RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 29/07/2027.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

CARACTERIZAÇÃO AGRONÔMICA E EFEITOS CLIMÁTICOS NO ESTUDO DO GRUPO DE MATURIDADE RELATIVA EM POPULAÇÕES DE SOJA

Eryadison Flávio Bonifacio de Araújo
Engenheiro Agrônomo

2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

CARACTERIZAÇÃO AGRONÔMICA E EFEITOS CLIMÁTICOS NO ESTUDO DO GRUPO DE MATURIDADE RELATIVA EM POPULAÇÕES DE SOJA

Discente: Eryadison Flávio Bonifacio de Araújo
Orientadora: Profa. Dra. Sandra Helena Unêda-Trevisoli

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas).

2025

A663c

Araújo, Eryadison Flávio Bonifacio de
Caracterização agronômica e efeitos climáticos no estudo do grupo de maturidade relativa em populações de soja / Eryadison Flávio Bonifacio de Araújo. -- Jaboticabal, 2025
44 f. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientadora: Sandra Helena Unêda-Trevisoli

1. ciclo fenológico. 2. Glycine max. 3. covariáveis ambientais. 4. modelos mistos. 5. REML/BLUP. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CARACTERIZAÇÃO AGRONÔMICA E EFEITOS CLIMÁTICOS NO ESTUDO DO GRUPO DE MATURIDADE RELATIVA EM POPULAÇÕES DE SOJA

AUTOR: ERYADISON FLÁVIO BONIFÁCIO DE ARAÚJO
ORIENTADORA: SANDRA HELENA UNÊDA TREVISOLI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas), pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. SANDRA HELENA UNÊDA TREVISOLI (Participaçao Presencial)
Departamento de Producao Vegetal / FCAV UNESP Jaboticabal

Pesquisadora Dra SALLY FERREIRA BLAT (Participaçao Presencial)
Departamento de Descentralização do Desenvolvimento / APTA - Ribeirão Preto/SP

Prof. Dr. PABLO FORLAN VARGAS (Participaçao Presencial)
Departamento de Agronomia / FCAVR UNESP Registro

Jaboticabal, 29 de julho de 2025

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

ERYADISON FLÁVIO BONIFACIO DE ARAÚJO – nascido em 25 de novembro de 1998, na cidade de Solânea, Paraíba. Em agosto de 2018 ingressou no curso de Agronomia da Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Agrárias – Areia – PB, graduando-se como Engenheiro Agrônomo em julho de 2023. Durante a graduação foi bolsista de monitoria e bolsista de Iniciação Científica – CAPES e UFPB, durante 4 vigências, atuando em pesquisas voltadas a matéria orgânica do solo, paisagens agrícolas sustentáveis e cobertura vegetal acima do solo. Em agosto de 2023 iniciou o mestrado em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas), pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp/FCAV – Câmpus de Jaboticabal, SP, sob a orientação da Profa. Dra. Sandra Helena Unêda-Trevisoli, como bolsista CAPES.

Aos meus amados e queridos avós, Geraldo Bonifácio da Silva (*in memoriam*) e Rosalva Pereira da Silva (*in memoriam*) pela educação, incentivo, apoio e amor entregues a mim, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e por ser fortaleza em todos os momentos.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, pela oportunidade, aprendizado e fornecimento da infraestrutura necessária para a minha formação e realização deste trabalho.

À Prof. Dra. Sandra Helena Unêda-Trevisoli pela oportunidade, orientação, ensinamentos, paciência e todo o suporte concedidos a mim durante o mestrado.

A minha mãe, Conceição Bonifácio, pelo cuidado e por acreditar nos meus sonhos incondicionalmente. Aos meus irmãos Ayanne Vitória e Jefferson Bonifácio, pelo incentivo diário. A todos os familiares que torceram pelo sucesso dessa empreitada.

A minha namorada Emília Medeiros, fonte de aconchego e incentivo durante esse processo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas) pela entrega de conhecimentos importantes para o meu crescimento profissional.

