

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

ANDERSON SIMIONATO MILIOLI

**GANHO GENÉTICO EM CARACTERES AGRONÔMICOS,
FENOLÓGICOS E BIOQUÍMICOS DE SOJA NO BRASIL**

TESE

PATO BRANCO

2021

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

ANDERSON SIMIONATO MILIOLI

**GANHO GENÉTICO EM CARACTERES AGRONÔMICOS,
FENOLÓGICOS E BIOQUÍMICOS DE SOJA NO BRASIL**

TESE

PATO BRANCO

2021

ANDERSON SIMIONATO MILIOLI

**GANHO GENÉTICO EM CARACTERES AGRONÔMICOS,
FENOLÓGICOS E BIOQUÍMICOS DE SOJA NO BRASIL**

**Genetic gain in agronomic, phenological and biochemical traits of soybean in
Brazil**

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia - Área de Concentração: Produção Vegetal da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Giovani Benin

PATO BRANCO

2021



Esta licença permite o download e o compartilhamento da obra desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-la ou utilizá-la para fins comerciais.



ANDERSON SIMIONATO MILIOLI

GANHO GENÉTICO EM CARACTERES AGRONÔMICOS, FENOLÓGICOS E BIOQUÍMICOS DE SOJA NO BRASIL

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutor Em Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Produção Vegetal.

Data de aprovação: 30 de Março de 2021

Prof Giovani Benin, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Carlos Lasaro Pereira De Melo, Doutorado - Embrapa Soja

Prof Jair Rogerio Unfried, Doutorado - Syngenta Seeds

Prof Raphael Rossi Silva, Doutorado - Tmg Tropical Melhoramento & Genética Ltda

Prof Welton Luiz Zaluski, Doutorado - Gdm Genética do Brasil Ltda

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 30/03/2021.

Aos meus pais, Vilmar e Maria Salete

Pelo carinho, apoio e educação

Dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela saúde, foco e motivação;

Aos meus pais, Vilmar e Maria Salete, e ao meu irmão Alison, que sempre me apoiaram e me incentivaram para que eu alcançasse meus objetivos;

Ao meu orientador Giovani Benin, pela paciência, amizade e valiosa orientação durante a graduação, mestrado e doutorado;

As empresas Embrapa Soja, Embrapa Trigo, GDM Genética, TMG Tropical Melhoramento e Genética, Fundação MT, Nidera e Syngenta, pela parceria na realização deste projeto;

A todos os colaboradores das empresas parceiras que auxiliaram no planejamento, condução e avaliação dos experimentos, em especial aos melhoristas/pesquisadores Jair Rogério Unfried, Nizio Fernando Giasson, Marcos Norio Matsumoto, Carlos Lasaro Pereira de Melo, Marcelo Fernandes de Oliveira, Paulo Fernando Bertagnolli, Carlos Alberto Arrabal Arias, Alexandre Garcia, Agnaldo Kunichiro Nouchi, Raphael Rossi Silva, Ivandro Bertan e Marcio Andrei Capelin, com quem tive mais contato durante a condução deste estudo;

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, principalmente aos integrantes do grupo de melhoramento genético vegetal, pelos vários anos de parceria e amizade;

Aos professores e funcionários da UTFPR, por todo conhecimento compartilhado desde a graduação até o doutorado;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de doutorado;

E a todos que de alguma forma contribuíram para mais esta conquista;

Muito Obrigado.

“The farther backward you can look, the farther forward you will see”

(Winston Churchill)

RESUMO

MILIOLI, Anderson Simionato. Ganho genético em caracteres agronômicos, fenológicos e bioquímicos de soja no Brasil. 84 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Área de Concentração: Produção Vegetal), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Pato Branco, 2021.

A soja é uma das principais culturas produzidas no âmbito mundial, e as produtividades obtidas a campo têm aumentado consideravelmente nas últimas décadas no Brasil. Para avaliar o ganho genético de caracteres agronômicos, fenológicos e bioquímicos, cultivares de soja lançadas entre 1966 e 2011 foram avaliadas nas principais regiões de cultivo do Brasil. Os ensaios foram conduzidos em 25 ambientes (local x ano) na região Sul, 14 na região Centro-Oeste e em oito nas regiões Norte e Nordeste, nas safras agrícolas 2016/17, 2017/18 e 2018/19. Os melhores preditores lineares não viesados (BLUP) de cada caractere foram obtidos via metodologia de modelos mistos. Os BLUPs e os anos de lançamento das cultivares foram utilizados nas análises de regressão para obtenção das taxas de ganho genético. As taxas de ganho linear para o rendimento de grãos na região Sul foram de 15,31, 13,83 e 14,13 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (0,42, 0,36 e 0,39% ano⁻¹) para o conjunto completo, precoce e médio de cultivares, respectivamente. O modelo quadrático também mostrou uma tendência de aumento nas taxas de ganho nos últimos anos da série histórica, embora o ajuste não foi significativo. Além disso, as novas cultivares apresentaram maior estatura de planta, teor de óleo, rendimento de óleo e proteína, e menor peso de mil sementes, período vegetativo, ciclo total e teor de proteína comparativamente às cultivares mais antigas, embora houve diferenças significativas entre as macrorregiões 1 e 2. Na região Centro-Oeste, as taxas de ganho linear para o rendimento de grãos foram de 17,55, 13,58, 21,84 e 20,83 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (0,62, 0,47, 0,77 e 0,69% ano⁻¹) para o conjunto completo, precoce, médio e tardio de cultivares, respectivamente. As novas cultivares apresentaram maior teor de óleo, rendimento de óleo e proteína, e menor teor de proteína e inserção de primeira vagem comparativamente às cultivares antigas. Também houve tendência de redução do ciclo e período vegetativo ao longo dos anos. Em relação às regiões Norte e Nordeste, não foram identificados ganhos significativos para a maioria dos caracteres avaliados. Os resultados obtidos evidenciam que os programas de melhoramento têm sido eficientes ao longo dos anos na melhoria da produtividade e de caracteres de importância em soja nas principais regiões produtoras do Brasil, e que platôs de produtividade ainda não foram alcançados.

Palavras-chave: *Glycine max* (L) Merrill. Progresso genético. BLUP. Rendimento de grãos.

ABSTRACT

MILIOLI, Anderson Simionato. Genetic gain in agronomic, phenological and biochemical traits of soybean in Brazil. 84 f. Thesis (Ph.D. in Agronomy) - Graduate Program in Agronomy (Concentration Area: Crop), Federal University of Technology – Paraná (UTFPR). Pato Branco, 2021.

Soybean is one of the main crops produced worldwide, and the on-farm yields has increased considerably in the last decades in Brazil. To evaluate the genetic gain for agronomic, phenological and biochemical traits, soybean cultivars released from 1966 to 2011 were evaluated in the main regions of soybean cultivation in Brazil. The field trials were conducted in 25 environments (site-year) in South region, 14 in Midwest region, and eight in North and Northeast regions in 2016/17, 2017/18 and 2018/19 crops seasons. The best linear unbiased predictors (BLUP) of each trait were obtained using a mixed linear model. The BLUPs and years of cultivar release were used in the regression analysis to obtain genetic gain rates. The linear gain rates for seed yield in South region were 15.31, 13.83 and 14.13 kg ha⁻¹ year⁻¹ (0.42, 0.36 and 0.39% year⁻¹) for the full, early and medium sets of cultivars, respectively. The quadratic model also showed a trend to increase the gain rates in the last years of the historical serie, although the fit was not significant. In addition, new cultivars presented more plant height, seed oil content, and oil and protein yield, and less seed weight, days to flowering, days to maturity and seed protein content than old ones, although there were significant differences between the macroregions 1 and 2. In the Midwest region, the linear gain rates for seed yield were 17.55, 13.58, 21.84 and 20.83 kg ha⁻¹ year⁻¹ (0.62, 0.47, 0.77 and 0.69% year⁻¹) for the full, early, medium and late sets of cultivars, respectively. The new cultivars presented more seed oil content, oil and protein yield, and less seed protein and lower first pod insertion than old ones. There was also a trend to reduce days to maturity and days to flowering over the years. Regarding the North and Northeast regions, were not identified significant gains for the most of the evaluated traits. The results shown that breeding programs has been efficient across the years to improve soybean yield and important traits in the main producing regions of Brazil, and that a yield plateau has not been reached yet.

Keywords: *Glycine max* (L) Merrill. Genetic progress. BLUP. Seed yield.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1** – Locais de condução dos ensaios nas macrorregiões sojícolas 1 e 2 da região Sul do Brasil, nas safras agrícolas 2016/17, 2017/18 e 2018/19. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021. 20
- Figura 2** – Locais de condução dos ensaios nas macrorregiões sojícolas 3, 4 e 5 das regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil, nas safras agrícolas 2016/17, 2017/18 e 2018/19. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.. 20
- Figura 3** – Regressões entre o ano de lançamento e o rendimento de grãos para o conjunto completo, precoce e médio de cultivares de soja avaliadas na região Sul do Brasil (A, B e C), macrorregião 1 (D, E e F) e 2 (G, H e I), respectivamente. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021. 28
- Figura 4** – Regressões entre o ano de lançamento e o peso de mil sementes (A, B e C), estatura de planta (D, E e F), índice de acamamento (G, H e I) e altura de inserção de primeira vagem (J, K e L) de cultivares de soja avaliadas na região Sul do Brasil, macrorregião 1 e 2, respectivamente. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021. 34
- Figura 5** – Regressões entre o ano de lançamento e o ciclo total (A, B e C), período vegetativo (D, E e F) e período reprodutivo (G, H e I) de cultivares de soja avaliadas na região Sul do Brasil, macrorregião 1 e 2, respectivamente. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021. 37
- Figura 6** – Regressões entre o ano de lançamento e o rendimento de grãos diário de cultivares de soja avaliadas na região Sul (A), macrorregião 1 (B) e 2 (C). UTFPR, Pato Branco - PR, 2021. 39
- Figura 7** – Regressões entre o ano de lançamento e o teor de óleo (A, B e C) e proteína (D, E e F) de cultivares de soja avaliadas na região Sul do Brasil, macrorregião 1 e 2, respectivamente. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021. 40
- Figura 8** – Regressões entre o ano de lançamento e o rendimento de óleo (A, B e C) e proteína (D, E e F) de cultivares de soja avaliadas na região Sul do Brasil, macrorregião 1 e 2, respectivamente. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021. 43
- Figura 9** – Coeficientes de correlação de Pearson entre o rendimento de grãos e caracteres agrônômicos, fenológicos e bioquímicos de cultivares de soja avaliadas na região Sul do Brasil. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021. 45
- Figura 10** – Regressões entre o ano de lançamento e o rendimento de grãos para o conjunto completo (A), precoce (B), médio (C) e tardio (D) de cultivares de soja avaliadas na macrorregião 4 da região Centro-Oeste do Brasil. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021. 48
- Figura 11** – Regressões entre o ano de lançamento e o peso de mil sementes (A), estatura de planta (B), índice de acamamento (C), altura de inserção de primeira vagem (D), ciclo total (E), período vegetativo (F), período reprodutivo (G), teor de óleo (H) e proteína (I) de cultivares de soja avaliadas na macrorregião 4 da região Centro-Oeste do Brasil. UTFPR, Pato Branco – PR, 2021. 52
- Figura 12** – Regressões entre o ano de lançamento e o rendimento de óleo (A) e proteína (B) de cultivares de soja avaliadas na macrorregião 4 da região Centro-Oeste do Brasil. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021. 54
- Figura 13** – Coeficientes de correlação de Pearson entre o rendimento de grãos e caracteres agrônômicos, fenológicos e bioquímicos de cultivares de soja avaliadas na macrorregião 4 da região Centro-Oeste do Brasil. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021. 55
- Figura 14** – Regressão entre o ano de lançamento e o rendimento de grãos de cultivares de soja avaliadas nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021. 58
- Figura 15** – Regressões entre o ano de lançamento e o peso de mil sementes (A), estatura de planta (B), índice de acamamento (C), altura de inserção de primeira vagem (D), ciclo total (E), período vegetativo (F), período reprodutivo (G), teor de óleo (H) e proteína (I) de cultivares de soja avaliadas nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021. 59

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** – Ano de lançamento, grupo de maturação, tipo de crescimento, tecnologia e empresa obtentora das cultivares de soja avaliadas nas regiões Sul, Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil nas safras agrícolas 2016/17, 2017/18 e 2018/19. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021. 17
- Tabela 2** – Macrorregiões (MR), regiões edafoclimáticas (REC), latitudes (Lat.), longitudes (Long.), altitudes (Alt.) e número de ensaios conduzidos em cada local nas regiões Sul, Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil nas safras agrícolas 2016/17, 2017/18 e 2018/19. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021..... 21
- Tabela 3** – Número total de ambientes (local x ano) em que cada caractere agrônômico, fenológico e bioquímico foi avaliado nas regiões Sul, Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil, nas safras agrícolas 2016/17, 2017/18 e 2018/19. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021. 21
- Tabela 4** – Estimativas dos componentes da variância associados ao efeito de genótipo, ambiente e interação genótipo x ambiente, para caracteres agrônômicos, fenológicos e bioquímicos de cultivares de soja avaliadas nas regiões Sul, macrorregião 1 e 2 do Brasil. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021. 27
- Tabela 5** – Estimativas dos componentes da variância associados ao efeito de genótipo, ambiente e interação genótipo x ambiente para caracteres agrônômicos, fenológicos e bioquímicos de cultivares de soja avaliadas na macrorregião 4 da região Centro-Oeste do Brasil. UTFPR, Pato Branco – PR, 2021. 47
- Tabela 6** – Estimativas dos componentes da variância associados ao efeito de genótipo, ambiente e interação genótipo x ambiente para caracteres agrônômicos, fenológicos e bioquímicos de cultivares de soja avaliadas nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021..... 56

LISTA DE SIGLAS, ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS

%	Porcentagem
Alt.	Altitude
Amb	Ambiente
ano ⁻¹	por Ano
BA	Unidade da Federação – Bahia
BLUP	<i>Best Linear Unbiased Predictor</i>
CLT	Ciclo Total
cm	Centímetro
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
Conv.	Convencional
Coodetec	Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola
CPAC	Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados
CV	Coefficiente de Variação
Det.	Determinado
dia ⁻¹	por Dia
Emater GO	Agência Goiana de Assistência Técnica, Extensão Rural e Pesquisa Agropecuária
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Emgopa	Empresa Goiana de Pesquisa Agropecuária
EP	Estatuta de Planta
EPAMIG	Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais
ESA	Escola Superior de Agricultura
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
Fundação MT	Fundação Mato Grosso
g	Grama
GDM	Grupo DonMario
Gen	Genótipo
Gen x Amb	Interação Genótipo x Ambiente
GM	Grupo de Maturação
GO	Unidade da Federação – Goiás
ha	Hectare
ha ⁻¹	por Hectare
IA	Índice de Acamamento
IAC	Instituto Agrônomo de Campinas
IAPAR	Instituto Agrônomo do Paraná
Ind.	Indeterminado
IPEAME	Instituto de Pesquisa Agropecuária Meridional
IPEAS	Instituto de Pesquisa Agropecuária do Sul
IPV	Inserção de Primeira Vagem
kg	Kilogramas
kg ha ⁻¹	Kilogramas por Hectare
kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	Kilogramas por Hectare por Ano
Lat.	Latitude
Long.	Longitude
LPC	Lei de Proteção de Cultivares

m	Metro
m ²	Metro Quadrado
m ⁻²	por Metro Quadrado
M1	Macrorregião 1
M2	Macrorregião 2
M3	Macrorregião 3
M4	Macrorregião 4
M5	Macrorregião 5
MA	Unidade da Federação – Maranhão
MR	Macrorregião
MS	Unidade da Federação – Mato Grosso do Sul
MT	Unidade da Federação – Mato Grosso
NIR	<i>Near Infrared Reflectance</i>
Ocepar	Organização das Cooperativas do Estado do Paraná
<i>p</i>	Probabilidade de Erro
PA	Unidade da Federação – Pará
PI	Unidade da Federação – Piauí
PI	<i>Plant Introduction</i>
PMS	Peso de Mil Sementes
PR	Unidade da Federação – Paraná
PR	Período Reprodutivo
PV	Período Vegetativo
PVP	<i>Plant Variety Protection</i>
<i>r</i>	Coefficiente de Correlação
R1	Estágio Fenológico de Início do Florescimento
R ²	Coefficiente de Determinação
R8	Estágio Fenológico de Maturação Plena
REC	Região Edafoclimática
REML	<i>Restricted Maximum Likelihood</i>
Rep	Repetição
RG	Rendimento de Grãos
RNC	Registro Nacional de Cultivares
RO	Unidade da Federação – Rondônia
ROL	Rendimento de Óleo
RPR	Rendimento de Proteína
RR1	<i>Roundup Ready 1</i>
RR2 IPRO	<i>Roundup Ready 2</i>
RS	Unidade da Federação – Rio Grande do Sul
S.Det.	Semideterminado
TMG	TMG Tropical Melhoramento e Genética
TO	Unidade da Federação – Tocantins
TOL	Teor de Óleo
TPR	Teor de Proteína
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UREMG	Universidade Rural do Estado de Minas Gerais
VCU	Valor de Cultivo e Uso
VE	Estágio Fenológico de Emergência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	04
2 REVISÃO DE LITERATURA	07
2.1 A CULTURA DA SOJA	07
2.2 GANHO GENÉTICO	09
2.2.1 Caracteres Agronômicos.....	10
2.2.2 Caracteres Fenológicos	14
2.2.3 Caracteres Bioquímicos.....	15
3 MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1 CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	17
3.2 CARACTERES AVALIADOS.....	22
3.2.1 Caracteres Agronômicos.....	22
3.2.2 Caracteres Fenológicos	22
3.2.3 Caracteres Bioquímicos.....	23
3.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
4.1 REGIÃO SUL.....	26
4.1.1 Caracterização dos Ambientes	26
4.1.2 Ganho Genético para o Rendimento de Grãos.....	28
4.1.3 Caracteres Agronômicos.....	33
4.1.4 Caracteres Fenológicos	36
4.1.5 Caracteres Bioquímicos.....	40
4.1.6 Correlação entre Caracteres.....	44
4.2 REGIÃO CENTRO-OESTE	46
4.2.1 Caracterização dos Ambientes	46
4.2.2 Ganho Genético para o Rendimento de Grãos.....	47
4.2.3 Caracteres Agronômicos, Fenológicos e Bioquímicos	51
4.2.4 Correlação entre Caracteres.....	54
4.3 REGIÃO NORTE E NORDESTE	56
4.3.1 Caracterização dos Ambientes	56
4.3.2 Ganho Genético para o Rendimento de Grãos.....	57
4.3.3 Caracteres Agronômicos, Fenológicos e Bioquímicos	58
5 CONCLUSÕES	61
REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é caracterizada com uma das principais culturas produzidas em larga escala no âmbito mundial, representando uma importante fonte de óleo e proteína vegetal, e sendo componente de inúmeros produtos na indústria alimentícia em todo o mundo (LOPES et al., 2002; SANTOS et al., 2011; KOESTER et al., 2014; 2016). Além da alimentação humana, seus principais usos incluem a produção de rações e biocombustíveis, sendo uma das principais *commodities* comercializadas atualmente.

