0vzbuEaAua9EALw_wcB. Acesso em: 19 jan 2024.

JIANG, H.; EGLI, D. Shade induced changes in flower and pod number and flower and fruit abscission in soybean. **Agronomy Journal**, v. 85, p. 221-225, 1993.

KAMPHORST, S. H. *et al.* Comparison of selection traits for effective popcorn (*Zea mays* L. var. Everta) breeding under water limiting conditions. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1289, 2020.

KUNERT, K.; VORSTE, B. In search for drought-tolerant soybean: is the slow-wilting phenotype more than just a curiosity?. **Journal of Experimental Botany**, v. 71, p. 457-460, 2020.

LIU, Y. *et al.* Does greater specific leaf area plasticity help plants to maintain a high performance when shaded?. **Annals of Botany**, v. 118, n. 7, p. 1329-1336, 2016.

LOPES, C. S. L. *et al.* Hypernodulating soybean mutant line nod4 lacking 'Autoregulation of Nodulation' (AON) has limited root-to-shoot water transport capacity. **Annals of Botany**, v. 24, p. 979-991, 2019.

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration. **Climate change: Atmospheric carbon dioxide**. Climate.gov, USA. 2019. Disponível em: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climatechangeatmospheric-carbon-dioxide>. Acesso em: 01 dez. 2022.

ORT, D. R.; LONG, S. P. Limits on yields in the corn belt. **Science**, v. 344, p. 483-484. 2014.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>, 2021.

RAZA, M. A. *et al.* Growth rate, dry matter accumulation, and partitioning in soybean (*Glycine max* L.) in response to defoliation under high-rainfall conditions. **Plants**, v. 10, p. 1497, 2021.

RICHTER, G. L. *et al.* Estimativa da área de folhas de cultivares antigas e modernas de soja por método não destrutivo. **Bragantia**, Campinas, v. 73, n. 4, p. 416-425, 2014.

SRINIVASAN, V.; KUMAR, P.; LONG, S. P. Decreasing, not increasing, leaf area will raise crop yields under global atmospheric change. **Global Change Biology**, v. 23, 4 ed., p. 1626-1635, 2016.

TOLLENAAR, M.; LEE, E. A. Dissection of physiological processes underlying grain yield in maize by examining genetic improvement and heterosis. **Maydica**, v. 51, p. 399–408, 2006.

WEI, M. C. F.; MOLIN, J. P. Soybean yield estimation and its components: a linear regression approach. **Agriculture**, v. 10, p. 348, 2022.

Submetido em: dezembro de 2023.

Aprovado em: janeiro de 2024.