Ao Dr. Manoel Filipe Ferreira pelo suporte no ajuste dos modelos estatísticos.

Aos amigos do Laboratório de Biotecnologia e Melhoramento de Plantas: Dardânia Cristeli, Alyce Moitinho, Matheus Siqueira, Davi Della Libera, Laura Rodrigues, Thainá Moura, Claudenir Facincani, Jardel Souza, Juan Carlos, Júlia Teixeira, Penelope Chagas e Marcio Mandrá, pela amizade, companhia e conversas descontraídas, por muitas vezes científicas. Bem como a todos os estagiários pela contribuição na condução dos experimentos.

A Lucas Medeiros, Aldo Trevizoli e todos os amigos que pude fazer em Jaboticabal, obrigado pelos momentos de descontração e aprendizado.

Aos membros da banca do exame geral de qualificação Dr. Rinaldo Cesar de Paula e Dr. Francisco José Domingues Neto, pelas correções e direcionamentos.

Aos funcionários do Departamento de Produção Vegetal e da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da UNESP/FCAV, pelo suporte na condução dos experimentos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – Código de Financiamento 001.

A todos, o meu muito obrigado!

SUMÁRIO

Página

RESUMO ii
ABSTRACT iii
1 INTRODUÇÃO 1
2 REVISÃO DE LITERATURA 3
2.1 Importância e características inerentes à cultura da soja 3
2.2 Grupos de maturidade relativa em soja 4
2.3 Modelos mistos (REML/BLUP) no melhoramento genético 5
3 MATERIAL E MÉTODOS 7
3.1 Caracterização da área experimental 7
3.2 Material Genético 7
3.3 Delineamento experimental e tratamentos 7
3.4 Manejo da área experimental 8
3.5 Caracteres Avaliados 8
3.5.1 Caracteres agronômicos 8
3.5.2 Variáveis Ambientais 9
3.6 Análises Estatísticas 9
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 12
6 CONCLUSÃO 29
REFERÊNCIAS 30

CARACTERIZAÇÃO AGRONÔMICA E EFEITOS CLIMÁTICOS NO ESTUDO DO GRUPO DE MATURIDADE RELATIVA EM POPULAÇÕES DE SOJA

RESUMO – A soja é a principal oleaginosa cultivada mundialmente, sendo importante para a alimentação humana e animal. A duração do seu ciclo fenológico, expressa pelo número de dias para a maturidade (NDM), é determinada por fatores genéticos e influenciada por variáveis ambientais como temperatura, fotoperíodo, precipitação, tipo de solo e manejo, impactando na produtividade de grãos (PG) e adaptação regional. Ainda existem muitas lacunas sobre a interação entre os grupos de maturidade relativa (GMR) e o ambiente. Sendo assim, objetivou-se com este trabalho, caracterizar o comportamento de populações de soja e o efeito ambiental, no ciclo fenológico da cultura. Para isso, foram sintetizadas três populações a partir de cruzamentos biparentais de amplitude estreita e ampla, em relação ao GMR das cultivares utilizadas como genitoras. O cruzamento entre BRS 278 RR (GMR 9.4) (♀) x BMX Veloz RR (GMR 5.0) (♂) formou a população E1; BMX Potência RR (GMR 6.7) (♀) x BMX Energia RR (GMR 5.3) (♂) originou a população E2; e o cruzamento entre BRS 245 RR (7.3) (♀) x BRS 278 RR (GMR 9.4) (♂) formou a população E3. As populações foram avaliadas em quatro anos agrícolas, em experimentos no delineamento de blocos aumentados. Foram avaliados os caracteres número de dias para a maturidade (NDM) e produtividade de grãos (PG). As análises foram realizadas por modelos mistos (REML/BLUP), incorporando covariáveis ambientais (precipitação e temperatura). A População E1 apresentou ampla variabilidade genética para NDM e estabilidade produtiva. As populações E2 e E3 apresentaram homogeneidade quanto ao ciclo, com redução da produtividade em diferentes anos. Os modelos revelaram altas herdabilidades para NDM e moderadas para PG. A sensibilidade às variáveis ambientais foi observada nas populações E1 e E2, enquanto a população E3 mostrou estabilidade fenológica. A inclusão de covariáveis nos modelos auxiliou na melhor compreensão dos efeitos ambientais sobre o GMR em soja.