A produção mundial de soja na safra 2019/20 foi de 339,42 milhões de toneladas (USDA, 2021), safra em que o Brasil passou a ocupar o posto de maior produtor mundial, com 124,84 milhões de toneladas (CONAB, 2021). Estados Unidos e Argentina completam o *ranking* dos maiores produtores mundiais, com produções de 96,67 e 48,80 milhões de toneladas anuais, respectivamente. Juntos, os três países são responsáveis por aproximadamente 80% do volume total de soja produzido em todo o mundo (USDA, 2021). Vale destacar, também, que os aumentos de produção no Brasil e Argentina, principalmente nas duas últimas décadas, tornaram a América do Sul a maior região produtora em escala global (DE FELIPE et al., 2016), representando mais de 50% do volume total produzido no âmbito mundial (USDA, 2021).

Embora os primeiros relatos do cultivo da soja no Brasil datem o ano de 1882, foi somente após a década de 1970 que a cultura começou a apresentar importância econômica significativa no país. Inicialmente, o cultivo da soja foi concentrado na região Sul (Latitudes 22 – 30° S), em uma área de apenas 6,95 milhões de hectares e produção de 12,15 milhões de toneladas, utilizando introduções americanas (PIs - *Plant Introductions*) oriundas do Sul dos Estados Unidos (SPECHT et al., 2014; CONAB, 2020). A partir de então, seu cultivo começou a expandir e a soja passou de uma cultura secundária para uma das mais importantes do agronegócio brasileiro, presente nas diversas regiões produtoras do país e tornando o Brasil o maior produtor mundial na última safra.

Atualmente, as regiões Centro-Oeste e Sul do Brasil são as de maior importância em termos de produção e área cultivada. Na safra 2019/20, foram registradas produções de 60,70 e 35,29 milhões de toneladas produzidos em 16,64 e 12,09 milhões de hectares, respectivamente. Estas regiões são responsáveis por aproximadamente 77% do volume total produzido no âmbito nacional. No entanto, nos últimos anos, também houve significativa expansão da cultura para as regiões Norte e Nordeste do país, as quais também passaram a apresentar importância significativa na produção nacional, com 18,72 milhões de toneladas

produzidas em 5,47 milhões de hectares (CONAB, 2021).

Além da expansão da área cultivada, a produtividade da cultura no Brasil também tem aumentado consideravelmente ao longo dos anos, passando de 1748 kg ha⁻¹ na safra 1976/77 para 3379 kg ha⁻¹ na safra 2019/20 (CONAB, 2020). Os aumentos de produtividade obtidos ao longo dos anos são resultado das melhorias nas práticas agronômicas da cultura, bem como, da atuação dos programas de melhoramento, que foram responsáveis pelo lançamento de cultivares cada vez mais produtivas e que atendessem às necessidades dos produtores.

Várias instituições têm contribuído para o lançamento de cultivares de soja no Brasil. Inicialmente, o setor público foi responsável por grande parte dos esforços do melhoramento, incluindo instituições de pesquisa estaduais e nacionais, bem como universidades. Posteriormente, associações público-privadas de sucesso também foram desenvolvidas, além de outras instituições, incluindo fundações privadas e cooperativas, que também contribuíram para o desenvolvimento de cultivares. No entanto, o número de cultivares lançadas no Brasil apresentou um aumento significativo a partir da aprovação da Lei de Proteção de Cultivares de 25 de abril de 1997 (BRASIL, 1997; SPECHT et al., 2014). Esta lei permitiu que os investimentos de grandes empresas nacionais e multinacionais se tornassem viáveis, as quais, inicialmente, não mostravam interesse no mercado brasileiro devido à ausência de legislação regulatória. Estes investimentos incluíam o estabelecimento de programas de melhoramento e avanços em biotecnologia, que têm contribuído significativamente para o ganho genético na cultura nos últimos anos (SPECHT et al., 2014).

Diversos estudos recentes, conduzidos em importantes países produtores, principalmente, nos Estados Unidos, Argentina e China, têm relatado ganho genético positivo para a cultura da soja (RINCKER et al., 2014; ROGERS et al., 2015; WU et al., 2015; DE FELIPE et al., 2016; WANG et al., 2016; BOEHM Jr. et al., 2019). No Brasil, vários autores também encontraram ganhos genéticos significativos (TOLEDO et al., 1990; ALLIPRANDINI et al., 1993; RUBIN e SANTOS, 1996; LANGE e FEDERIZZI, 2009; PAGLIOSA, 2016), sendo relatadas taxas de ganho de até 71,5 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (3,49% ano⁻¹) considerando o período entre 1979 e 1999, e de até 84,32 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (3,25% ano⁻¹) entre 2001 e 2014. No entanto, as taxas de ganho obtidas no Brasil, ao longo de décadas de melhoramento e envolvendo uma ampla área de cultivo, ainda são desconhecidas.

Além do rendimento de grãos, estudos realizados em vários países produtores

também têm relatado ganho genético para outros caracteres de interesse, via seleção direta ou indireta. Dentre os principais caracteres de importância em soja, foram relatados estudos para o peso de mil sementes (SPECHT e WILLIAMS, 1984; MORRISON et al., 2000; QIN et al., 2017), número de sementes por planta (JIN et al., 2010), sementes por vagem (CUI e YU, 2005; JIN et al., 2010), vagens por planta (KAHLON e BOARD, 2012), nós por planta (YU et al., 2009; RAMTEKE et al., 2011; KAHLON e BOARD, 2012), estatura (USTUN et al., 2001; KEEP et al., 2016), índice de acamamento (LUEDDERS, 1977; VOLDENG et al., 1997; ROGERS et al., 2015), inserção de primeira vagem (WU et al., 2015; WANG et al., 2016), período vegetativo (ROWNTREE et al., 2014; DE FELIPE et al., 2016), período reprodutivo (ROWNTREE et al., 2014; WU et al., 2015), ciclo total (KARMAKAR e BHATNAGAR, 1996; COBER e VOLDENG, 2012; LIU et al., 2012; DE FELIPE et al., 2016), teor e rendimento de óleo e proteína (USTUN et al., 2001; RINCKER et al., 2014; BOEHM Jr. et al., 2019), entre outras características de importância agrônômica.

A avaliação do ganho genético em soja, envolvendo as principais regiões de cultivo brasileiras e utilizando um conjunto de cultivares oriundo de cinco décadas de melhoramento, é inédita no Brasil. Estas informações são importantes, por permitirem identificar as principais melhorias que ocorreram em caracteres de interesse ao longo dos anos, via seleção direta ou indireta. Os objetivos do presente estudo foram determinar o ganho genético para o rendimento de grãos nas principais regiões de cultivo de soja no Brasil; avaliar o ganho genético de caracteres agrônômicos, fenológicos e bioquímicos de importância agrônômica e; identificar quais caracteres apresentaram associação com a produtividade de grãos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A CULTURA DA SOJA

A soja (*Glycine max* L. Merrill) é uma das principais oleaginosas produzidas no âmbito mundial. Sua importância está relacionada principalmente aos elevados teores de óleo e proteína que apresenta, sendo matéria-prima de inúmeros produtos na indústria alimentícia (LOPES et al., 2002; SANTOS et al., 2011; KOESTER et al., 2014; 2016). Além da alimentação humana, seu uso também se destina a inúmeros fins, incluindo, principalmente, a produção de rações para alimentação animal e biocombustíveis. Seus inúmeros usos aliados a uma demanda crescente, fazem da cultura uma das principais *commodities* comercializadas mundialmente.

Na safra 2019/20, o Brasil se tornou o maior produtor mundial de soja com 124,84 milhões de toneladas (CONAB, 2021), superando a produção de 96,67 milhões de toneladas dos EUA, que até a safra 2018/19 era o maior produtor mundial (USDA, 2021). Além disso, o Brasil também é o maior exportador mundial, com 82,97 milhões de toneladas de grãos exportadas em 2020, o que corresponde a 66,46% da produção nacional (AGROSTAT, 2021). A Argentina é o terceiro maior produtor, com 48,80 milhões de toneladas produzidas na última safra. Assim, Brasil, EUA e Argentina são responsáveis por aproximadamente 80% da produção mundial de soja, que, na última safra, foi de 339,42 milhões de toneladas (USDA, 2021). Vale destacar, também, que a América do Sul se tornou a maior região produtora em escala global nas últimas décadas, sendo responsável por mais de 50% da soja produzida em todo o mundo (DE FELIPE et al., 2016).

A cultura da soja somente começou a apresentar importância econômica significativa no Brasil após a década de 1970, com áreas de cultivo concentradas, principalmente, na região Sul do país. Inicialmente, o cultivo foi realizado utilizando introduções (PIs - *Plant Introductions*) americanas oriundas do Sul dos EUA, que eram adaptadas a latitudes que variavam entre 22 e 30° S (SPECHT et al., 2014). Assim, os primeiros genótipos cultivados não eram adaptados às regiões de baixas latitudes, pois o fotoperíodo curto causava florescimento precoce, reduzindo o desenvolvimento das plantas e comprometendo a produtividade de grãos (ALMEIDA et al., 1999).

Frente às limitações do cultivo desta cultura em regiões de baixas latitudes, tais como o Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil, os programas de melhoramento

desempenharam um papel fundamental no desenvolvimento de cultivares adaptadas para estas regiões. Neste sentido, o principal desafio das décadas de 1970 e 1980 foi o desenvolvimento de cultivares adaptadas às condições de dias curtos. Isso só foi possível com a identificação e entendimento do período juvenil longo, sendo a solução encontrada para retardar o florescimento nestas condições (HARTWIG e KIIHL, 1979; ALMEIDA et al., 1999). Após essa descoberta, foi possível realizar o cultivo da soja em regiões antes inexploradas com a cultura no Brasil, introduzindo a agricultura moderna nas extensas áreas planas do Cerrado (SPECHT et al., 2014).

Após a expansão da soja para as regiões de baixas latitudes, a produção nacional tem aumentado a cada safra, e a cultura tem se tornado uma das mais importantes no agronegócio brasileiro. Na safra 1976/77, a área plantada com soja na região Centro-Oeste foi de apenas 378 mil hectares, passando para 16,64 milhões de hectares na safra 2019/20. Atualmente, a região Centro-Oeste que compreende grandes estados produtores como MT, GO e MS, responde por aproximadamente 48,6% do volume total produzido no país, com 60,70 milhões de toneladas na última safra. Somente o estado do Mato Grosso, que é o maior produtor nacional, responde por ~28,7% da produção do país, com 35,88 milhões de toneladas produzidas (CONAB, 2020; 2021).

As regiões Norte e Nordeste também apresentaram grande expansão na área cultivada, principalmente, nos últimos anos. Os primeiros registros de cultivo comercial de soja nestas regiões são das safras 1979/80 no Nordeste e 1985/86 no Norte do país, com áreas de 1900 e 400 hectares cultivados nos estados da BA e RO, respectivamente. Apenas na última década, houve aumento na área plantada de 0,57 para 2,11 milhões de hectares na região Norte, que compreende, principalmente, os estados produtores do TO, PA e RO. Em relação à região Nordeste, que tem como principais estados produtores a BA, MA e PI, houve aumento de 1,86 para 3,36 milhões de hectares na última década. Como resultado, a produção na região Norte/Nordeste passou de 7,0 para 18,7 milhões de toneladas de grãos entre as safras 2009/10 e 2019/20 (CONAB, 2020). Estes números destacam a importância do desenvolvimento de cultivares adaptadas para as regiões de baixas latitudes, permitindo à cultura romper barreiras geográficas.

Além da expansão em área cultivada, principalmente após a introdução da soja nas regiões do Cerrado brasileiro, a produtividade da cultura também aumentou consideravelmente nesse período. Segundo dados históricos da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2020), houve aumento na média nacional de 1748 kg ha⁻¹ na safra

1976/77 para 3379 kg ha⁻¹ na safra 2019/20, resultado das melhorias nas práticas agronômicas da cultura e da disponibilização de cultivares mais produtivas ao longo dos anos.

O aumento crescente da produção no âmbito nacional, bem como, a maior capacidade competitiva da cultura, estão diretamente relacionados com os avanços científicos e a disponibilização de tecnologias para o setor produtivo (COSTA et al., 2004). A atuação dos programas de melhoramento tem um papel fundamental no aumento da produção ao longo dos anos, atendendo às demandas por cultivares adaptadas às diferentes regiões de cultivo do país. Estes fatores possibilitaram ao Brasil estar hoje na posição de maior produtor e exportador mundial de soja.

2.2 GANHO GENÉTICO

O ganho genético obtido pelos programas de melhoramento, juntamente com as melhorias das práticas agronômicas, tem sido responsável pelos aumentos de produtividade em diversas culturas de importância econômica no Brasil e no mundo (SPECHT e WILLIAMS, 1984). O ganho ou progresso genético pode ser definido como as alterações ocorridas em caracteres de interesse, após cada ciclo de seleção, ocorrendo em magnitude e sentido variados dependendo da estratégia e dos critérios de seleção utilizados (REIS et al., 2004). Neste sentido, uma das principais atribuições dos melhoristas é identificar os critérios de seleção capazes de promover as alterações no sentido desejado (REIS et al., 2004).

Os programas de melhoramento têm sido fundamentais para suprir as demandas constantes por maiores produtividades, com a seleção de genótipos cada vez mais produtivos a partir da geração de variabilidade e ampliação da base genética da cultura (COSTA et al., 2004). Além do rendimento de grãos, várias características de interesse também têm sido consideradas no processo de seleção. No entanto, a seleção de genótipos superiores para vários caracteres simultaneamente apresenta algumas limitações, pois a maioria dos caracteres de importância em soja são quantitativos e altamente influenciados pelo ambiente, além de serem inter-relacionados, fazendo com que a seleção de um caractere alvo resulte em alterações indiretas nos demais (CRUZ, 2001; COSTA et al., 2004). Neste sentido, o conhecimento das correlações existentes entre caracteres é importante no processo de seleção.

As estimativas de ganho genético permitem quantificar o progresso obtido em determinado período de tempo e fornecem informações importantes, como por exemplo, a

possibilidade de comparar os ganhos obtidos com diferentes estratégias de seleção e/ou em diferentes ambientes (SPECHT e WILLIAMS, 1984). Segundo Toledo et al. (1990), quando ocorrem ganhos genéticos negativos em determinados anos, grupos de maturação ou locais específicos, é um indicativo de que a seleção precisa ser aperfeiçoada ou a metodologia proposta precisa de ajustes. Estas informações auxiliam os melhoristas na compreensão dos avanços obtidos e permitem a elaboração de estratégias e adoção de novos métodos com o intuito de aumentar a eficiência do programa (LANGE e FEDERIZZI, 2009).

Para o conhecimento das taxas de ganho genético obtidas, estudos têm sido conduzidos para várias culturas de importância econômica em diversos países. Vários métodos têm sido propostos para a estimação das taxas de ganho, tais como os métodos com ensaios multilocais (método original, original com ponderação, e que utilizam um genótipo referência), método de regressão com dados originais, métodos que utilizam testemunha como fator de correção, bem como o método direto. O método direto consiste em comparar cultivares lançadas em diferentes décadas no mesmo ano agrícola e em vários ambientes (FARIA et al., 2007). Segundo Cox et al. (1988), a melhor forma de estimar as taxas de ganho genético ao longo do tempo, é avaliar um conjunto histórico de cultivares em ambientes comuns. Para isso, os autores enfatizam que os ensaios devem ser conduzidos em condições de campo; as avaliações devem ser realizadas em parcelas comparáveis; as cultivares da série histórica devem ser comparadas simultaneamente; e as cultivares de cada grupo de maturação devem ser avaliadas em sua região de adaptação (COX et al., 1988; SLAFER et al., 1994; JIN et al., 2010). Este método tem sido utilizado nos principais estudos recentes de ganho genético em soja (RINCKER et al., 2014; ROGERS et al., 2015; WU et al., 2015; DE FELIPE et al., 2016; WANG et al., 2016; BOEHM Jr. et al., 2019).

2.2.1 Caracteres Agronômicos

O rendimento de grãos tem sido o caractere alvo do melhoramento das principais culturas de importância econômica. Estudos conduzidos no Brasil e em outros países, têm relatado ganho genético positivo para várias culturas, tais como milho (VENCOVSKY et al., 1988; FERNANDES e FRAZON, 1997; ARIAS e RAMALHO, 1998; STORCK et al., 2005), trigo (COX et al., 1988; TRETOWAN et al., 2002; RODRIGUES et al., 2007; CARGNIN et al., 2009; BECHE et al., 2014; BORNHOFEN et al., 2018; WOYANN et al., 2019), arroz (AMORIM NETO et al., 1998; BRESEGHELLO et al., 1999; SOARES et al., 1999; ATROCH

e NUNES, 2000; PENG et al., 2000; DO VALE et al., 2012), feijão (ABREU et al., 1994; RIBEIRO et al., 2003; MATOS et al., 2007; CHIORATO et al., 2010), aveia-branca (BARBOSA NETO et al., 2000), entre outras.

Em soja, estudos realizados em todo o mundo também têm apresentado resultados positivos, demonstrando a eficiência que os programas de melhoramento têm obtido ao longo dos anos para a melhoria da produtividade da cultura. Em estudos recentes realizados nos EUA, vários autores têm relatado ganho genético significativo em soja. Rincker et al. (2014) avaliando genótipos lançados entre 1923 e 2008, relataram ganhos de 23,1, 22,8 e 19,5 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para os grupos de maturação II, III e IV, respectivamente. Da mesma forma, Rogers et al. (2015) observaram ganho médio de 16,8 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para cultivares lançadas entre as décadas de 1920 e 2000. Em um estudo mais recente realizado por Boehm Jr. et al. (2019), foram observados ganhos de 17,6, 13,5 e 10,3 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para os grupos de maturação V, VI e VII, respectivamente, com ganho médio de 13,7 kg ha⁻¹ ano⁻¹. Em estudos mais antigos conduzidos nos EUA, as taxas de ganho foram similares, variando de 13,7 a 18,7 kg ha⁻¹ ano⁻¹, dependendo da região, grupo de maturação e período estudado (BOERMA, 1979; SALADO-NAVARRO et al., 1993; USTUN et al., 2001).