PALAVRAS-CHAVE: ciclo fenológico, *Glycine max*, covariáveis ambientais, modelos mistos, REML/BLUP, variabilidade genética

AGRONOMIC CHARACTERIZATION AND CLIMATIC EFFECTS IN THE STUDY OF THE RELATIVE MATURITY GROUP IN SOYBEAN POPULATIONS

ABSTRACT - Soybean is the main oilseed crop cultivated worldwide, being important for both human and animal nutrition. The duration of its phenological cycle, expressed by the number of days to maturity (NDM), is determined by genetic factors and influenced by environmental variables such as temperature, photoperiod, precipitation, soil type, and management practices, impacting grain yield (GY) and regional adaptation. There are still many gaps regarding the interaction between relative maturity groups (RMG) and the environment. Therefore, the aim of this study was to characterize the behavior of soybean populations and the environmental effects on the crop's phenological cycle. For this purpose, three populations were synthesized from biparental crosses with narrow and wide amplitude, in relation to the RMG of the parental cultivars. The cross between BRS 278 RR (RMG 9.4) (♀) × BMX Veloz RR (RMG 5.0) (♂) originated population E1; BMX Potência RR (RMG 6.7) (♀) × BMX Energia RR (RMG 5.3) (♂) originated population E2; and BRS 245 RR (RMG 7.3) (♀) × BRS 278 RR (RMG 9.4) (♂) originated population E3. The populations were evaluated over four growing seasons, in experiments conducted under an augmented block design. The traits evaluated were number of days to maturity (NDM) and grain yield (GY). Analyses were performed using mixed models (REML/BLUP), incorporating environmental covariates (precipitation and temperature). Population E1 showed broad genetic variability for NDM and yield stability. Populations E2 and E3 showed homogeneity in terms of cycle, with yield reduction in different years. The models revealed high heritability estimates for NDM and moderate values for GY. Sensitivity to environmental variables was observed in populations E1 and E2, whereas population E3 showed phenological stability. The inclusion of covariates in the models contributed to a better understanding of environmental effects on soybean RMG.

Keywords: environmental covariates, *Glycine max*, mixed models, phenological cycle, REML/BLUP, genetic variability

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é a principal oleaginosa cultivada mundialmente, com grande impacto no fornecimento de proteína e óleo vegetal, sendo importante para a alimentação humana, animal e produção de bioenergia. Além disso, contribui para a sustentabilidade agrícola por reduzir o uso de fertilizantes nitrogenados por meio da sua associação com microrganismos, melhorando também a qualidade do solo (Pagano e Miransari, 2016). No ano agrícola 2024/2025 no Brasil, a produção da oleaginosa foi de 167,9 milhões de toneladas (CONAB, 2025), mantendo o país como o maior produtor mundial.

Características agronômicas relacionadas ao ciclo fenológico, como número de dias para a maturidade (NDM), têm ganhado destaque em programas de melhoramento vegetal. Avanços genéticos na soja têm sido acompanhados por alterações na duração do ciclo, resultando no desenvolvimento de cultivares mais produtivas e adaptadas a condições ambientais (Todeschini et al. 2019). Para isso é fundamental a classificação das cultivares quanto ao seu grupo de maturidade relativa (GMR), permitindo alocação adequada dessas cultivares nos diferentes ambientes de cultivo, uma vez que, a maturidade fenológica é bastante influenciada pelos fatores ambientais de latitude, altitude e clima (Alliprandini et al., 2009) de cada região.

O GMR é uma classificação amplamente utilizada para descrever o ciclo fenológico de cultivares de soja, baseada na resposta das plantas ao fotoperíodo e temperatura, fatores reguladores do florescimento e da maturidade (Alliprandini et al., 2009). O sistema GMR é uma adaptação do sistema norte-americano, que agrupa os genótipos em 13 classes (000, 00, 0, I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX e X) de faixas de adaptação, desde materiais extremamente precoces (grupo 000, altas latitudes) até os mais tardios (grupo X, latitude 0°) (Heatherly e Emore, 2004). No Brasil, a classificação foi convertida para uma escala numérica contínua, variando de 5,0 (cultivares precoces) a 9,0 (cultivares tardias), facilitando o posicionamento regional das cultivares e o planejamento de cruzamentos (Alliprandini et al., 2009).

Além de fatores genéticos inerentes a cada GMR, a expressão fenotípica é bastante influenciada por variáveis ambientais. Na soja, os principais efeitos ambientais relacionados com a mudança no comportamento fenológico são, a

temperatura, horas de luz e precipitação (He et al., 2020), bem como tipo de solo e práticas agrícolas (Romeiko et al., 2020), afetando também a produtividade e caracteres relacionados à composição de sementes (Sobko et al., 2020).

Considerando essas interações complexas, metodologias estatísticas adequadas tornam-se fundamentais. O uso de modelos mistos via REML/BLUP (máxima verossimilhança residual ou restrita / melhores preditores lineares não-viesados), de acordo com Resende (2016), apresenta vantagens para programas de melhoramento vegetal, como a capacidade de trabalhar com dados desbalanceados, estimar componentes de variação com precisão, predizer valores genéticos não-viesados com acurácia, além de permitir a análise de diferentes estruturas experimentais e a inclusão de covariáveis ambientais nos modelos.

Apesar dos avanços, ainda existem lacunas no entendimento do comportamento fenológico da soja frente à interação entre grupos de maturidade relativa e variáveis ambientais. Diante desse contexto, objetivou-se com o presente trabalho: (i) caracterizar a resposta de populações de soja quanto ao número de dias para a maturidade (NDM) em cruzamentos amplos e estreitos em relação ao grupo de maturidade relativa (GMR); (ii) selecionar linhagens com dupla aptidão para produtividade e precocidade por meio de REML/BLUP em cada população; e (iii) verificar o efeito da precipitação e da temperatura sobre o ciclo fenológico dessas populações.

6 CONCLUSÃO

A população E1 apresentou maior variabilidade fenotípica quanto ao NDM, englobando genótipos de ciclo precoce a ciclo tardio, reflexo do contraste do GMR entre seus genitores. A população E2 mostrou menor variabilidade entre as linhagens e predominância de genótipos precoces, caracterizando-se pela uniformidade, enquanto a população E3 também apresentou uniformidade, porém com linhagens predominantemente tardias, fruto de genitores pouco contrastantes quanto ao GMR.

A utilização dos modelos mistos via REML/BLUP foi eficiente para predizer valores genéticos e possibilitou a identificação de linhagens com dupla aptidão, conciliando precocidade e elevada produtividade dentro de cada população, confirmando a aplicabilidade da metodologia em programas de melhoramento de soja.

As Populações E1 e E2 foram mais sensíveis às variações ambientais de precipitação e temperatura, enquanto a população E3 demonstrou menor influência dessas covariáveis sobre o ciclo das linhagens, sugerindo que genótipos precoces são mais suscetíveis às mudanças climáticas, enquanto genótipos tardios tendem a apresentar maior estabilidade fenológica.

REFERÊNCIAS

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

Amaral LO (2021) **Redes Neurais Artificiais Aplicadas na Predição de Valores Genéticos e Classificação de Genótipos de Soja de Diferentes Grupos de Maturidade Relativa**. 76 f. Tese (Doutorado em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas) - Unesp, Jaboticabal.