Ganho genético positivo para o rendimento de grãos em soja também foi relatado em estudos conduzidos na China e Argentina, importantes países produtores. Jin et al. (2010) avaliando um período de 56 anos de melhoramento na China, entre os anos de 1950 e 2006, observaram ganho de 10,83 kg ha⁻¹ ano⁻¹. Wu et al. (2015) relataram ganhos entre 5,8 e 16,2 kg ha⁻¹ ano⁻¹ entre os anos de 1923 e 2007, variando de acordo com a região avaliada. Da mesma forma, Wang et al. (2016) avaliando cultivares lançadas entre 1929 a 2004 encontraram resultado semelhante, com ganho médio de 9,97 kg ha⁻¹ ano⁻¹. No entanto, em estudos recentes conduzidos na Argentina, as taxas de ganho obtidas foram superiores às observadas em outros países, com ganhos médios de ~43 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (DE FELIPE et al., 2016; 2020). Em trabalhos realizados no Canadá (10,2 a 20,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹) e Índia (23,1 kg ha⁻¹ ano⁻¹), também foram observados resultados similares aos relatados em outros países (MORRISON et al., 2000; RAMTEKE et al., 2011; COBER e VOLDENG, 2012).

No Brasil, estudos avaliando o ganho genético em soja também foram realizados, principalmente, na região Sul do país. No entanto, as estimativas de ganho obtidas têm variado consideravelmente entre grupos de maturação (GM), períodos e regiões avaliadas. Toledo et al. (1990), avaliando ensaios de linhagens desenvolvidas entre 1981 e 1986 no Paraná, relataram

ganhos de 45,1 e 36,8 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (1,80 e 1,32% ano⁻¹) para os GM precoce e semiprecoce, respectivamente. Em um estudo similar realizado por Alliprandini et al. (1993), avaliando ensaios de linhagens entre 1986 e 1990 no Paraná, relataram ganhos de 24,16, 10,83 e -8,17 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (0,89, 0,38 e -0,28% ano⁻¹) para os grupos precoce, semiprecoce e médio, respectivamente, estimativas inferiores às obtidas nos cinco anos anteriores por Toledo et al. (1990). Rubin e Santos (1996) avaliando um período de 40 anos de melhoramento no estado do Rio Grande do Sul, observaram taxas de ganho de 17,7, 5,1 e 22,7 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para os GM precoce, médio e semitardio/tardio, respectivamente. O ganho médio observado pelos autores considerando o conjunto completo de cultivares foi de 19,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (1,1% ano⁻¹). Da mesma forma, Lange e Federizzi (2009) relataram ganhos variando entre 0,0 e 71,5 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (0,0 e 3,49% ano⁻¹) no estado do Rio Grande do Sul, os quais variaram em função do GM e região avaliada, considerando o período entre 1979 e 1999. Em um estudo mais recente realizado por Pagliosa (2016), avaliando ensaios de Valor de Cultivo e Uso (VCU) com genótipos convencionais e transgênicos entre as safras 2001/02 e 2013/14, foram relatadas diferenças significativas nas taxas de ganho obtidas. As estimativas absolutas de ganho variaram de -13,01 a 84,32 kg ha⁻¹ ano⁻¹, dependendo do grupo de ambientes avaliados (acima e abaixo de 700 m), grupos de maturação (precoce, semiprecoce e médio) e conjunto de genótipos testados (convencionais e transgênicos).

Embora os principais estudos de ganho genético em soja no Brasil foram realizados na região Sul, estudos na região Centro-Oeste também têm sido conduzidos. Em trabalho realizado por Mezzalira (2017), avaliando ensaios de VCU com genótipos do grupo de maturação 8 nas macrorregiões 3 e 4, foi observado ganho médio de 18,3 kg ha⁻¹ ano⁻¹ entre as safras 2006/07 e 2015/16, indicando que também houve ganho positivo para a cultura nessa região. Estes resultados demonstram, que os programas de melhoramento nacionais têm sido eficientes ao longo dos anos no desenvolvimento de cultivares mais produtivas para diferentes regiões do país.

Vale destacar, também, que, apesar do rendimento de grãos ter sido o caractere alvo do melhoramento da soja e das principais culturas de importância econômica, os aumentos de produtividade foram acompanhados por alterações em diversos outros caracteres, via seleção direta ou indireta. Dentre os caracteres agrônômicos de importância em soja, vários autores têm relatado que as novas cultivares têm apresentado redução da estatura e maior resistência ao acamamento. Segundo Rincker et al. (2014), a seleção para redução do acamamento também tem favorecido a redução da estatura das plantas, uma vez que cultivares mais altas tendem a

acamar mais. Essa tendência tem sido observada em estudos conduzidos nos EUA (RINCKER et al., 2014; ROGERS et al., 2015; KEEP et al., 2016), China (JIN et al., 2010; WANG et al., 2016), Índia (KARMAKAR e BHATNAGAR, 1996), Canadá (MORRISON et al., 2000), entre outros. No entanto, em alguns casos, aumentos na estatura das plantas ao longo dos anos também tem sido observado, dependendo do grupo de maturação e período avaliado. Em estudo realizado por Wilcox (2001), avaliando linhagens dos grupos de maturação I ao IV, conduzidos por um período de seis décadas no Norte dos EUA e Canadá, foi observado aumento na estatura das plantas apenas para o grupo de maturação I. Da mesma forma, Specht e Williams (1984) avaliando os grupos de maturação 00 ao IV nos EUA, relataram aumento na estatura apenas para o grupo 00. Na China, Wu et al. (2015) observaram decréscimo na estatura das plantas entre 1923 e 2000, mas aumento após o ano 2000, embora sem alterações no acamamento.

Vários estudos também têm demonstrado que os incrementos de produtividade da cultura têm sido acompanhados por aumentos no número de sementes por vagem, vagens por planta e/ou sementes por planta (MORRISON et al., 2000; CUI e YU, 2005; JIN et al., 2010; KAHLON e BOARD, 2012; WU et al., 2015; WANG et al., 2016; TODESCHINI et al., 2019). Estes caracteres têm sido considerados por muitos autores, como os que mais contribuíram para os aumentos de produtividade ao longo dos anos. Além disso, alguns autores também têm relatado, que as maiores produtividades das novas cultivares foram favorecidas pelo aumento no número de nós, os quais também favoreceram o aumento no número de vagens e sementes por unidade de área (YU et al., 2009; KAHLON et al., 2011; KAHLON e BOARD, 2012).

Além dos caracteres agronômicos destacados anteriormente, outro caractere de importância em soja é o peso de mil sementes, sendo também um importante componente do rendimento. Apesar de alguns estudos realizados nos EUA (SPECHT e WILLIAMS, 1984) e China (WANG et al., 2016; QIN et al., 2017) terem relatado aumento ao longo dos anos, em vários trabalhos conduzidos no Canadá (MORRISON et al., 2000), China (JIN et al., 2010), Argentina (DE FELIPE et al., 2016) e EUA (RINCKER et al., 2014; BOEHM Jr. et al., 2019), não foram identificados ganhos para este caractere em soja. A ausência de ganhos diretos para o peso de mil sementes, na maioria dos estudos anteriormente citados, possivelmente seja resultado da ausência de correlação positiva deste caractere com o rendimento de grãos e demais componentes, como já observado em vários trabalhos (EGLI et al., 1978; MORRISON et al., 2000; JIN et al., 2010; DE FELIPE et al., 2016; BOEHM Jr. et al., 2019). Neste sentido, a

seleção de genótipos superiores para vários caracteres se torna dificultada, pois os mesmos são inter-relacionados, fazendo com que a seleção de um caractere resulte em alterações indiretas nos demais (CRUZ, 2001; COSTA et al., 2004).

2.2.2 Caracteres Fenológicos

Estudos conduzidos em vários países, também têm relatado alterações em caracteres fenológicos ao longo dos anos. Diversos trabalhos têm demonstrado, que cultivares modernas apresentaram redução no período vegetativo (ROWNTREE et al., 2014; WU et al., 2015; DE FELIPE et al., 2016) e no ciclo total comparativamente às mais antigas (USTUN et al., 2001; COBER e VOLDENG, 2012; LIU et al., 2012). Além disso, em estudo conduzido por Karmakar e Bhatnagar (1996) na Índia, avaliando genótipos desenvolvidos entre 1969 e 1993, os autores observaram que, apesar do ciclo total ter sido reduzido, houve um aumento no período de enchimento de grãos das novas cultivares. Resultado semelhante foi relatado por Rowntree et al. (2014) em um estudo realizado nos EUA, onde os autores também observaram aumento no período de enchimento de grãos com o passar dos anos.

Apesar de vários estudos terem mostrado uma tendência de redução do ciclo nas novas cultivares, alguns trabalhos realizados nos EUA também têm relatado aumento deste caractere ao longo dos anos. Rincker et al. (2014) observaram que as novas cultivares apresentaram um ciclo mais longo comparativamente às cultivares mais antigas, considerando o período entre 1923 e 2008. Segundo os autores, cultivares com ciclo mais longo tendem a produzir mais, por estenderem o período de fotossíntese e assimilarem mais carbono. Comportamento semelhante foi relatado por Keep et al. (2016), que também observaram aumento no ciclo total das cultivares entre 0,5 e 1,5 dias por década, considerando o período compreendido entre as décadas de 1920 e 2010. Além disso, alguns autores também têm relatado que dependendo do grupo de genótipos avaliado, não foram observadas alterações no ciclo entre cultivares antigas e modernas. Rogers et al. (2015) avaliando cultivares lançadas entre 1928 e 2008 nos EUA, não identificaram alterações significativas para este caractere.

Vale destacar, que as alterações fenológicas ocorridas ao longo dos anos, também podem ser dependentes dos objetivos dos programas de melhoramento e, em muitos casos, são observadas em grupos de maturação específicos. Como exemplo, pode-se citar um estudo recente realizado por Pagliosa (2016), avaliando ensaios de VCU entre as safras 2001/02 e 2013/14 na região meridional do Brasil. Neste estudo, foi observada redução do período

vegetativo em genótipos transgênicos dos grupos semi-precoce e médio, no entanto, não houve alteração significativa para genótipos do grupo precoce. Da mesma forma, houve redução do ciclo total para os grupos semi-precoce e médio, mas para os genótipos do grupo precoce o mesmo permaneceu constante ao longo dos anos.

2.2.3 Caracteres Bioquímicos

O grande interesse pela cultura da soja no âmbito mundial, se deve principalmente aos seus elevados teores de óleo e proteína, sendo utilizada como matéria-prima em inúmeros produtos nos mais diversos setores da indústria (SANTOS et al., 2011). Neste sentido, a cultura é considerada uma das principais fontes destes componentes, e alterações em suas concentrações são de grande importância para a indústria de processamento, pois apresentam um impacto direto sobre a qualidade dos produtos finais (RINCKER et al., 2014).

Estudos realizados na América do Norte, têm demonstrado que estes caracteres apresentaram alterações significativas ao longo dos anos. Voldeng et al. (1997), avaliando um conjunto de genótipos lançados entre 1934 e 1992 no Canadá, observaram incrementos nos teores de óleo e diminuição de proteína com o passar dos anos. Resultado semelhante foi relatado por Morrison et al. (2000), utilizando cultivares representativas de sete décadas de melhoramento. O mesmo autor, em um estudo mais recente (MORRISON et al., 2008), relatou que a concentração de óleo aumentou $0,24\% \text{ ano}^{-1}$, enquanto que a proteína reduziu $0,15\% \text{ ano}^{-1}$, considerando um período de 58 anos de melhoramento no Canadá. Nos EUA, vários trabalhos também têm confirmado essa mesma tendência com o passar dos anos (ROWNTREE et al., 2013; RINCKER et al., 2014; ROGERS et al., 2015). No entanto, Boehm Jr. et al. (2019), avaliando cultivares dos grupos de maturação V, VI e VII lançadas entre 1928 e 2008, observaram redução nos teores de proteína apenas para o GM VI, e ausência de significância nos teores de óleo para todos os GM estudados, indicando que o resultado também pode ser dependente do grupo de genótipos avaliados.

Em estudos conduzidos na América do Sul, os resultados encontrados também têm sido similares. Bonato et al. (2000), avaliando cultivares da região Sul do Brasil, relataram que a maioria das cultivares lançadas após 1990 apresentaram maiores teores de óleo e menores teores de proteína em relação às mais antigas. Da mesma forma, em um estudo mais recente realizado na Argentina por De Felipe et al. (2016), os autores também observaram redução de

proteína nas cultivares modernas, mas sem diferenças significativas para os teores de óleo. Apesar de algumas exceções, a maioria dos estudos já realizados tem demonstrado claramente aumento nos teores de óleo e redução de proteína ao longo dos anos, indicando que a seleção para maiores produtividades alterou indiretamente estes caracteres (MORRISON et al., 2000; ROWNTREE et al., 2013; RINCKER et al., 2014; ROGERS et al., 2015). Correlações negativas entre os teores de proteína com os teores de óleo e rendimento de grãos têm sido amplamente relatadas (COBER e VOLDENG, 2000; MORRISON et al., 2000; USTUN et al., 2001; ROGERS et al., 2015; DE FELIPE et al., 2016; BOEHM Jr. et al., 2019), o que poderia explicar o comportamento observado ao longo dos anos para estes caracteres.

Identificar o ganho genético em caracteres agronômicos, fenológicos e bioquímicos, fornece um indicativo do quanto os programas de melhoramento têm contribuído para a melhoria da cultura. Embora os esforços do melhoramento ao longo dos anos terem sido direcionados, principalmente, à seleção de genótipos mais produtivos, resistentes às principais pragas e doenças, e adaptados às diferentes regiões de cultivo, diversos caracteres de importância agronômica têm sido melhorados de maneira direta ou indireta.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Foram avaliadas 29 cultivares de soja na região Sul, 38 na região Centro-Oeste e 11 cultivares nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, disponibilizadas para cultivo entre os anos de 1966 e 2011. As cultivares foram selecionadas por sua importância em cada década, sendo responsáveis por uma ampla área de cultivo durante seu período de recomendação, incluindo cultivares convencionais e com a tecnologia *Roundup Ready 1* (RR1) (Tabela 1).

Tabela 1 – Ano de lançamento, grupo de maturação, tipo de crescimento, tecnologia e empresa obtentora das cultivares de soja avaliadas nas regiões Sul, Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil nas safras agrícolas 2016/17, 2017/18 e 2018/19. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.

Cultivar	Ano de Lançamento ¹	Grupo de Maturação ²	Tipo de Crescimento ³	Tecnologia ⁴	Empresa Obtentora ⁵
<i>Região Sul</i>					
Davis	1966	6.7	Det.	Conv.	IPEAS (PI)
Bragg	1966	6.9	Det.	Conv.	IPEAS (PI)
Paraná	1972	6.0	Det.	Conv.	IPEAME (PI)
IAS 5	1973	6.4	Det.	Conv.	IPEAS (PI)
BR 4	1979	7.2	Det.	Conv.	IPEAS/Embrapa
BR 6 (Nova Bragg)	1981	6.8	Det.	Conv.	Embrapa
Ocepar 4 (Iguaçu)	1984	6.8	Det.	Conv.	Ocepar
BR 16	1987	6.4	Det.	Conv.	Embrapa
FT Abyara	1988	7.2	Det.	Conv.	FT Pesquisa e Sementes
Embrapa 48	1995	6.8	Det.	Conv.	Embrapa
CD 202	1996	6.4	Det.	Conv.	Coodetec
BRS 133	1997	7.4	Det.	Conv.	Embrapa
CD 206	1999	6.8	Det.	Conv.	Coodetec
CD 208	1999	6.8	Det.	Conv.	Coodetec
BRS 184	2001	6.7	Det.	Conv.	Embrapa
CD 215	2002	5.9	Det.	Conv.	Coodetec
BRS 232	2003	6.9	Det.	Conv.	Embrapa
CD 214 RR	2003	6.7	Det.	RR1	Coodetec
BRS 284	2007	6.3	Ind.	Conv.	Embrapa
DMario 58i	2007	5.5	Ind.	RR1	GDM
DMario 70i	2007	6.4	Ind.	RR1	GDM
BMX Potência RR	2007	6.7	Ind.	RR1	GDM
BMX Titan RR	2007	5.3	Ind.	RR1	GDM

NK 7059 RR	2007	6.4	Ind.	RR1	Syngenta
NA 5909 RG	2008	6.2	Ind.	RR1	Nidera
NS 4823	2008	4.8	Ind.	RR1	Nidera
SYN 1059 RR	2010	5.9	Ind.	RR1	Syngenta
TMG 7161 RR	2010	5.9	Ind.	RR1	TMG
TMG 7262 RR	2011	6.2	S.Det.	RR1	TMG

Região Centro-Oeste

IAC 2	1967	8.5	Ind.	Conv.	IAC
Viçoja	1969	7.4	Det.	Conv.	UREMG/ESA/UFV (PI)
Paraná	1972	7.1	Det.	Conv.	IPEAME (PI)
FT Cristalina	1979	8.7	Ind.	Conv.	FT Pesquisa e Sementes
Doko ⁶	1980	9.5	Det.	Conv.	Embrapa
Emgopa 301	1981	8.1	Det.	Conv.	Embrapa/Emgopa
FT Estrela	1987	7.8	Ind.	Conv.	FT Pesquisa e Sementes
Emgopa 308	1993	8.7	Det.	Conv.	Emgopa
Emgopa 313	1993	8.8	Det.	Conv.	Emater GO
MT/BR-45 (Paiaguás)	1993	8.2	Det.	Conv.	Embrapa
MG/BR-46 (Conquista)	1995	8.1	Det.	Conv.	Embrapa/Fundação MT
Embrapa 48	1995	7.3	Det.	Conv.	Embrapa
MT/BR-53 (Tucano)	1996	9.0	Det.	Conv.	Embrapa/Fundação MT
MT/BR-51 (Xingu)	1996	8.5	Det.	Conv.	Embrapa/Fundação MT
BRSMT Uirapuru	1997	9.0	Det.	Conv.	Embrapa/Fundação MT
BRSMT Pintado	1998	8.5	Det.	Conv.	Embrapa/Fundação MT
M-Soy 9350	1999	9.3	Det.	Conv.	D&PL Brasil/Monsanto
FMT Tucunaré	2000	8.3	Det.	Conv.	Fundação MT
M-Soy 8866	2000	8.8	Det.	Conv.	D&PL Brasil/Monsanto
FMT Tabarana	2001	8.7	Det.	Conv.	Fundação MT
BRS Valiosa RR	2003	8.1	Det.	RR1	Embrapa
M9144 RR	2004	9.1	Det.	RR1	D&PL Brasil/Monsanto
P98Y11	2006	7.7	Det.	RR1	Dupont/Pioneer
P98Y51	2006	8.5	Det.	RR1	Dupont/Pioneer
TMG123RR	2007	7.4	Det.	RR1	TMG
BMX Potência RR	2007	6.7	Ind.	RR1	GDM
BRS 284	2007	6.3	Ind.	Conv.	Embrapa
ANTA 82	2008	7.4	S.Det.	RR1	TMG
NA 7337RR	2008	7.6	S.Det.	RR1	Nidera
TMG132RR	2008	8.5	Det.	RR1	TMG
NA 5909 RG	2008	6.9	Ind.	RR1	Nidera
98Y30	2009	8.3	Det.	RR1	Dupont/Pioneer
TMG1188RR	2010	8.8	S.Det.	RR1	TMG
8473 RSF	2011	7.4	Ind.	RR1	GDM
NS 7200	2011	7.2	Ind.	RR1	Nidera
NS 7901	2011	7.9	Ind.	RR1	Nidera
NS 8490	2011	8.4	Det.	RR1	Nidera
TMG4182	2011	8.2	Det.	Conv.	TMG

Região Norte/Nordeste

FT Cristalina	1979	8.7	Ind.	Conv.	FT Pesquisa e Sementes
Doko ⁶	1980	9.5	Det.	Conv.	Embrapa
MG/BR-46 (Conquista)	1995	8.1	Det.	Conv.	Embrapa/Fundação MT
MT/BR-53 (Tucano)	1996	9.0	Det.	Conv.	Embrapa/Fundação MT
BRSMT Uirapuru	1997	9.0	Det.	Conv.	Embrapa/Fundação MT
BRS Sambaíba	1998	9.3	Det.	Conv.	Embrapa
M-Soy 9350	1999	9.3	Det.	Conv.	D&PL Brasil/Monsanto
M-Soy 8866	2000	8.8	Det.	Conv.	D&PL Brasil/Monsanto
M9144 RR	2004	9.1	Det.	RR1	D&PL Brasil/Monsanto
TMG132RR	2008	8.5	Det.	RR1	TMG
TMG1188RR	2010	8.8/8.0	S.Det.	RR1	TMG

¹ Obtidos no site do Registro Nacional de Cultivares (RNC) e/ou em publicações de divulgação das empresas obtentoras.

² Obtidos em publicações e sites das empresas obtentoras e/ou estimados com base no ciclo médio no conjunto de ambientes avaliados.

³ Det.: Determinado; Ind.: Indeterminado; S.Det.: Semi-determinado.

⁴ Conv.: Convencional; RR1: *Roundup Ready 1*.

⁵ PI: *Plant Introduction*; IPEAS: Instituto de Pesquisa Agropecuária do Sul; IPEAME: Instituto de Pesquisa Agropecuária Meridional; Embrapa: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; ESA: Escola Superior de Agricultura; Ocepar: Organização das Cooperativas do Estado do Paraná; Coodetec: Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola; GDM: Grupo DonMario; TMG: TMG Tropical Melhoramento e Genética; IAC: Instituto Agronômico de Campinas; UREM: Universidade Rural do Estado de Minas Gerais; UFV: Universidade Federal de Viçosa; Emgopa: Empresa Goiana de Pesquisa Agropecuária; Emater GO: Agência Goiana de Assistência Técnica, Extensão Rural e Pesquisa Agropecuária; Fundação MT: Fundação Mato Grosso.

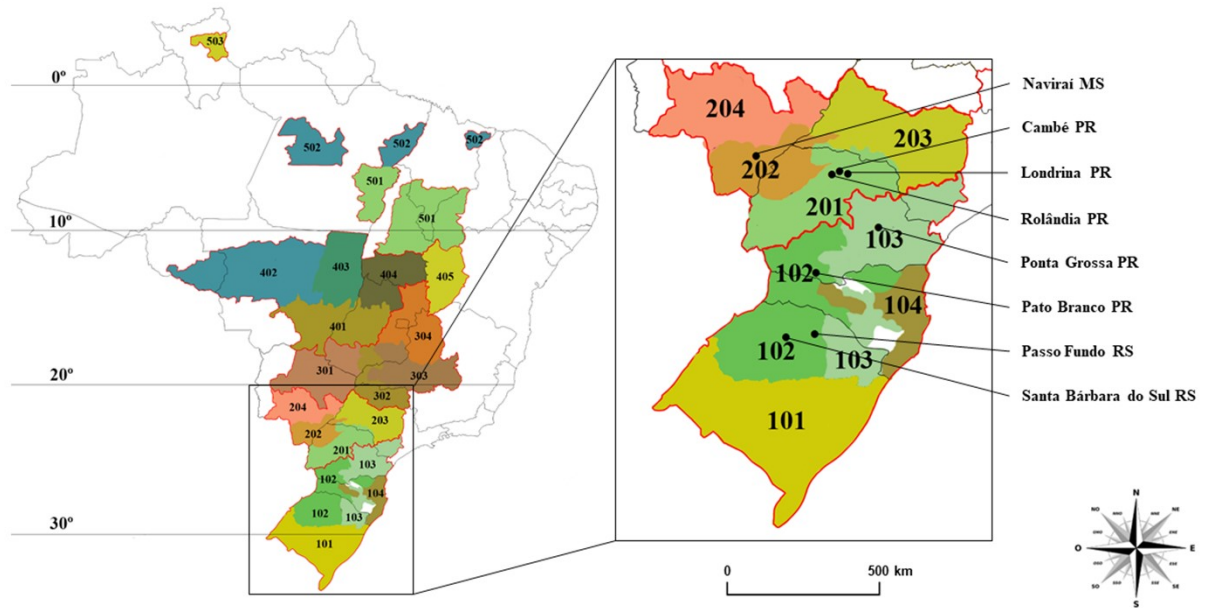
⁶ Desenvolvida pelo Centro Nacional de Pesquisa de Soja (CNPSo - Embrapa) em parceria com Emgopa, IAC, Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR), Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) e Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (CPAC).

Os ensaios foram conduzidos em locais representativos de cada macrorregião sojícola, nas safras agrícolas 2016/17, 2017/18 e 2018/19 (Figuras 1 e 2). As sementes para a condução dos ensaios foram obtidas do banco ativo de germoplasma da Embrapa Soja e das empresas obtentoras, sendo multiplicadas na entressafra (maio a agosto) na região Norte do Brasil antes de cada safra agrícola. Em Pato Branco - PR, os ensaios foram conduzidos na área experimental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR e, nas demais localidades, conduzidos nos locais de experimentação das empresas parceiras do projeto (Embrapa Soja, Embrapa Trigo, TMG Tropical Melhoramento e Genética, Fundação MT, GDM Genética, Nidera e Syngenta).

O delineamento experimental utilizado em todos os locais foi de blocos completos casualizados, com três repetições. As unidades experimentais foram compostas por 4 linhas de 5 m de comprimento, com espaçamento entre linhas de 0,5 m, totalizando uma área de 10 m² por parcela. A densidade de semeadura foi padronizada para 30, 40 e 46 sementes m⁻².

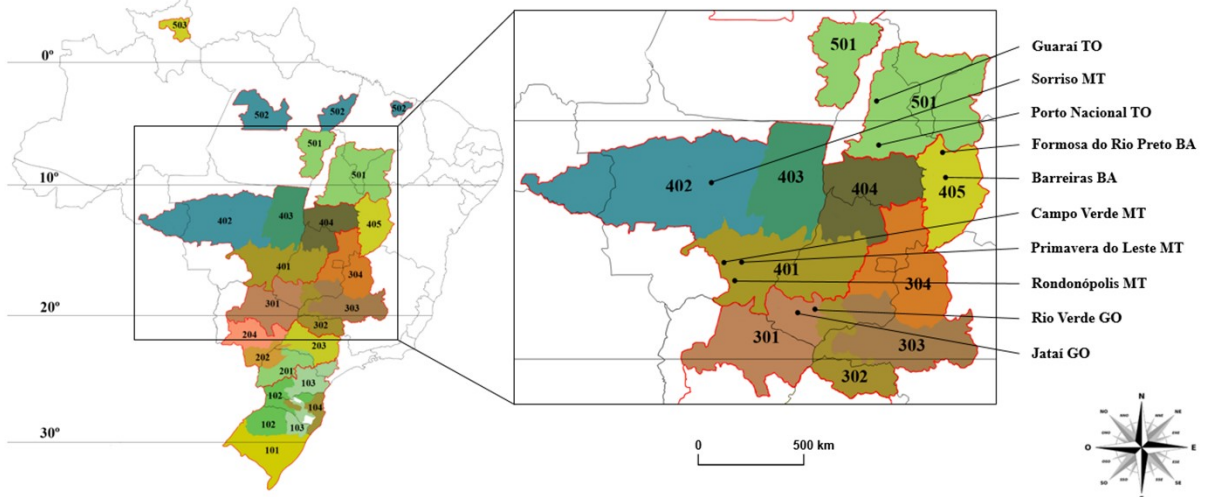
² para as regiões Sul, Centro-Oeste e Norte/Nordeste do Brasil, respectivamente. A semeadura foi realizada dentro do zoneamento agroclimático de cada região, sendo adequadas com os demais ensaios dos programas de melhoramento das empresas parceiras. A adubação de base foi realizada de acordo com a análise de solo de cada local, e as práticas culturais para o controle de pragas, doenças e plantas daninhas foram realizadas de acordo com as recomendações técnicas para a cultura.

Figura 1 – Locais de condução dos ensaios nas macrorregiões sojícolas 1 e 2 da região Sul do Brasil, nas safras agrícolas 2016/17, 2017/18 e 2018/19. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.



Adaptado de Kaster e Farias (2012).

Figura 2 – Locais de condução dos ensaios nas macrorregiões sojícolas 3, 4 e 5 das regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil, nas safras agrícolas 2016/17, 2017/18 e 2018/19. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.



Adaptado de Kaster e Farias (2012).

Durante a condução dos ensaios, houve locais onde os experimentos não foram conduzidos nas três safras, bem como, locais onde mais de um ensaio foi conduzido na mesma safra agrícola (Tabela 2). Portanto, cada combinação de local x ano foi considerada um ambiente na análise dos dados. O número total de ambientes (local x ano) em que cada caractere foi avaliado está apresentado na Tabela 3.

Tabela 2 – Macrorregiões (MR), regiões edafoclimáticas (REC), latitudes (Lat.), longitudes (Long.), altitudes (Alt.) e número de ensaios conduzidos em cada local nas regiões Sul, Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil nas safras agrícolas 2016/17, 2017/18 e 2018/19. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.

Locais ¹	MR	REC	Lat.	Long.	Alt.	2016/17	2017/18	2018/19
Pato Branco - PR	1	102	26,23 S	52,67 O	760 m	1	1	1
Passo Fundo - RS	1	102	28,26 S	52,41 O	690 m	2	2	1
Santa Bárbara do Sul - RS	1	102	28,36 S	53,25 O	510 m	1	1	1
Ponta Grossa - PR	1	103	25,10 S	50,16 O	970 m	1	1	1
Londrina - PR	2	201	23,31 S	51,16 O	590 m	1	1	1
Cambé - PR	2	201	23,28 S	51,28 O	497 m	-	1	1
Rolândia - PR	2	201	23,31 S	51,37 O	730 m	1	1	1
Naviraí - MS	2	202	23,07 S	54,19 O	360 m	1	1	1
Rio Verde - GO	3	301	17,80 S	50,93 O	710 m	-	1	-
Jataí - GO	3	301	17,88 S	51,72 O	696 m	-	-	1
Rondonópolis - MT	4	401	16,47 S	54,64 O	230 m	1	1	1
Campo Verde - MT	4	401	15,55 S	55,17 O	736 m	1	-	1
Primavera do Leste - MT	4	401	15,53 S	54,35 O	650 m	1	1	-
Sorriso - MT	4	402	12,55 S	55,71 O	370 m	2	2	2
Barreiras - BA	4	405	12,15 S	44,99 O	452 m	1	1	-
Formosa do Rio Preto - BA	4	405	11,04 S	45,19 O	490 m	1	-	1
Guaraí - TO	5	501	8,83 S	48,51 O	259 m	1	-	-
Porto Nacional - TO	5	501	10,71 S	48,42 O	210 m	1	1	1

¹ Ensaios com coeficientes de variação (CV) <20% e produtividades médias superiores a 2000 kg ha⁻¹.

Tabela 3 – Número total de ambientes (local x ano) em que cada caractere agrônomo, fenológico e bioquímico foi avaliado nas regiões Sul, Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil, nas safras agrícolas 2016/17, 2017/18 e 2018/19. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.

Caracteres	Região Sul	Região Centro-Oeste	Região Norte/Nordeste
<i>Agrônômicos</i>			
Rendimento de Grãos	25	14	8
Estatura de Planta	21	13	8
Índice de Acamamento	21	9	5
Peso de Mil Sementes	15	6	5
Inserção de Primeira Vagem	8	4	3

<i>Fenológicos</i>			
Ciclo Total	20	13	7
Período Vegetativo	20	11	7
Período Reprodutivo	18	11	6
<i>Bioquímicos</i>			
Teor de Óleo	18	9	4
Teor de Proteína	18	9	4
Rendimento de Óleo	18	9	4
Rendimento de Proteína	18	9	4

3.2 CARACTERES AVALIADOS

3.2.1 Caracteres Agronômicos

No estágio de maturação plena (R8 - FEHR e CAVINESS, 1977), foi avaliado o índice de acamamento (IA) a partir da atribuição de notas visuais utilizando uma escala entre 1 (planta totalmente ereta) e 9 (planta totalmente acamada). Os caracteres estatura de planta (EP) e altura de inserção de primeira vagem (IPV) foram mensurados a partir da superfície do solo até o ápice da haste principal e até a primeira vagem inferior da planta, respectivamente, em plantas representativas de cada parcela. O rendimento de grãos (RG) foi obtido a partir da colheita das duas linhas centrais de cada unidade experimental (5 m²), com posterior correção da umidade para 13% e estimativa para kg ha⁻¹. O peso de mil sementes (PMS) foi obtido a partir da contagem e pesagem de três repetições de 100 sementes, com posterior estimativa para 1000 sementes.

3.2.2 Caracteres Fenológicos

Os estádios fenológicos foram avaliados de acordo com a escala proposta por Fehr e Caviness (1977). Foram mensurados os estádios de emergência (VE), início do florescimento (R1) e maturação plena (R8). O período vegetativo foi determinado pelo período em dias entre VE e R1, o ciclo total pelo período entre VE e R8, e o período reprodutivo pelo período entre R1 e R8. Vale destacar que, visando a otimização da mão-de-obra nos programas de melhoramento das empresas parceiras, em alguns locais os estádios fenológicos R1 e R8, bem como os caracteres agronômicos EP e IA foram avaliados em uma repetição por ensaio.

3.2.3 Caracteres Bioquímicos

Após a colheita dos experimentos, foi realizada a separação de 50g de sementes limpas e íntegras de cada parcela para a determinação dos teores percentuais de óleo e proteína, expressos na base de 13% de umidade. Os locais mais representativos de cada região foram selecionados para a coleta das amostras e realização das análises. Após a separação das amostras de cada local, as mesmas foram enviadas para o laboratório da Embrapa Soja em Londrina - PR, onde os teores foram determinados via NIR (*Near Infrared Reflectance*), de acordo com a metodologia proposta por Heil (2010).

As leituras foram realizadas em quadruplicata, com equipamento Thermo (modelo Antaris II), equipado com esfera de integração com resolução de 4 cm⁻¹, média de 32 scans e *background* após cada leitura. A predição foi realizada utilizando modelos matemáticos desenvolvidos pela Embrapa Soja em 2011 e 2012, para os teores de óleo (170 padrões, coeficiente de correlação – *r* de 0,98 e erro padrão de calibração – RMSEC de 0,452) e proteína (180 padrões, coeficiente de correlação – *r* de 0,97 e erro padrão de calibração – RMSEC de 0,640) (QUIRINO et al., 2014). Para as análises estatísticas, foram utilizados os valores médios das quadruplicatas para cada repetição dos ensaios de campo.

Após a determinação dos teores percentuais de óleo e proteína, também foram calculados os seus rendimentos por unidade de área. Os rendimentos de cada cultivar foram obtidos a partir da multiplicação da porcentagem de óleo e proteína (base de 13% de umidade) pela produtividade de grãos de cada unidade experimental, sendo apresentados em kg ha⁻¹.

3.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para a realização das análises, os ensaios que apresentaram coeficientes de variação (CV) superiores a 20% e/ou médias inferiores a 2000 kg ha⁻¹ foram excluídos do conjunto de dados, sendo mantidos apenas os que apresentaram elevada qualidade experimental (Tabela 2). Além disso, considerando o conjunto desbalanceado de dados, comum em ensaios multi-ambientes, cada combinação de local x ano foi considerada como um ambiente.

As análises foram realizadas com o uso da metodologia de modelos mistos, considerando cultivar, ambiente, repetições dentro de cada ambiente e interação genótipo x ambiente como fatores aleatórios (RINCKER et al., 2014; DE FELIPE et al., 2016). Os modelos

lineares foram implementados com a função *lmer* do pacote *lme4* do R, utilizando a máxima verossimilhança restrita (REML - *restricted maximum likelihood*) para calcular os melhores preditores lineares não viesados (BLUP - *best linear unbiased predictors*) e estimar os componentes de variância (ALVARADO et al., 2015). Os BLUPs são os preditores de efeitos aleatórios nos modelos lineares mistos (WU et al., 2015).

Para a análise conjunta entre ambientes, e considerando o delineamento de blocos completos casualizados, o modelo utilizado foi:

$$Y_{ijkl} = \mu + \text{Amb}_i + \text{Rep}_j(\text{Amb}_i) + \text{Gen}_l + \text{Amb}_i \times \text{Gen}_l + \varepsilon_{ijkl}$$

onde Y_{ijkl} é o caractere avaliado, μ é o efeito da média, Amb_i é o efeito do i th ambiente, $\text{Rep}_j(\text{Amb}_i)$ é o efeito da j th repetição dentro do i th ambiente, Gen_l é o efeito do l th genótipo, $\text{Amb}_i \times \text{Gen}_l$ é o efeito da interação genótipo x ambiente, e ε_{ijkl} é o erro associado ao i th ambiente, j th repetição e l th genótipo, que é assumido com distribuição normal e independente, média zero e variância (σ^2) homocedástica (ALVARADO et al., 2015).

O ganho genético foi obtido a partir do método direto, que consiste em comparar cultivares lançadas em diferentes décadas nos mesmos ambientes (COX et al., 1988; FARIA et al., 2007). As estimativas anuais de ganho foram calculadas a partir de análises de regressão, utilizando os BLUPs de cada caractere avaliado (Y) com os anos de lançamento das cultivares (X). Para cada caractere, foram apresentadas as taxas de ganho absolutas e relativas. As taxas relativas foram calculadas a partir da divisão da taxa de ganho absoluta pelos valores preditos de cada caractere no início da série histórica, sendo expressos em porcentagem (BOERMA, 1979; DE FELIPE et al., 2016).

As estimativas de ganho para o rendimento de grãos, foram obtidas para o conjunto completo de cultivares avaliadas em cada região, bem como, separadamente, considerando seus grupos de maturação (GM). Para a região Sul, as 29 cultivares avaliadas foram divididas em dois grupos, com 13 cultivares precoces no grupo I (GM ≤ 6.3) e 16 médias no grupo II (GM 6.4 - 7.4). Em relação à região Centro-Oeste, o conjunto completo de 38 cultivares avaliadas foram divididas em três grupos, com 13 cultivares precoces no grupo I (GM ≤ 7.8), 14 médias no grupo II (GM 7.9 - 8.5) e 11 tardias no grupo III (GM ≥ 8.6). A separação dos grupos foi realizada de acordo com a classificação proposta por Kaster e Farias (2012). No entanto, para as regiões Norte e Nordeste do Brasil, em função do baixo número de genótipos avaliados, as análises foram realizadas considerando apenas o conjunto completo de cultivares.