Bates D, Mächler M, Bolker BM, Walker SC (2015) Fitting linear mixed-effects models using lme4. **Journal of Statistical Software** 67(1): 1–48. https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01

Bianchi MC, Bruzi AT, Soares IO, Ribeiro FDO, Gesteira GDS (2020) Heritability and the genotype × environment interaction in soybean. **Agrosystems, Geosciences & Environment** 3: e20020. https://doi.org/10.1002/agg2.20020

Bizari EH, Val BHP, Pereira EM, Di Mauro AO, Unêda-Trevisoli SH (2017) Selection indices for agronomic traits in segregating populations of soybean. **Revista Ciência Agronômica** 48(1): 110–117. https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170012

Bonato ER, Bonato ALV (1987) **A soja no Brasil: história e estatística**. Londrina: Embrapa-CNPSo, 61 p. (Documentos, 21).

Bubans VE, Carvalho IR, Ceolin C, Moura NB, Lautenchleger F, Conceição GM, Da Silva JAG, Treter RJ (2021) Relative maturity group and its relationships with the non-preferential sowing season in soybean. **Agronomy Science and Biotechnology** 7: 1–14. https://doi.org/10.33158/ASB.r121.v7.2021

Capistrano MC, Andrade Neto RC, Santos VB, Lessa LS, Resende MDV, Mesquita AGG, Gurgel FL (2021) Use of the REML/BLUP methodology for the selection of sweet orange genotypes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 56: e02032. https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02032

Cattelan AJ, Dall'Agnol A (2018) The rapid soybean growth in Brazil. **OCL**, 25: D102. https://doi.org/10.1051/ocl/2017058.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Produção de grãos é estimada em 330,3 milhões de toneladas na safra 2024/25**. Brasília: CONAB, 2025a. Disponível em: https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/producao-de-graos-e-estimada-em-330-3-milhoes-de-toneladas-na-safra-2024-25. Acesso em: 20 jul. 2025.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Soja em números (safra 2024/25)**. Brasília: CONAB, 2025b. Disponível em: https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos. Acesso em 02 jun. 2025.

Covarrubias-Pazaran G (2025) **lme4breeding: Relationship-based mixed-effects models**, version 1.0.63. CRAN, Vienna, Austria.

Diers BW, Specht J, Rainey KM, Cregan P, Song Q, Ramasubramanian V, Graef G, Nelson R, Schapaugh W, Wang D, Shannon G, McHale L, Kantartzi SK, Xavier A, Mian R, Stupar RM, Michno JM, An YQC, Goettel W, Ward R, Fox C, Lipka AE, Hyten D, Cary T, Beavis WD (2018) Genetic architecture of soybean yield and agronomic traits. **G3: Genes, Genomes, Genetics** 8: 3367–3375. https://doi.org/10.1534/g3.118.200332

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Características da soja**. Brasília: Embrapa, 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/pre-producao/caracteristicas-da-especie-e-relacoes-com-o-ambiente/caracteristicas-da-soja#:~:text=Possuem%20folhas%20trifolioladas%20(exceto%20o,cor%20branca%2C%20roxa%20ou%20intermedi%C3%A1ria. Acesso em:16 jun. 2025.

Farias JRB, Nepomuceno AL, Neumaier N (2007) **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja. (Circular Técnica, 48).

Federer WT (1956) Augmented (or hoonuiaku) designs. **Hawaiian Planter's Record** 55: 191–208.

Fehr WR, Caviness CE (1977) **Stages of soybean development. Ames**: Iowa State University of Science and Technology, 11 p.

Gonçalves GMC, Ferreira-Gomes RL, Lopes ÂCA, Vieira PFMJ (2020) Adaptability and yield stability of soybean genotypes by REML/BLUP and GGE biplot**. Crop Breeding and Applied Biotechnology** 20(2): e282920217. https://doi.org/10.1590/1984-70332020v20n2a33

Gong L, Tian B, Li Y, Wu S (2021) Phenological changes of soybean in response to climate conditions in frigid region in China over the past decades. **International Journal of Plant Production** 15: 363–375. https://doi.org/10.1007/s42106-021-00145-5

He L, Jin N, Yu Q (2020) Impacts of climate change and crop management practices on soybean phenology changes in China. **Science of the Total Environment** 707: 135638. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135638

Heatherly LG, Elmore RW (2004) Managing inputs for peak production. In: Boerma HR, Specht JE (Eds.) **Soybeans: improvement, production and uses**. 3rd ed. Madison: American Society of Agronomy, p. 451–536.