Para a apresentação dos resultados, foram utilizados os BLUPs obtidos na análise conjunta, considerando todos os ambientes (local x ano) onde cada caractere foi avaliado. Foram testados os modelos de regressão simples e quadrática para todos os caracteres, com o intuito de identificar se as taxas de ganho foram constantes ou não ao longo da série histórica avaliada. Os parâmetros nos modelos de regressão linear e quadrática são os seguintes:

$$\text{Modelo Linear: } y = a + bx$$

$$\text{Modelo Quadrático: } y = a + bx + cx^2$$

onde y é a variável dependente (caracteres agrônômicos, fenológicos e bioquímicos); x é a variável independente (ano de lançamento); a é o intercepto; b e c são os coeficientes de regressão (inclinação ou *slope*) em diferentes fases da variável independente, respectivamente (WANG et al., 2016).

As análises via modelos mistos para a obtenção dos BLUPs e componentes de variância foram realizadas no *software* Meta-R (*Multi Environment Trial Analysis with R for Windows*) versão 6.0 (ALVARADO et al., 2015). As análises de regressão para obtenção das estimativas de ganho genético e a construção dos gráficos foram realizadas no *software* Sigmaplot, versão 11.0. Análises de correlação de Pearson entre os BLUPs dos caracteres avaliados também foram realizadas, a fim de identificar quais caracteres foram associados com o rendimento de grãos em cada região. Estas análises foram realizadas no *software* Genes (CRUZ, 2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 REGIÃO SUL

4.1.1 Caracterização dos Ambientes

Foi observada significância para o efeito de genótipo, ambiente e interação genótipo x ambiente para todos os caracteres avaliados, com exceção dos efeitos de genótipo e de ambiente para a altura de inserção de primeira vagem (IPV) na macrorregião 1 (Tabela 4). O rendimento de grãos variou de 3238 a 5540 kg ha⁻¹ na macrorregião 1, 2154 a 4931 kg ha⁻¹ na macrorregião 2, e de 2154 a 5540 kg ha⁻¹ considerando todos os ambientes (local x ano) avaliados na região Sul do Brasil. As respectivas médias gerais nestas regiões foram de 4308, 3876 e 4118 kg ha⁻¹ (Tabela 4).

As estimativas dos componentes de variância para o rendimento de grãos mostraram que o efeito de ambiente foi responsável pela maior parte da variância total em ambas as regiões avaliadas. O efeito de ambiente também foi responsável pela maior parte da variância para a maioria dos caracteres quando foi considerada toda a região Sul. Esse resultado se deve a existência de grandes diferenças nas condições de cultivo entre os ambientes avaliados, incluindo, principalmente, diferenças de latitudes, altitudes, tipos de solo, temperatura, pluviosidade e épocas de semeadura, o que influencia significativamente o comportamento dos genótipos e, conseqüentemente, a produtividade de grãos. Os ambientes avaliados nessa região, englobam latitudes que variam entre 23,07 e 28,36 S, e altitudes entre 360 e 970 m. Além disso, a elevada variância para o efeito da interação genótipo x ambiente indica a existência de diferenças no ranqueamento dos genótipos entre os ambientes, o que também é esperado para ensaios conduzidos em locais que abrangem uma ampla área de cultivo (Tabela 4).

Tabela 4 – Estimativas dos componentes da variância associados ao efeito de genótipo, ambiente e interação genótipo x ambiente, para caracteres agrônômicos, fenológicos e bioquímicos de cultivares de soja avaliadas nas regiões Sul, macrorregião 1 e 2 do Brasil. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.

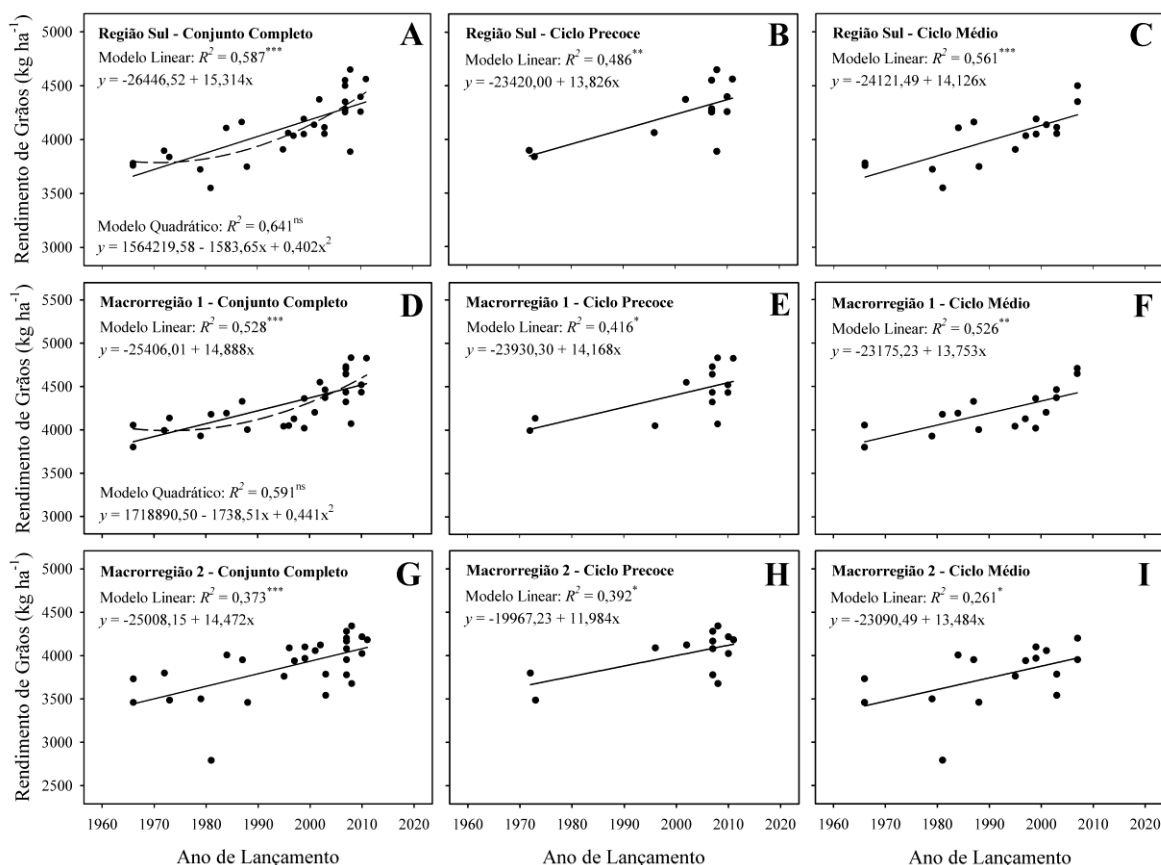
Fontes de Variação		Caracteres											
		<i>RG</i>	<i>PMS</i>	<i>IPV</i>	<i>EP</i>	<i>IA</i>	<i>PV</i>	<i>PR</i>	<i>CLT</i>	<i>TOL</i>	<i>TPR</i>	<i>ROL</i>	<i>RPR</i>
Região Sul	Genótipo	87615,3***	189,35***	2,79***	88,69***	1,06***	21,01***	13,30***	32,53***	0,41***	0,83***	4577,1***	7275,2***
	Gen x Amb	189532,8***	77,11***	5,59***	74,59***	2,57***	9,92***	19,80***	12,10***	0,12***	0,19***	7228,9***	20319,4***
	Ambiente	464514,5***	291,37***	8,76***	338,04***	2,61***	152,14***	18,62***	146,65***	0,22***	1,34***	19970,8***	51311,6***
	Resíduo	140892,3	37,21	6,58	26,30	0,81	1,95	3,22	1,75	0,48	0,62	5883,8	16655,5
	Média	4118	167,4	16,2	88,6	3,4	48	78	126	18,98	32,53	789	1345
	CV (%)	9,12	3,64	15,86	5,79	26,31	2,91	2,32	1,05	3,66	2,41	9,73	9,60
Macrorregião 1	Genótipo	96282,4***	194,48***	2,51 ^{ns}	76,82***	3,37***	32,52***	14,06***	44,38***	0,38***	0,83***	4282,9***	7825,6***
	Gen x Amb	165316,3***	60,41***	9,00***	59,01***	2,10***	7,70***	18,46***	10,91***	0,11***	0,21***	5982,6***	17123,0***
	Ambiente	323364,2***	78,53***	4,31 ^{ns}	65,31***	0,49**	22,28***	4,74***	35,11***	0,28***	1,80***	15393,3***	39278,0***
	Resíduo	152039,0	37,17	10,16	22,43	0,99	2,27	2,90	1,73	0,54	0,66	6197,8	18050,0
	Média	4308	171,2	17,8	105,1	4,8	59	78	136	19,00	32,48	830	1415
	CV (%)	9,05	3,56	17,86	4,51	20,78	2,57	2,19	0,97	3,87	2,49	9,49	9,49
Macrorregião 2	Genótipo	128089,6***	191,77***	3,07***	142,57***	0,39***	12,44***	13,41***	23,64***	0,50***	0,89***	6667,7***	11336,0***
	Gen x Amb	168428,4***	84,55***	0,80**	45,50***	1,30***	9,08***	20,09***	10,68***	0,09***	0,11***	7496,8***	20269,2***
	Ambiente	584636,9***	491,72***	1,45**	99,40***	0,57***	46,68***	34,83***	60,57***	0,15***	0,78***	23040,4***	57263,9***
	Resíduo	126003,1	37,21	2,95	28,46	0,66	1,57	3,53	1,77	0,40	0,56	5409,1	14562,1
	Média	3876	164,1	13,4	73,7	1,9	37	77	116	18,95	32,61	723	1233
	CV (%)	9,16	3,72	12,79	7,24	41,70	3,36	2,43	1,14	3,33	2,29	10,17	9,79

RG: Rendimento de Grãos (kg ha⁻¹); PMS: Peso de Mil Sementes (g); IPV: Inserção de Primeira Vagem (cm); EP: Estatura de Planta (cm); IA: Índice de Acamamento (notas); PV: Período Vegetativo (dias); PR: Período Reprodutivo (dias); CLT: Ciclo Total (dias); TOL: Teor de Óleo (%); TPR: Teor de Proteína (%); ROL: Rendimento de Óleo (kg ha⁻¹); RPR: Rendimento de Proteína (kg ha⁻¹); Gen: Genótipo; Amb: Ambiente; Gen x Amb: Interação Genótipo x Ambiente; CV: Coeficiente de Variação (%). *, ** e ***: Valores significativos a 5% ($p < 0,05$), 1% ($p < 0,01$) e 0,1% ($p < 0,001$) de probabilidade de erro, respectivamente; ^{ns}: Não significativo.

4.1.2 Ganho Genético para o Rendimento de Grãos

Os resultados mostraram ganho genético positivo e significativo para o rendimento de grãos (RG) na região Sul, macrorregião 1 (M1) e 2 (M2), para o conjunto completo, precoce e médio de cultivares (Figura 3). As estimativas de ganho absoluto para a região Sul foram de 15,31, 13,83 e 14,13 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para o conjunto completo de cultivares, e para os grupos precoce e médio. Estes valores correspondem às taxas relativas de 0,42, 0,36 e 0,39% ano⁻¹, respectivamente (Figura 3A, B e C).

Figura 3 – Regressões entre o ano de lançamento e o rendimento de grãos para o conjunto completo, precoce e médio de cultivares de soja avaliadas na região Sul do Brasil (A, B e C), macrorregião 1 (D, E e F) e 2 (G, H e I), respectivamente. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.



Cada ponto no gráfico refere-se ao melhor preditor linear não viesado (BLUP - *best linear unbiased predictor*) médio de cada cultivar, obtido para os conjuntos de 25, 14 e 11 ambientes (local x ano) das regiões Sul, macrorregião 1 e 2, respectivamente. *, ** e ***: Coeficientes de regressão significativos a 5% ($p < 0,05$), 1% ($p < 0,01$) e 0,1% ($p < 0,001$) de probabilidade de erro, respectivamente; ^{ns}: Não significativo.

Em relação à macrorregião 1, os ganhos foram de 14,89, 14,17 e 13,75 kg ha⁻¹ ano⁻¹, que são equivalentes às taxas relativas de 0,39, 0,35 e 0,36% ano⁻¹ para os conjuntos completo, precoce e médio, respectivamente (Figura 3D, E e F). Considerando a média dos ambientes da macrorregião 2, as estimativas de ganho foram de 14,47, 11,98 e 13,48 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para os conjuntos completo, precoce e médio, os quais representam ganhos percentuais de 0,42, 0,33 e 0,39% ano⁻¹, respectivamente (Figura 3G, H e I). Vale destacar também, que para o conjunto completo na região Sul e macrorregião 1 (Figura 3A e D), houve uma tendência clara de aumento nas taxas de ganho a partir das décadas de 1990/2000, embora o modelo quadrático não tenha sido significativo para nenhuma das regiões avaliadas ($p = 0,060$ e $0,059$, respectivamente).

As estimativas de ganho obtidas neste estudo foram semelhantes entre as cultivares dos grupos de maturação (GM) precoce e médio. Resultados similares têm sido relatados por Rincker et al. (2014) e De Felipe et al. (2016; 2020) em estudos conduzidos nos Estados Unidos e Argentina, respectivamente. Os autores de ambos os estudos relataram que, quando cultivares de diferentes GM foram cultivadas em ambientes comuns, não foram constatadas diferenças significativas nas taxas de ganho entre os respectivos grupos, indicando que ambos apresentam potencial de melhoria.

Em estudos conduzidos na região Sul do Brasil, vários autores também têm relatado ganho genético significativo para a cultura da soja. Toledo et al. (1990) e Alliprandini et al. (1993), avaliando ensaios de linhagens entre 1981 e 1990 no Paraná, relataram ganhos variando entre -8,17 e 45,1 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (-0,28% e 1,80% ano⁻¹) para os GM precoce, semiprecoce e médio. Em estudo conduzido por Rubin e Santos (1996), avaliando um período de 40 anos de melhoramento no estado do Rio Grande do Sul, foi observado ganho médio de 19,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (1,1% ano⁻¹) para cultivares dos GM precoce, médio e semitardio/tardio. Da mesma forma, Lange e Federizzi (2009) relataram ganhos variando entre 0,0 e 71,5 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (0,0 e 3,49% ano⁻¹) no estado do Rio Grande do Sul, considerando o período entre 1979 e 1999. Em um estudo mais recente, realizado por Pagliosa (2016), avaliando ensaios de Valor de Cultivo e Uso (VCU) conduzidos entre as safras 2001/02 e 2013/14 na região meridional do Brasil, foram relatados ganhos variando entre -13,01 e 84,32 kg ha⁻¹ ano⁻¹. Apesar de alguns estudos citados anteriormente terem relatado taxas de ganho superiores às obtidas no presente estudo, as mesmas variaram consideravelmente entre GM, regiões e períodos avaliados. Além disso, o resultado obtido é muito dependente do número de ambientes e do conjunto de

genótipos avaliados, principalmente quando se avaliam linhagens de programas de melhoramento específicos. Vale destacar, também, que, na maioria dos estudos realizados no Sul do Brasil, as estimativas de ganho foram obtidas a partir de médias fenotípicas, diferentemente do presente estudo onde foram utilizados BLUPs, representando os verdadeiros valores genéticos das cultivares em relação aos efeitos ambientais (DE FELIPE et al., 2016).

As estimativas de ganho absoluto obtidas no presente estudo, são similares às reportadas em estudos recentes realizados nos EUA. Rogers et al. (2015) avaliando cultivares de soja lançadas entre as décadas de 1920 e 2000, relataram taxa de ganho média de $16,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, considerando os ensaios combinados dos GM IV, V e VI. Da mesma forma, Boehm Jr. et al. (2019) observaram ganhos de $17,6$, $13,5$ e $10,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para os GM mais tardios (V, VI e VII, respectivamente), e de $13,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ considerando a média dos três grupos avaliados. Estes valores são equivalentes às taxas relativas de $0,9$, $0,7$ e $0,6\% \text{ ano}^{-1}$ para os respectivos GM, sendo superiores às obtidas neste estudo. No entanto, estas taxas são inferiores às relatadas por Rincker et al. (2014) avaliando GM mais precoces, que observaram taxas absolutas de $23,1$, $22,8$ e $19,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para os GM II, III e IV, respectivamente. As taxas de ganho relatadas por Rincker et al. (2014) e Boehm Jr. et al. (2019) são similares às encontradas em estudos mais antigos conduzidos nos EUA, que variaram entre $13,7$ e $18,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ dependendo da região e GM estudado (BOERMA, 1979; SALADO-NAVARRO et al., 1993; USTUN et al., 2001).

Além dos estudos conduzidos nos EUA, ganho genético positivo em soja também tem sido relatado em outros países, com resultados similares aos obtidos no presente estudo. Wu et al. (2015), avaliando cultivares de soja lançadas entre 1923 e 2007 na China, relataram ganhos entre $5,8$ e $16,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, variando de acordo com a região avaliada. Resultado semelhante foi relatado por Wang et al. (2016), avaliando um período similar (1929 a 2004), os quais relatam ganho médio de $9,97 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, que é equivalente à taxa relativa de $0,6\% \text{ ano}^{-1}$. Da mesma forma, Jin et al. (2010), avaliando um período de 56 anos de melhoramento (1950 - 2006) na região Nordeste da China observaram taxa de ganho absoluto de $10,83 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, que equivale a $0,58\% \text{ ano}^{-1}$. Estudos conduzidos no Canadá ($10,17 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ou $0,45\% \text{ ano}^{-1}$) e Índia ($23,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) também têm relatado taxas de ganho similares às encontradas no presente estudo e dentro de intervalos de estudos já mencionados (MORRISON et al., 2000; RAMTEKE et al., 2011). No entanto, em estudo conduzido na Argentina, De Felipe et al. (2016) relataram um ganho médio de $43 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para os GM III, IV e V, com uma taxa relativa de $1,1\% \text{ ano}^{-1}$. Em um estudo mais recente, os mesmos autores

relatam resultados similares, com ganho de 42 kg ha⁻¹ ano⁻¹ ou ~1% ano⁻¹ (DE FELIPE et al., 2020), estimativas superiores às encontradas no presente estudo e em trabalhos, já citados, conduzidos em outros países. Vale destacar que os estudos de De Felipe et al. (2016; 2020) foram conduzidos em apenas três e dois ambientes (local x ano), respectivamente, diferentemente do presente trabalho e da maioria dos estudos anteriormente citados, que envolvem vários ambientes de uma ampla área de cultivo, onde as produtividades médias das cultivares tendem a ser inferiores.

Embora as taxas de ganho absoluto, obtidas no presente estudo, foram similares às obtidas na maioria dos estudos anteriormente citados, as taxas de ganho relativo foram inferiores. Isso se deve ao fato das cultivares antigas terem respondido bem às melhorias de manejo ocorridas ao longo dos anos, como pode ser constatado pelas elevadas médias produtivas no início da série histórica (Figura 3). Pelo fato das taxas de ganho absoluto (kg ha⁻¹ ano⁻¹) estarem associadas à qualidade dos ambientes avaliados, o uso de taxas relativas (% ano⁻¹) é importante, especialmente, quando se compara ambientes com diferentes pontos de partida ou rendimentos médios (SLAFER e ANDRADE, 1991; RINCKER et al., 2014; DE FELIPE et al., 2016). Vale destacar, também, que já eram esperadas taxas de ganho similares ou inferiores às relatadas nos EUA, uma vez que o melhoramento das cultivares de soja brasileiras iniciou a partir de introduções (PIs) oriundas do Sul dos Estados Unidos nas décadas de 1960 e 1970 (SPECHT et al., 2014). Hiromoto e Vello (1986), avaliando 69 das 74 cultivares utilizadas na safra 1983/84 no Brasil, relataram que 11 ancestrais foram responsáveis por aproximadamente 89% dos seus *pedigrees*. Em um estudo mais recente, Wysmierski e Vello (2013), avaliando 444 cultivares de soja disponibilizadas para cultivo no Brasil entre os anos de 1943 e 2009, relataram que o número de ancestrais tem aumentado ao longo dos anos, mas que a base genética da cultura no país ainda é estreita. De acordo com os autores, 14 ancestrais representam 92,4% da base genética, e apenas os 4 ancestrais principais contribuem com mais de 55%. A base genética estreita é uma das principais limitações para obtenção de ganho genético da cultura, e a sua expansão é essencial para o melhoramento da soja no futuro (WU et al., 2015). No entanto, é importante destacar que, apesar de alguns estudos terem demonstrado que a base genética da cultura no Brasil ainda é estreita, não foram observados platôs de produtividade nos principais estudos realizados no país, bem como no presente estudo.

Em estudos recentes, realizados por De Felipe et al. (2016; 2020) e mencionados anteriormente, os autores avaliaram o ganho genético entre os anos de 1980 e 2015 na

Argentina, incluindo cultivares de soja convencionais e com as tecnologias RR1 e RR2 IPRO. Nestes estudos, os autores não observaram descontinuidades nas taxas de ganho ao longo dos anos, sugerindo que não houve quaisquer vantagens qualitativas sobre o rendimento de grãos associadas com os eventos biotecnológicos, embora a importância destas tecnologias para o manejo da cultura seja incontestável. Esse comportamento também foi observado por Cober e Voldeng (2012) no Canadá, os quais relatam que a tecnologia RR1 não parece ter alterado as taxas de ganho após a sua introdução no país.

No presente estudo, o conjunto de dados disponível não possibilita concluir se a tecnologia RR1 conferiu alguma vantagem sobre a produtividade de grãos comparativamente aos genótipos convencionais. É mais provável que a tendência de aumento nas taxas de ganho a partir das décadas de 1990/2000, observado na região Sul e macrorregião 1 (Figura 3A e D), seja resultado da aprovação da Lei de Proteção de Cultivares de 25 de abril de 1997 (BRASIL, 1997). Esta lei permitiu investimentos de grandes empresas multinacionais no Brasil, que resultaram no estabelecimento de novos programas de melhoramento e avanços biotecnológicos, aumentando o potencial de rendimento de novas cultivares (SPECHT et al., 2014). Situação semelhante também foi observada nos EUA com a Lei de Proteção de Variedades Vegetais de 1970 (PVP - *Plant Variety Protection*), que estimulou investimentos em programas de melhoramento e permitiu aos melhoristas o controle exclusivo sobre suas novas cultivares, o que provavelmente impactou positivamente o ganho genético da cultura no país (RINCKER et al., 2014; SPECHT et al., 2014).

Neste sentido, os constantes investimentos em programas de melhoramento em todo o mundo, têm favorecido positivamente o ganho genético da soja ao longo dos anos, e nenhuma tendência de platô de produtividade tem sido relatada nos principais estudos citados (RINCKER et al., 2014; WU et al., 2015; WANG et al., 2016; BOEHM Jr. et al., 2019). Estes resultados indicam que ainda existe um grande potencial de melhoria da cultura da soja no futuro. Os concursos anuais de máxima produtividade têm demonstrado o potencial da cultura que já foi alcançado a campo, sendo relatados recordes de produtividade de 8945 kg ha⁻¹ para as condições brasileiras, e de 12793 kg ha⁻¹ nos EUA, que atualmente é o recorde mundial (CESB, 2017).

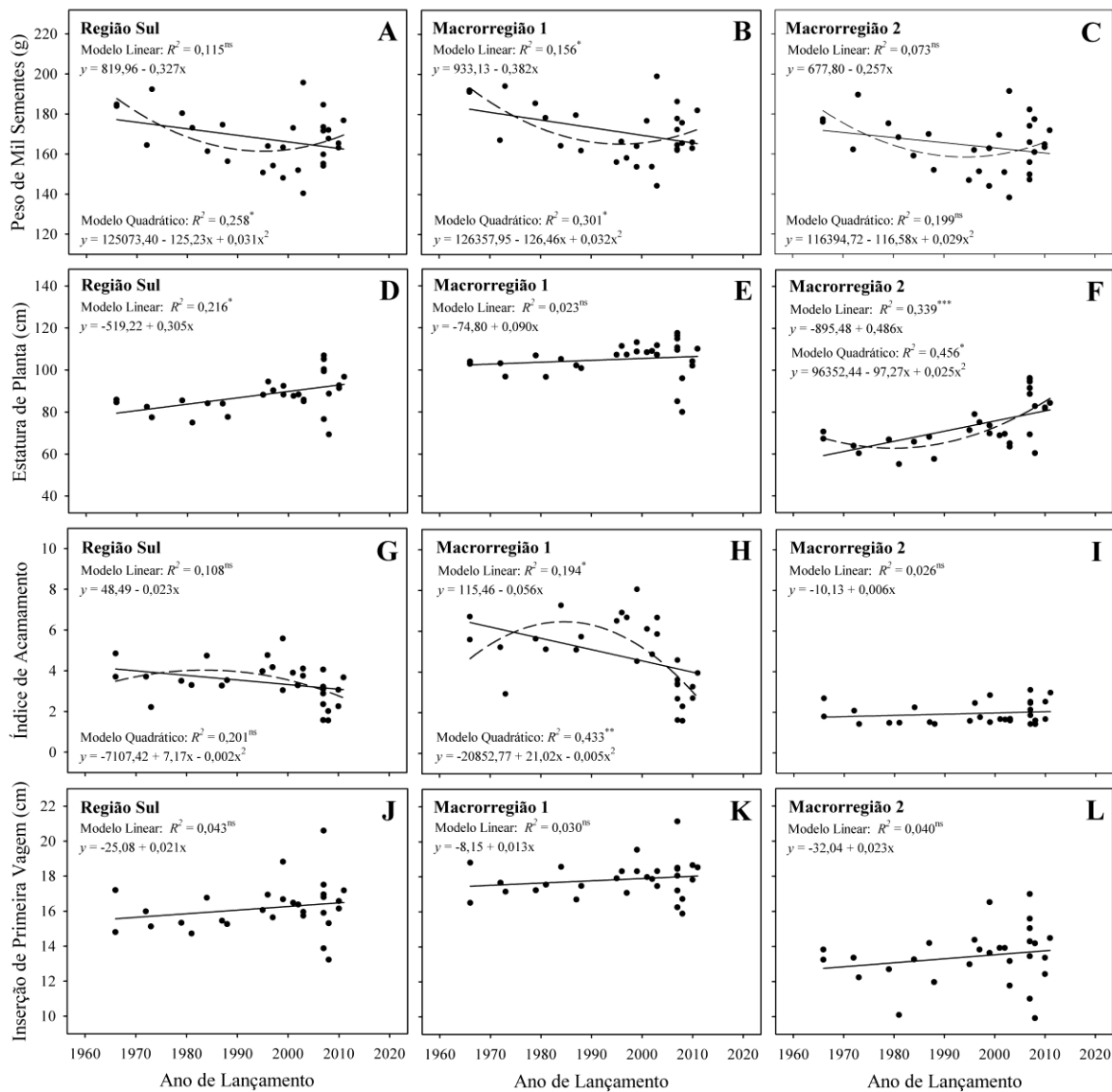
Vale destacar, também, que, embora vários estudos, conduzidos no Brasil e no mundo, tenham demonstrado aumentos significativos de produtividade das novas cultivares comparativamente às cultivares antigas, os aumentos observados não podem ser atribuídos apenas ao melhoramento genético, uma vez que o ambiente de cultivo também tem sido

continuamente melhorado (USTUN et al., 2001; ROGERS et al., 2015; BOEHM Jr. et al., 2019). Além disso, é importante destacar que as melhorias genéticas e agronômicas têm ocorrido simultaneamente ao longo dos anos, sendo difícil mensurar a contribuição exata de cada uma para os aumentos de produtividade obtidos (MESSINA et al., 2009; SPECHT et al., 2014). No entanto, alguns autores têm relatado que entre 1/2 e 2/3 dos ganhos de produtividade são devido aos esforços do melhoramento, sendo a outra parte atribuída às melhorias agronômicas e de ambiente (ROWNTREE et al., 2013; RINCKER et al., 2014; SPECHT et al., 2014; DE FELIPE et al., 2016). Dentre as melhorias de ambiente que têm sido associadas aos ganhos de produtividade, pode-se citar as melhorias nas práticas de manejo e adoção de tecnologias agronômicas, interação sinérgica entre práticas agronômicas e as novas cultivares, entre outros fatores que têm contribuído para o aumento crescente de produtividade a cada ano (ROWNTREE et al., 2013; SPECHT et al., 2014; BOEHM Jr. et al., 2019).

4.1.3 Caracteres Agronômicos

O rendimento de grãos tem sido o caractere alvo do melhoramento da soja no Brasil e no mundo. No entanto, os ganhos em produtividade foram acompanhados por alterações em vários caracteres de importância agronômica, via seleção direta ou indireta. Apesar dos ganhos positivos para o RG observados no presente estudo, o peso de mil sementes (PMS) apresentou redução ao longo dos anos, com taxas médias anuais de -0,33, -0,38 e -0,26 g ano⁻¹ para as regiões Sul, macrorregião 1 e 2, respectivamente (Figura 4A, B e C). Estas reduções são equivalentes a -0,18, -0,21 e -0,15% ano⁻¹, embora não foram significativas para as regiões Sul e M2 ($p = 0,072$ e $0,158$, respectivamente). Vale destacar, também, que quando o modelo quadrático foi ajustado aos dados, verificou-se que a redução no PMS ocorreu até o final da década de 1990, seguido de estabilização e aumento nos últimos anos da série histórica para ambas as regiões, mas também com ausência de significância para a M2 ($p = 0,056$).

Figura 4 – Regressões entre o ano de lançamento e o peso de mil sementes (A, B e C), estatura de planta (D, E e F), índice de acamamento (G, H e I) e altura de inserção de primeira vagem (J, K e L) de cultivares de soja avaliadas na região Sul do Brasil, macrorregião 1 e 2, respectivamente. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.



Cada ponto no gráfico refere-se ao melhor preditor linear não viesado (BLUP - *best linear unbiased predictor*) de cada cultivar, gerado para cada caractere agrônomo para o conjunto de ambientes (local x ano) da região avaliada. *, ** e ***: Coeficientes de regressão significativos a 5% ($p < 0,05$), 1% ($p < 0,01$) e 0,1% ($p < 0,001$) de probabilidade de erro, respectivamente; ^{ns}: Não significativo.

A ausência de ganhos positivos para o PMS no presente estudo, sugere que os aumentos de produtividade foram ocasionados por aumento no número de sementes por unidade de área, seja pelo maior número de sementes por vagem, vagens por planta e/ou sementes por planta, assim como relatado em outros estudos (MORRISON et al., 2000; CUI e YU, 2005; JIN et al., 2010; KAHN e BOARD, 2012; RINCKER et al., 2014; WU et al., 2015; TODESCHINI et al., 2019). Vale destacar, também, que apesar de alguns trabalhos realizados

nos EUA (SPECHT e WILLIAMS, 1984) e China (WANG et al., 2016; QIN et al., 2017) terem relatado aumento do PMS ao longo dos anos, vários estudos conduzidos no Canadá (MORRISON et al., 2000), Argentina (DE FELIPE et al., 2016), China (JIN et al., 2010) e EUA (RINCKER et al., 2014; BOEHM Jr. et al., 2019) também não identificaram ganhos para este caractere, indicando que o mesmo tem contribuído pouco para os aumentos de produtividade, embora seja um importante componente do rendimento. Esse comportamento pode ser explicado pela ausência de correlação positiva deste caractere com o rendimento de grãos e demais componentes, como já relatado em vários estudos (EGLI et al., 1978; MORRISON et al., 2000; JIN et al., 2010; DE FELIPE et al., 2016; BOEHM Jr. et al., 2019).

Os caracteres estatura de planta (EP) e índice de acamamento (IA) apresentaram significativas variações entre as diferentes regiões avaliadas no presente estudo. Foi observado aumento significativo na EP nas regiões Sul e M2 (Figura 4D e F), com ganhos de 0,31 e 0,49 cm ano⁻¹ (0,38 e 0,82% ano⁻¹), respectivamente. No entanto, não houve diferença significativa entre as cultivares antigas e modernas na M1 (Figura 4E). Em relação ao IA, não houve diferença significativa na M2 (Figura 4I), mas uma tendência de redução na região Sul (-0,023 ano⁻¹, $p = 0,082$) e redução significativa de -0,056 ano⁻¹ na M1, que é equivalente a -0,86% ano⁻¹ na escala de notas (Figura 4G e H, respectivamente). Vale destacar, ainda, que para a EP o modelo quadrático também foi significativo na M2, mostrando que o aumento deste caractere ocorreu somente a partir da década de 2000 (Figura 4F). Da mesma forma, o modelo quadrático também foi significativo para o IA na M1, mostrando que este caractere começou a reduzir somente a partir da década de 2000 (Figura 4H). Para a região Sul, o IA apresentou resultado semelhante, porém o modelo quadrático não foi significativo ($p = 0,095$, Figura 4G). Estes resultados indicam que as novas cultivares são mais resistentes ao acamamento na M1, mesmo não apresentando diferenças na EP. Por outro lado, houve aumento na EP na M2, mas sem diferenças no IA. Portanto, a maior estatura das novas cultivares nesta região não é um ponto negativo, uma vez que a resistência ao acamamento foi mantida ao longo dos anos.

Vários estudos realizados na China (JIN et al., 2010; WANG et al., 2016) e EUA (RINCKER et al., 2014; ROGERS et al., 2015; KEEP et al., 2016) têm mostrado redução simultânea da EP e IA em novas cultivares. Embora os resultados obtidos no presente estudo não corroborem com a maioria dos estudos já realizados em outros países, Rincker et al. (2014) relatam que, apesar da EP ser uma característica importante, ela não é de importância primária como o IA, cuja seleção é priorizada em função das perdas que ocasiona a campo. Os autores

relatam, ainda, que cultivares com estaturas altas e baixas têm sido constantemente lançadas nos EUA, desde que apresentem produtividade satisfatória e resistência ao acamamento, comportamento semelhante ao observado neste estudo para a macrorregião 2. No entanto, é importante destacar, que essa tendência de redução na EP, observada em vários estudos, tem sido favorecida pela seleção para maior resistência ao acamamento, pois cultivares mais baixas tendem a apresentar menores índices de acamamento (USTUN et al., 2001; RINCKER et al., 2014; ROGERS et al., 2015; BOEHM Jr. et al., 2019). Mesmo assim, em casos específicos, aumentos da EP também têm sido relatados. Wilcox (2001), avaliando ensaios de linhagens elite dos GM I ao IV, conduzidos durante seis décadas no Norte dos EUA e Canadá, observou aumento na EP para o GM I, mas decréscimo para os demais grupos estudados. Da mesma forma, Specht e Williams (1984), avaliando os GM 00 ao IV, relataram leve aumento na EP apenas no GM 00. Além disso, Wu et al. (2015), usando um modelo de regressão linear bissegmentada em um conjunto de cultivares lançadas entre 1923 e 2007 na China, observaram aumento na EP somente após o ano 2000, sem alterações no IA, mas com um significativo decréscimo da estatura entre 1923 e 2000. As maiores estaturas das novas cultivares observadas no presente estudo, principalmente, após a década de 2000, possivelmente, sejam resultado do lançamento das cultivares indeterminadas, que mantêm seu crescimento vegetativo após o início do florescimento, condição também observada por Pagliosa (2016) na região Sul do Brasil.