Henderson CR (1975) Best linear unbiased estimation and prediction under a selection model. **Biometrics** 31: 423–447. https://www.jstor.org/stable/2529430

Ibrahim JG, Zhu H, Garcia RI, Guo R (2011) Fixed and random effects selection in mixed effects models. **Biometrics** 67: 495–503. https://doi.org/10.1111/j.1541-0420.2010.01463.x

Jean M, Cober E, O'Donoughue L, Rajcan I, Belzile F (2021) Improvement of key agronomical traits in soybean through genomic prediction of superior crosses**. Crop Science** 61: 3908–3918. https://doi.org/10.1002/csc2.20583

Lima RF, Aparecido LEO, Torsoni GB, Rolim GS (2023) Climate change assessment in Brazil: utilizing the Köppen-Geiger (1936) climate classification. **Revista Brasileira de Meteorologia** 38: e38230001. https://doi.org/10.1590/0102-77863810001

Lin X, Liu B, Weller JL, Abe J, Kong F (2021). Molecular mechanisms for the photoperiodic regulation of flowering in soybean. **Journal of Integrative Plant Biology** 63: 981–994. https://doi.org/10.1111/jipb.13021

Liu X, Wu J, Ren H, Qi Y, Li C, Cao J, Zhang X, Zhang Z, Cai Z, Gai J (2017) Genetic variation of world soybean maturity date and geographic distribution of maturity groups. **Breeding Science** 67: 221–232. https://doi.org/10.1270/jsbbs.16167

Liu Y, Dai L (2020) Modelling the impacts of climate change and crop management measures on soybean phenology in China. **Journal of Cleaner Production** 262: 121271. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121271

Mathur S, Seo B, Reddy KR, Reddy VR (2024) Morpho-phenological responses of early and late soybean maturity groups to diverse day lengths and temperature regimes. **Industrial Crops & Products** 221: 119362. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119362

Nataraj V, Bhartiya A, Singh CP, Devi HN, Deshmukh MP, Verghese P, Singh K, Mehtre SP, Kumari V, Maranna S, Kumawat G, Ratnaparkhe MB, Satpute GK, Rajesh V, Chandra S, Ramteke R, Khandekar N, Gupta S (2021) WAASB-based stability analysis and simultaneous selection for grain yield and early maturity in soybean. **Agronomy Journal** 113: 3089–3099. https://doi.org/10.1002/agj2.20750

Neumaier N, James AT (1993) Exploiting the long juvenile trait to improve adaptation of soybeans to the tropics. **Food Legume Newsletter** 18: 12–14.

Oteros J, García-Mozo H, Botey R, Mestre A, Galán C (2015) Variations in cereal crop phenology in Spain over the last twenty-six years (1986–2012). **Climatic Change** 130: 545–558. https://doi.org/10.1007/s10584-015-1363-9

Pagano MC, Miransari M (2016) The importance of soybean production worldwide. In: Miransari M (Ed.) **Abiotic and biotic stresses in soybean production: soybean production**. Cambridge, MA: Academic Press, p. 1–26. https://doi.org/10.1016/C2014-0-00087-1

Patterson HD, Thompson R (1971) Recovery of inter-block information when block sizes are unequal. **Biometrika** 58: 545–554. https://www.jstor.org/stable/2334389

Poudel S, Adhikari B, Dhillon J, Reddy KR, Stetina SR, Bheemanahalli R (2023) Quantifying the physiological, yield, and quality plasticity of southern USA soybeans under heat stress. **Plant Stress** 9: 100195. https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100195

R Core Team (2024) **R: A language and environment for statistical computing.** Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Disponível em: https://www.R-project.org/.