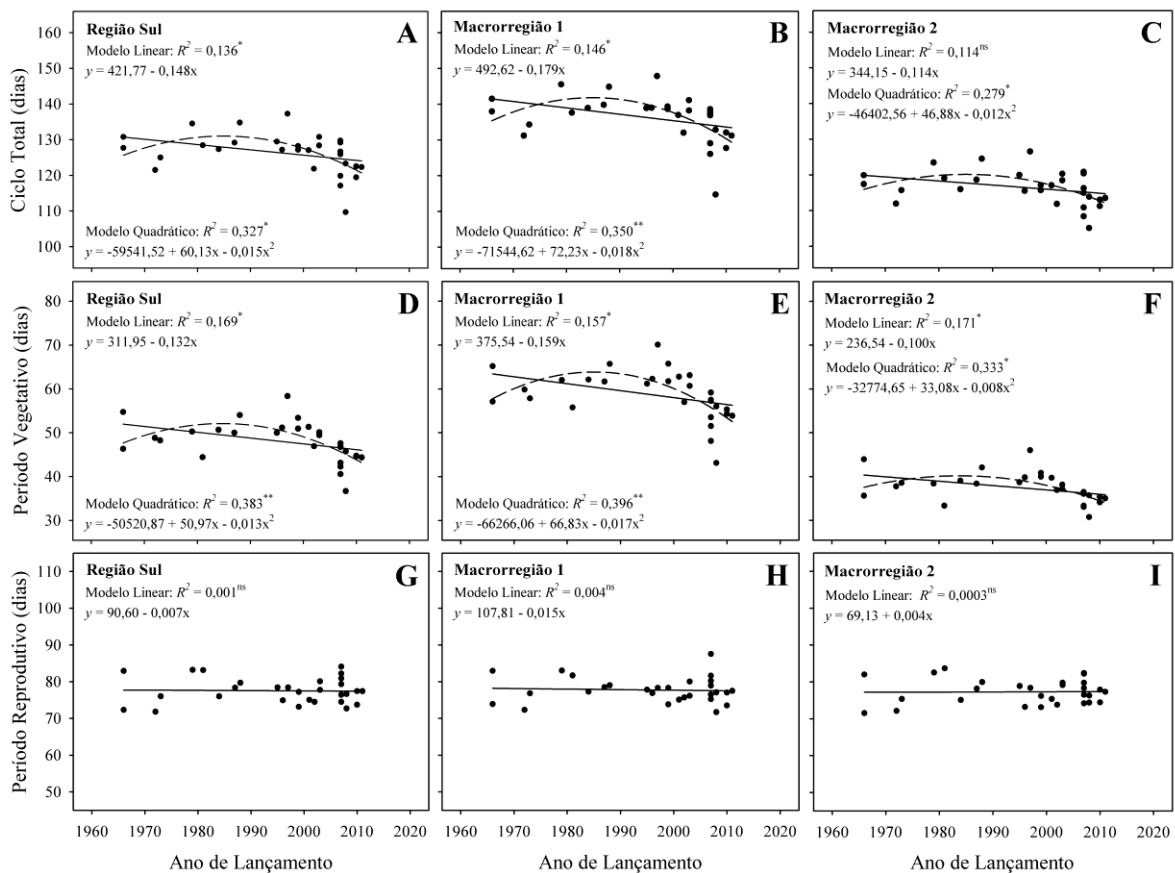
O aumento da EP observado no presente estudo não influenciou a altura de inserção da primeira vagem (IPV) em nenhuma das regiões avaliadas, não sendo identificadas diferenças significativas entre as cultivares antigas e modernas ao longo dos anos (Figura 4J, K e L). Os menores valores observados para a IPV foram de ~13, 16 e 10 cm para as regiões Sul, M1 e M2, respectivamente. O melhoramento deste caractere é importante para evitar perdas durante a colheita mecanizada, e os valores mínimos observados são aceitáveis. Ausência de ganho para esta característica também tem sido relatada em estudos conduzidos por Wu et al. (2015) e Wang et al. (2016) na China.

4.1.4 Caracteres Fenológicos

Em relação aos caracteres fenológicos, foram observadas reduções no ciclo das cultivares ao longo dos anos em todas as regiões avaliadas. As reduções foram de -0,15, -0,18 e -0,11 dias ano⁻¹, que representam -0,11, -0,13 e -0,10% ano⁻¹ para a região Sul, M1 e M2,

respectivamente (Figura 5A, B e C). No entanto, a redução na macrorregião 2 não foi significativa ($p = 0,073$). Resultados similares foram observados para o período vegetativo (PV), com reduções de -0,13, -0,16 e -0,10 dias ano⁻¹, que equivalem às taxas relativas de -0,254, -0,250 e -0,247% ano⁻¹ para a região Sul, M1 e M2, respectivamente (Figura 5D, E e F).

Figura 5 – Regressões entre o ano de lançamento e o ciclo total (A, B e C), período vegetativo (D, E e F) e período reprodutivo (G, H e I) de cultivares de soja avaliadas na região Sul do Brasil, macrorregião 1 e 2, respectivamente. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.



Cada ponto no gráfico refere-se ao melhor preditor linear não viesado (BLUP - *best linear unbiased predictor*) de cada cultivar, gerado para cada caractere fenológico para o conjunto de ambientes (local x ano) da região avaliada. *, ** e ***: Coeficientes de regressão significativos a 5% ($p < 0,05$), 1% ($p < 0,01$) e 0,1% ($p < 0,001$) de probabilidade de erro, respectivamente; ^{ns}: Não significativo.

Estudos conduzidos em outros países também têm mostrado que novas cultivares apresentaram reduções no ciclo (USTUN et al., 2001; COBER e VOLDENG, 2012) e período vegetativo (ROWNTREE et al., 2014; WU et al., 2015; DE FELIPE et al., 2016) comparativamente às cultivares mais antigas. No entanto, não houve diferença significativa para o período reprodutivo (PR) em nenhuma das regiões avaliadas (Figura 5G, H e I). Estes

resultados indicam que a redução no ciclo das novas cultivares ocorreu principalmente devido à redução do PV, uma vez que o PR permaneceu constante ao longo dos anos. Além disso, o modelo quadrático foi significativo para o ciclo total e PV em todas as regiões avaliadas, mostrando que a redução não foi linear ao longo dos anos. Para ambos os caracteres, foi observado que a redução ocorreu somente a partir da década de 2000, em ambas as regiões. Vale destacar que, após a década de 2000, ocorreu a introdução de germoplasma indeterminado no Brasil, que apresenta a característica de florescer precocemente e poderia explicar o comportamento observado no presente estudo.

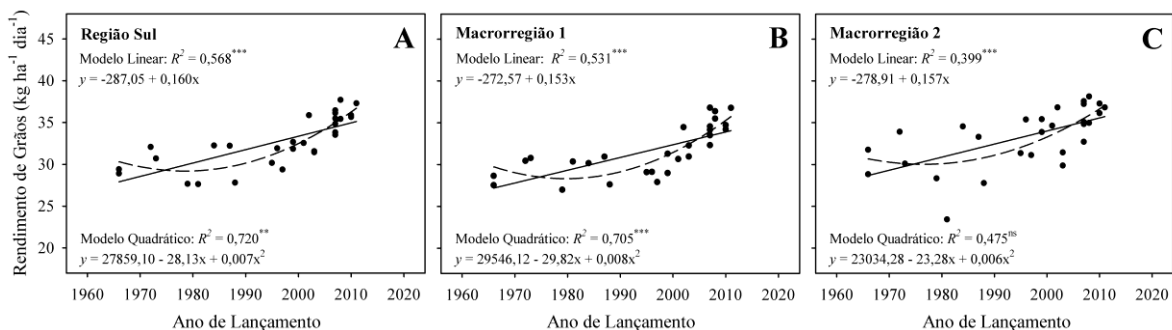
As cultivares com tipo de crescimento determinado, melhor adaptadas à região Sul e Centro-Oeste do Brasil até o ano 2000, apresentavam ciclo variando entre 120 e 125 dias (TOLEDO et al., 2006; SPECHT et al., 2014). A partir de então, houve a necessidade de obter cultivares mais precoces que permitissem a realização de uma segunda safra com milho (*Zea mays*) ou algodão (*Gossypium hirsutum* L.), além de favorecer o controle da ferrugem asiática da soja (*Phakopsora pachyrhizi*), que estava surgindo no Brasil. No entanto, cultivares de tipo de crescimento determinado com ciclo inferior a 115 ou 120 dias apresentavam baixo potencial produtivo, pois necessitavam de um período de tempo mínimo antes do florescimento (~45 dias) para atingirem um desenvolvimento adequado. Assim, a precocidade destas cultivares só poderia ser alcançada pela redução do período reprodutivo, o que também afetaria a produtividade de grãos.

Diante destas limitações, a solução encontrada para o desenvolvimento de cultivares precoces, produtivas e com porte adequado, foi a introdução de germoplasma indeterminado, da Argentina e América do Norte, que apresentavam a característica de continuar seu desenvolvimento em porte após o início do florescimento (SPECHT et al., 2014). É importante destacar, também, que, em geral, cultivares com tipo de crescimento indeterminado apresentam folhas menores e mais eretas, o que também favoreceu o controle das doenças da cultura, principalmente, a ferrugem asiática. Além disso, outra característica importante é a presença de entrenós mais curtos nestas cultivares, propiciando maior resistência ao acamamento (SPECHT et al., 2014), como observado, principalmente, na macrorregião 1 (Figura 4H). O germoplasma indeterminado também introduziu um novo conjunto de genes ainda não explorados no Brasil, que contribuíram ainda mais para os aumentos de produtividade da cultura (GODOI et al., 2013; SPECHT et al., 2014), o que também poderia explicar as maiores taxas de ganho produtivo obtidas a partir da década de 2000 na região Sul do Brasil (Figura 3).

Em estudo realizado por Rincker et al. (2014), avaliando cultivares lançadas entre 1923 e 2008 nos EUA, os autores relataram ganho genético positivo para o rendimento de grãos, e identificaram um aumento médio de 8 dias no ciclo das novas cultivares em relação às mais antigas dentro de cada GM. Segundo os autores, cultivares mais tardias tendem a produzir mais por estenderem o período de fotossíntese e, conseqüentemente, assimilarem mais carbono. No entanto, os resultados encontrados no presente estudo mostraram que as novas cultivares foram mais produtivas, mesmo apresentando redução no ciclo, comportamento similar ao observado em outros estudos (USTUN et al., 2001; COBER e VOLDENG, 2012). Além disso, vários autores têm associado os aumentos de produtividade das novas cultivares à suas maiores taxas fotossintéticas (MORRISON et al., 1999; JIN et al., 2010; LIU et al., 2012; TODESCHINI et al., 2019), bem como a uma maior eficiência de conversão de biomassa em grãos (KOESTER et al., 2014).

A partir da divisão dos BLUPs médios de rendimento de grãos pelo ciclo dos genótipos, foi possível obter a taxa de ganho ao dia. Foram observados ganhos médios de 0,160, 0,153 e 0,157 kg ha⁻¹ dia⁻¹ ano⁻¹ para a região Sul, macrorregião 1 e 2, o que representa 0,574, 0,561 e 0,545% ano⁻¹, respectivamente (Figura 6). Além disso, o ajuste do modelo quadrático mostrou que os ganhos diários permaneceram constantes nas primeiras décadas da série histórica avaliada, apresentando aumento expressivo somente a partir do início da década de 2000 para ambas as regiões, apesar da ausência de significância para a macrorregião 2 ($p = 0,064$).

Figura 6 – Regressões entre o ano de lançamento e o rendimento de grãos diário de cultivares de soja avaliadas na região Sul (A), macrorregião 1 (B) e 2 (C). UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.



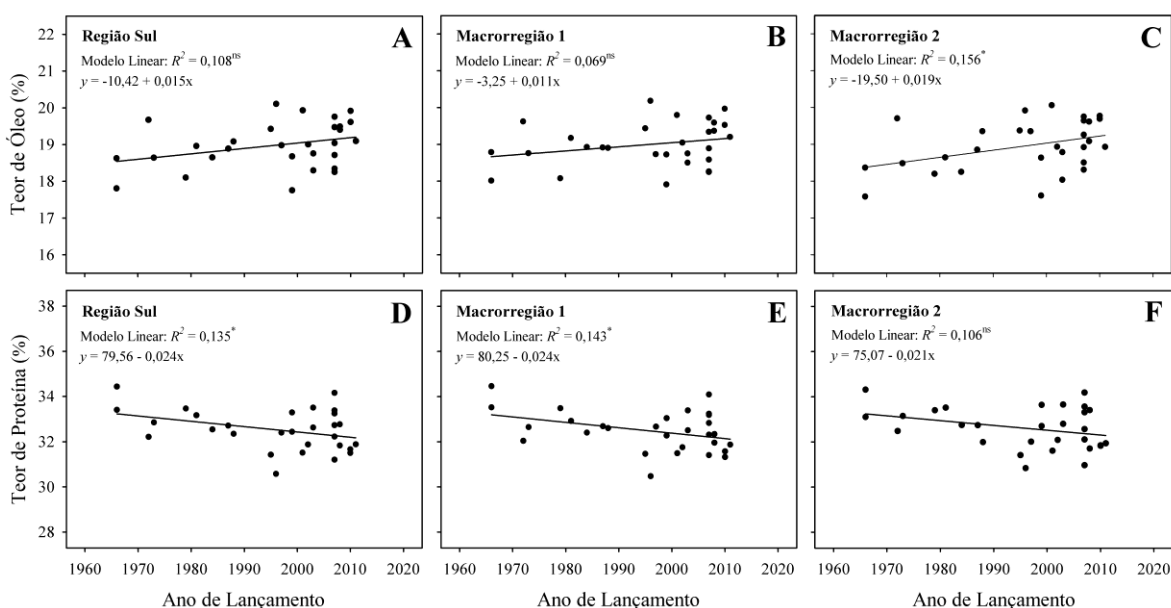
Cada ponto no gráfico refere-se ao melhor preditor linear não viesado (BLUP - *best linear unbiased predictor*) de rendimento de grãos dividido pelo BLUP de ciclo total de cada cultivar, para o conjunto de ambientes (local x ano) da região avaliada. *, ** e ***: Coeficientes de regressão significativos a 5% ($p < 0,05$), 1% ($p < 0,01$) e 0,1% ($p < 0,001$) de probabilidade de erro, respectivamente; ns: Não significativo.

A partir dos resultados apresentados, pode-se observar que embora as taxas de ganho para o rendimento de grãos variaram entre 0,385 e 0,420% ano⁻¹ considerando o conjunto completo de cultivares (Figura 3), as taxas de ganho diárias foram superiores, variando entre 0,545 e 0,574% ano⁻¹ (Figura 6). Vale destacar, ainda, que cultivares precoces são menos expostas a estresses do ambiente durante o período de cultivo, incluindo a ocorrência de doenças como a ferrugem asiática da soja, que tende a afetar mais as cultivares tardias, principalmente quando semeadas no final do período mais recomendado para semeadura.

4.1.5 Caracteres Bioquímicos

Em relação aos caracteres bioquímicos avaliados no presente estudo, houve uma tendência clara de aumento nos teores de óleo e diminuição nos teores de proteína ao longo dos anos, em ambas as regiões avaliadas (Figura 7). Para a região Sul, houve ganho de 0,015% ano⁻¹ nos teores de óleo e redução de -0,024% ano⁻¹ para proteína, apesar de ausência de significância para os teores de óleo ($p = 0,082$). Estes valores equivalem às taxas de ganho relativas de 0,079% e -0,071% ano⁻¹, respectivamente (Figura 7A e D).

Figura 7 – Regressões entre o ano de lançamento e o teor de óleo (A, B e C) e proteína (D, E e F) de cultivares de soja avaliadas na região Sul do Brasil, macrorregião 1 e 2, respectivamente. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.



Cada ponto no gráfico refere-se ao melhor preditor linear não viesado (BLUP - *best linear unbiased predictor*) de cada cultivar, gerado para cada caractere bioquímico para o conjunto de ambientes (local x ano) da região avaliada. *: Coeficiente de regressão significativo a 5% ($p < 0,05$) de probabilidade de erro; ^{ns}: Não significativo.

Resultados semelhantes aos obtidos na região Sul também foram observados nas macrorregiões 1 e 2. Foram identificados aumentos de 0,011 e 0,019% ano⁻¹ (0,059 e 0,105% ano⁻¹) nos teores de óleo (Figura 7B e C), e redução de -0,024 e -0,021% ano⁻¹ (-0,072 e -0,064% ano⁻¹) de proteína (Figura 7E e F), respectivamente. No entanto, as taxas de ganho para os teores de óleo na M1 e para proteína na M2 também não foram significativas ($p = 0,168$ e $0,085$, respectivamente).

A tendência de aumento nos teores de óleo e diminuição nos teores de proteína, encontrada neste estudo, corrobora com resultados obtidos em estudos conduzidos no Brasil e em outros países. Em estudo realizado por Bonato et al. (2000) na região Sul do Brasil, os autores observaram que a maioria das cultivares avaliadas lançadas após 1990, apresentaram maior concentração de óleo e menor de proteína nos grãos comparativamente às cultivares mais antigas. Da mesma forma, Morrison et al. (2000) observaram um aumento de 0,23% ano⁻¹ nos teores de óleo e redução de -0,13% ano⁻¹ nos teores de proteína ao longo dos anos no Canadá. Os mesmos autores, em um estudo posterior (MORRISON et al., 2008), relataram resultados similares, com aumento de 0,24% ano⁻¹ na concentração de óleo e redução de -0,15% ano⁻¹ na concentração de proteína, considerando um período de 58 anos de melhoramento avaliado.

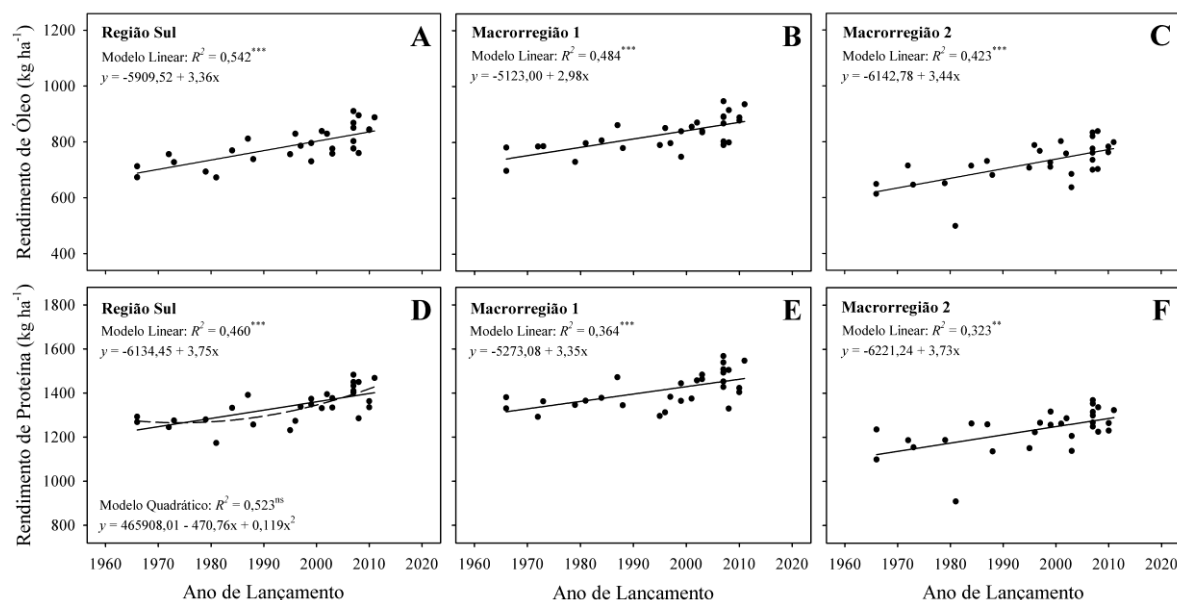
Em estudos realizados nos EUA, resultados similares também têm sido relatados. Rowntree et al. (2013) observaram decréscimo linear nos teores de proteína entre -0,19 e -0,24 g kg⁻¹ ano⁻¹, variando de acordo com o GM estudado. Em relação aos teores de óleo, os mesmos autores observaram um aumento variando entre 0,12 e 0,14 g kg⁻¹ ano⁻¹. Da mesma forma, Ustun et al. (2001), avaliando cultivares de soja antigas e modernas dos GM V, VI e VII, também observaram aumento nos teores de óleo e diminuição nos teores de proteína. No entanto, a redução nos teores de proteína não foi significativa com o passar dos anos, assim como observado no presente estudo para a macrorregião 2. Em um estudo mais recente, conduzido por Boehm Jr. et al. (2019), avaliando os GM V, VI e VII, os autores observaram redução significativa apenas para os teores de proteína no GM VI, e ausência de significância nos teores de óleo para todos os GM estudados, resultado divergente de outros estudos conduzidos nos EUA. Da mesma forma, De Felipe et al. (2016) observou redução significativa nos teores de proteína na Argentina, mas nenhuma alteração foi observada para os teores de óleo ao longo dos anos, considerando o período entre 1980 e 2015.