Resende MDV (2016) Software Selegen-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding. **Crop Breeding and Applied Biotechnology** 16: 330–339. https://doi.org/10.1590/1984-70332016v16n4a49

Romeiko XX, Lee EK, Sorunmu Y, Zhang X (2020) Spatially and temporally explicit life cycle environmental impacts of soybean production in the U.S. Midwest. **Environmental Science & Technology** 54: 4758–4768. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06874

Seixas CDS, Neumaier N, Balbinot Junior AA, Krzyzanowski FC, Leite RMVC (Eds.) (2020**) Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 347 p. (Sistemas de Produção, 17).

Silva EVV, Bruzi AT, Silva FDS, Marques FS (2022) Genotypic and phenotypic parameters associated with early maturity in soybean. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 57: e02545. https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.02545

Smith AB, Cullis BR, Thompson R (2005) The analysis of crop cultivar breeding and evaluation trials: an overview of current mixed model approaches. **Journal of Agricultural Science** 143: 449–462. https://doi.org/10.1017/S0021859605005587

Sobko O, Stahl A, Hahn V, Zikeli S, Claupein W, Gruber S (2020) Environmental effects on soybean (*Glycine max* (L.) Merr) production in Central and South Germany. **Agronomy** 10: 1847. https://doi.org/10.3390/agronomy10121847

Sugiyama A, Ueda Y, Takase H, Yazaki K (2015) Do soybeans select specific species of *Bradyrhizobium* during growth? **Communicative & Integrative Biology** 8: e992734. https://doi.org/10.4161/19420889.2014.992734.

Sulistyo A, Purwantoro, Sari KP (2018) Correlation, path analysis and heritability estimation for agronomic traits contribute to yield on soybean. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science** 102: 012034. https://doi.org/10.1088/1755-1315/102/1/012034

Szareski VJ, Carvalho IR, Kehl K, Levien AM, Nardino M, Dellagostin SM, Demari GH, Lautenchleger F, Villela FA, Pedó T, Souza VQ, Aumonde TZ (2018) Adaptability and stability of wheat genotypes according to the phenotypic index of seed vigor. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 53(6): 727–735. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000600009

Teixeira FG, Hamawaki OT, Nogueira APO, Hamawaki RL, Hamawaki CL, Mattos TP, Silveira IC, Medeiros LA (2017) Inheritance of precocity and of agronomic characters in soybean. **Genetics and Molecular Research** 16(4): gmr16039842. https://doi.org/10.4238/gmr16039842

Todeschini MH, Milioli AS, Rosa AC, Dallacorte LV, Panho MC, Marchese JA, Benin G (2019) Soybean genetic progress in South Brazil: physiological, phenological and agronomic traits. **Euphytica** 215: 124. https://doi.org/10.1007/s10681-019-2439-9

Val BHP (2018) **Estudo Genético e Seleção de Progênies de Soja para o Grupo de Maturidade Relativa em Populações Derivadas de Cultivares Comerciais**. 60 f. Tese (Doutorado em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas) - Unesp, Jaboticabal.

Vogel JT, Liu W, Olhoft P, Crafts-Brandner SJ, Pennycooke JC, Christiansen N (2021) Soybean yield formation physiology – A foundation for precision breeding based improvement. **Frontiers in Plant Science** 12:719706. doi: 10.3389/fpls.2021.719706

Wilcox JR (2004) World distribution and trade of soybean. In: Boerma HR, Specht JE (Eds.) **Soybeans: improvement, production and uses**. 3rd ed. Madison: American Society of Agronomy, p. 1–14.

Woyann LG, Meira D, Matei G, Zdziarski AD, Dallacorte LV, Madella LA, Benin G (2020) Selection indexes based on linear-bilinear models applied to soybean breeding. **Agronomy Journal** 112(2): 1002–1009. https://doi.org/10.1002/agj2.20044

Yang W, Wu T, Zhang X, Song W, Xu C, Sun S, Hou W, Jiang B, Han T, Wu C (2019) Critical photoperiod measurement of soybean genotypes in different maturity groups. **Crop Science** 59:2055–2061. https://doi.org/10.2135/cropsci2019.03.0170