Apesar de alguns estudos, anteriormente citados, não terem identificado diferenças significativas para estes caracteres em soja, a tendência de aumento na concentração

de óleo e diminuição de proteína ao longo dos anos é clara. Estes resultados indicam que a busca constante por aumentos de produtividade ao longo do tempo tem alterado indiretamente estas características (ROWNTREE et al., 2013; RINCKER et al., 2014; ROGERS et al., 2015). Correlações negativas entre os teores de óleo e proteína são conhecidas e têm sido amplamente relatadas (COBER e VOLDENG, 2000; USTUN et al., 2001; ROGERS et al., 2015; DE FELIPE et al., 2016; BOEHM Jr. et al., 2019), sendo também identificadas no presente estudo para a região Sul do Brasil ($r = -0,83^{**}$; dados não apresentados), o que poderia explicar essa tendência observada ao longo dos anos.

Apesar da concentração de proteína nos grãos ter diminuído ao longo dos anos, o rendimento por unidade de área aumentou, assim como para o óleo (Figura 8). Foram identificados ganhos de 3,36, 2,98 e 3,44 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para óleo (Figura 8A, B e C) e de 3,75, 3,35 e 3,73 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para proteína (Figura 8D, E e F) nas regiões Sul, macrorregião 1 e 2. Estes valores correspondem às taxas relativas de 0,488, 0,403 e 0,554% ano⁻¹ no rendimento de óleo, e de 0,304, 0,255 e 0,333% ano⁻¹ no rendimento de proteína, respectivamente. Vale destacar, também, que foi observada tendência de aumento na taxa de ganho para o rendimento de proteína na região Sul nos últimos anos da série histórica (Figura 8D), apesar do modelo quadrático não ter sido significativo ($p = 0,078$). Essa tendência pode estar associada às maiores taxas de ganho para o RG nessa região nos últimos anos da série histórica avaliada (Figura 3A), que também resultaram em maiores rendimentos de proteína por unidade de área. Comportamento semelhante ao observado no presente estudo foi relatado por Rincker et al. (2014), avaliando cultivares de soja dos GM II, III e IV lançadas entre 1923 e 2008 nos EUA. Os autores também identificaram aumento nos teores de óleo e diminuição nos teores de proteína, mas o rendimento de óleo e proteína foi positivo e significativo para todos os GM estudados, sendo identificada ausência de significância apenas para o teor de óleo no GM IV. Os ganhos relatados pelos autores variaram de 4,37 a 4,72 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para óleo e de 6,59 a 7,38 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para proteína nos GM avaliados, sendo superiores aos encontrados no presente estudo.

Figura 8 – Regressões entre o ano de lançamento e o rendimento de óleo (A, B e C) e proteína (D, E e F) de cultivares de soja avaliadas na região Sul do Brasil, macrorregião 1 e 2, respectivamente. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.



Cada ponto no gráfico refere-se ao melhor preditor linear não viesado (BLUP - *best linear unbiased predictor*) de cada cultivar, gerado para cada caractere bioquímico no conjunto de ambientes (local x ano) da região avaliada. *, ** e ***: Coeficientes de regressão significativos a 5% ($p < 0,05$), 1% ($p < 0,01$) e 0,1% ($p < 0,001$) de probabilidade de erro, respectivamente; ^{ns}: Não significativo.

Atualmente, a soja é uma das principais fontes de óleo e proteína vegetal, e alterações na concentração destes caracteres são de grande importância para a indústria de processamento (RINCKER et al., 2014). De acordo com De Felipe et al. (2016), na indústria de esmagamento, o óleo e o farelo são os principais subprodutos obtidos, e a composição das sementes tem um impacto direto na sua qualidade final. O farelo é destinado principalmente para a alimentação animal, e o mercado tem exigido valores proteicos mínimos em sua composição. De acordo com Pípolo et al. (2015), a legislação exige no mínimo 46% de proteína nas rações, e o setor industrial tem mostrado preocupação sobre a dificuldade de obter este valor, sendo necessário em vários casos remover o tegumento das sementes para atingir os valores mínimos exigidos. Neste sentido, as constantes reduções nos teores de proteína podem afetar a qualidade dos subprodutos obtidos, o que destaca a importância de manter estes teores acima dos limites críticos. Assim, diante das exigências do mercado, os aumentos no rendimento de proteína por hectare não são suficientes, embora sejam positivos, pois a demanda das indústrias de processamento é a sua concentração nas sementes. Como já mencionado, o rendimento de grãos tem sido o caractere alvo dos programas de melhoramento no Brasil, uma

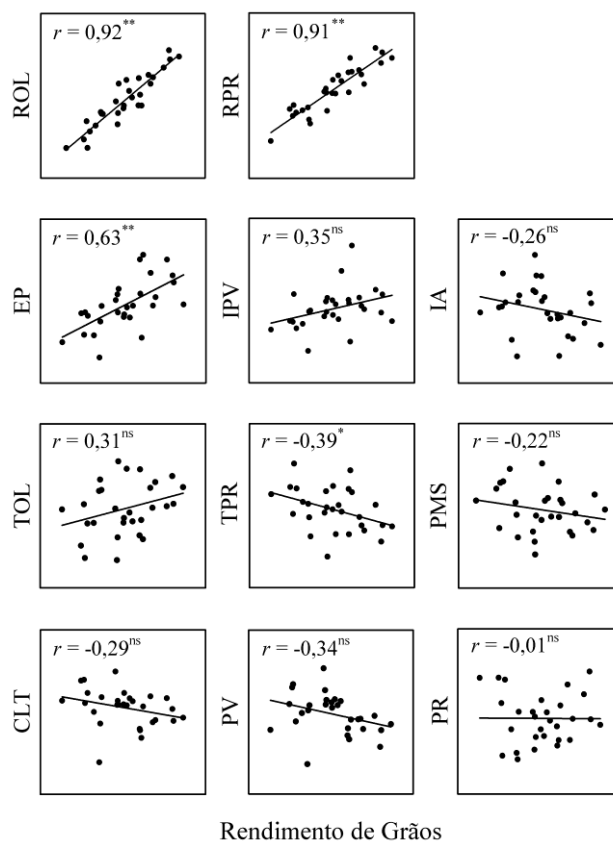
vez que os produtores têm sido pagos pelo volume de grãos produzido e não pela sua composição. Portanto, a menos que um valor adicional seja pago pelos maiores teores de proteína, é provável que essa tendência de redução continue nos próximos anos. Situação semelhante também tem sido observada nos EUA (RINCKER et al., 2014), e alguns autores têm destacado a necessidade de seleção simultânea para RG e proteína para amenizar esse problema no futuro (BOEHM Jr. et al., 2019).

4.1.6 Correlação entre Caracteres

Análises de correlação foram realizadas para os caracteres agronômicos, fenológicos e bioquímicos avaliados, a fim de identificar quais apresentaram associação com o rendimento de grãos. Quanto maiores os coeficientes de correlação, maior a probabilidade de que a seleção direta para o RG ao longo dos anos tenha propiciado a seleção indireta de outros caracteres (positiva ou negativa), ou que a seleção direta para um caractere de interesse foi realizada simultaneamente com o RG (BOEHM Jr. et al., 2019).

Foi observada correlação positiva de elevada magnitude entre o RG e os caracteres ROL ($r = 0,92^{**}$) e RPR ($r = 0,91^{**}$) na região Sul do Brasil (Figura 9). Estes resultados eram esperados, uma vez que estes caracteres foram obtidos pela multiplicação dos teores de óleo e proteína pela produtividade de grãos. Da mesma forma, também foi observada correlação positiva entre RG e EP ($r = 0,63^{**}$), indicando que as cultivares mais produtivas também apresentaram maior estatura na região Sul, o que pode ser atribuído, em parte, às cultivares indeterminadas avaliadas no presente estudo, que foram disponibilizadas para cultivo após a década de 2000. De maneira similar a EP, o caractere IPV ($r = 0,35^{ns}$) também apresentou associação positiva com o RG, mas a correlação não foi significativa. Por outro lado, apesar da associação positiva com a EP, o RG foi negativamente correlacionado com o IA ($r = -0,26^{ns}$), embora com baixa magnitude e ausência de significância (Figura 9). Resultado similar foi relatado por Morrison et al. (2000) no Canadá, os quais também encontraram correlação negativa e não significativa entre RG e IA ($r = -0,19^{ns}$). No entanto, vários trabalhos têm relatado correlação negativa significativa entre estes caracteres, indicando melhoria simultânea da produtividade e da resistência ao acamamento ao longo dos anos (JIN et al., 2010; DE FELIPE et al., 2016; BOEHM Jr. et al., 2019).

Figura 9 – Coeficientes de correlação de Pearson entre o rendimento de grãos e caracteres agrônômicos, fenológicos e bioquímicos de cultivares de soja avaliadas na região Sul do Brasil. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.



Correlações obtidas entre os melhores preditores lineares não viesados (BLUP - *best linear unbiased predictor*) de cada cultivar, gerados para cada caractere no conjunto de ambientes (local x ano) da região avaliada. * e **: Coeficientes de correlação significativos a 5% ($p < 0,05$) e 1% ($p < 0,01$) de probabilidade de erro pelo teste *t*, respectivamente; ns: Não significativo. ROL: Rendimento de Óleo; RPR: Rendimento de Proteína; EP: Estatura de Planta; IPV: Inserção de Primeira Vagem; IA: Índice de Acamamento; TOL: Teor de Óleo; TPR: Teor de Proteína; PMS: Peso de Mil Sementes; CLT: Ciclo Total; PV: Período Vegetativo; PR: Período Reprodutivo.

O RG também foi positivamente correlacionado com o TOL ($r = 0,31^{ns}$) e negativamente correlacionado com o TPR ($r = -0,39^*$). No entanto, a correlação para o TOL foi de baixa magnitude e não significativa (Figura 9). Apesar da ausência de significância, vários estudos têm demonstrado que os aumentos de produtividade ao longo dos anos tendem a aumentar indiretamente os teores de óleo e reduzir os teores de proteína, como previamente discutido (VOLDENG et al., 1997; MORRISON et al., 2000; 2008; QIN et al., 2017; BOEHM Jr. et al., 2019). Correlação negativa de baixa magnitude também foi observada entre o RG e o CLT ($r = -0,29^{ns}$) e PV ($r = -0,34^{ns}$), mas com ausência de significância para ambos os caracteres. Embora estas correlações não foram significativas, esse resultado está relacionado

com a redução do CLT e PV das novas cultivares no presente estudo. Da mesma forma, as correlações não foram significativas entre o RG e os caracteres PMS ($r = -0,22^{ns}$) e PR ($r = -0,01^{ns}$) (Figura 9). O resultado obtido para o PMS corrobora com vários estudos conduzidos em outros países, que também não identificaram correlação positiva deste caractere com o rendimento de grãos (EGLI et al., 1978; MORRISON et al., 2000; JIN et al., 2010; DE FELIPE et al., 2016; BOEHM Jr. et al., 2019).

4.2 REGIÃO CENTRO-OESTE

4.2.1 Caracterização dos Ambientes

Em relação à macrorregião 3, apenas dois ensaios foram utilizados nas análises, sendo os demais perdidos por problemas climáticos e/ou de manejo (Tabela 2). No entanto, os ensaios apresentaram muitos dados faltantes e coeficientes de variação acima do limite aceitável para o rendimento de grãos ($CV > 20\%$), não sendo identificada significância para o efeito de genótipo (dados não apresentados). Dessa forma, em função do baixo número de ambientes avaliados e da baixa qualidade experimental, as informações obtidas não foram representativas, e a condução de mais ensaios na região são necessários para a obtenção de informações mais precisas.

Foi observada significância para o efeito de genótipo, ambiente e interação genótipo x ambiente para todos os caracteres avaliados na macrorregião 4 (Tabela 5). Considerando o conjunto dos 12 ambientes (local x ano) avaliados nesta região, a média de produtividade dos ensaios variou de 2792 a 4432 kg ha⁻¹, com média geral de 3402 kg ha⁻¹. A partir da análise de componentes da variância, foi observado que o efeito de ambiente foi responsável pela maior parte da variação total para o RG. Além disso, a variância para o efeito da interação genótipo x ambiente foi superior ao efeito de genótipo, indicando que existem alterações no ranqueamento das cultivares entre os diferentes ambientes avaliados. Comportamento similar foi observado para os rendimentos de óleo (ROL) e proteína (RPR), obtidos pela multiplicação dos seus teores percentuais pelo RG. Estes resultados eram esperados, pois os ensaios foram conduzidos em ambientes distribuídos em uma ampla área de cultivo, com latitudes variando entre 12,55 e 16,47 S e altitudes entre 230 e 736 m, embora presentes na mesma macrorregião sojícola, mas em diferentes regiões edafoclimáticas. Para os

demais caracteres avaliados, os efeitos de ambiente e interação genótipo x ambiente foram menos expressivos comparativamente ao RG (Tabela 5).

Tabela 5 – Estimativas dos componentes da variância associados ao efeito de genótipo, ambiente e interação genótipo x ambiente para caracteres agrônômicos, fenológicos e bioquímicos de cultivares de soja avaliadas na macrorregião 4 da região Centro-Oeste do Brasil. UTFPR, Pato Branco – PR, 2021.

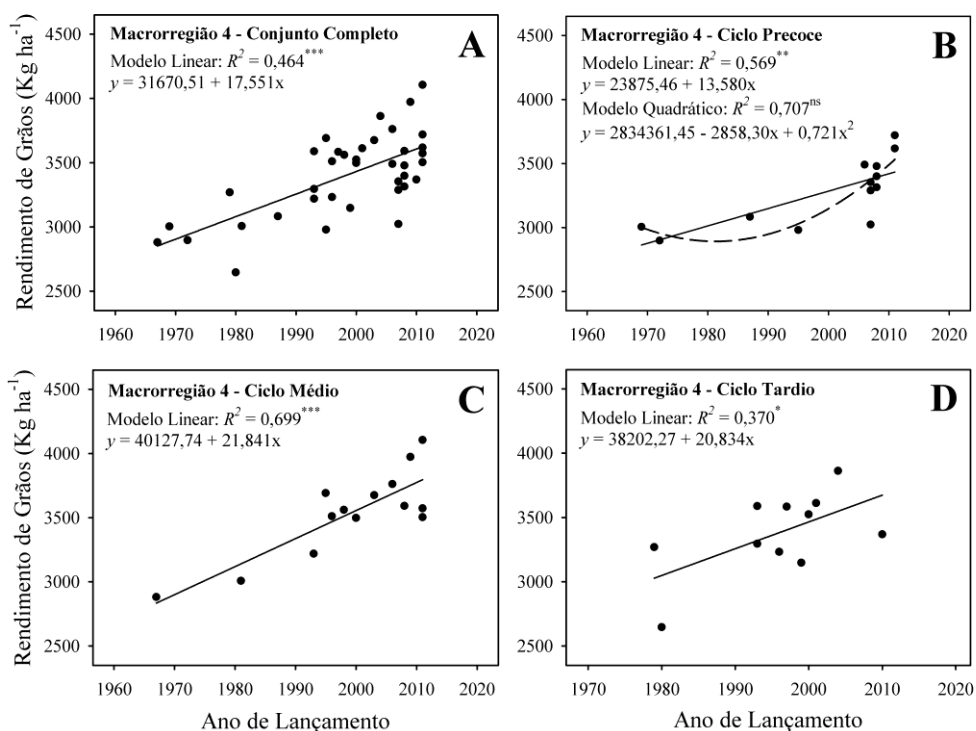
Fontes de Variação	Caracteres					
	<i>RG</i>	<i>PMS</i>	<i>IPV</i>	<i>EP</i>	<i>IA</i>	<i>PV</i>
Genótipo	120165,3***	195,58***	3,72***	117,68***	0,76***	51,54***
Gen x Amb	159004,9***	72,76***	2,68***	52,45***	0,84***	6,56***
Ambiente	251934,7***	90,99***	2,63***	58,94***	0,88***	24,46***
Resíduo	124231,0	34,25	4,69	18,26	0,59	0,72
Média	3402	130,1	12,4	76,2	2,4	42
CV (%)	10,36	4,50	17,41	5,61	32,14	2,00
	<i>PR</i>	<i>CLT</i>	<i>TOL</i>	<i>TPR</i>	<i>ROL</i>	<i>RPR</i>
Genótipo	23,37***	89,50***	0,39***	0,92***	4879,8***	7100,2***
Gen x Amb	31,07***	28,52***	0,17***	0,19***	8378,3***	19160,9***
Ambiente	36,79***	28,59***	0,07**	0,20***	15409,2***	38412,8***
Resíduo	1,61	1,37	0,43	0,58	6887,6	15992,8
Média	69	112	20,29	31,36	722	1113
CV (%)	1,83	1,05	3,24	2,43	11,49	11,36

RG: Rendimento de Grãos (kg ha⁻¹); PMS: Peso de Mil Sementes (g); IPV: Inserção de Primeira Vagem (cm); EP: Estatura de Planta (cm); IA: Índice de Acamamento (notas); PV: Período Vegetativo (dias); PR: Período Reprodutivo (dias); CLT: Ciclo Total (dias); TOL: Teor de Óleo (%); TPR: Teor de Proteína (%); ROL: Rendimento de Óleo (kg ha⁻¹); RPR: Rendimento de Proteína (kg ha⁻¹); Gen: Genótipo; Amb: Ambiente; Gen x Amb: Interação Genótipo x Ambiente; CV: Coeficiente de Variação (%). ** e ***: Valores significativos a 1% ($p < 0,01$) e 0,1% ($p < 0,001$) de probabilidade de erro, respectivamente.

4.2.2 Ganho Genético para o Rendimento de Grãos

Os resultados obtidos para a macrorregião 4, mostraram ganho genético positivo e significativo para o rendimento de grãos (Figura 10). As estimativas de ganho absoluto foram de 17,55, 13,58, 21,84 e 20,83 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para o conjunto completo, precoce, médio e tardio de cultivares, os quais correspondem às taxas relativas de 0,62, 0,47, 0,77 e 0,69% ano⁻¹, respectivamente (Figura 10A, B, C e D). Vale destacar que, embora o ganho médio observado para o grupo precoce foi inferior aos obtidos para os grupos médio e tardio, houve tendência de aumento na taxa de ganho nos últimos anos da série histórica avaliada, ainda que o ajuste do modelo quadrático não tenha sido significativo ($p = 0,056$) (Figura 10B).

Figura 10 – Regressões entre o ano de lançamento e o rendimento de grãos para o conjunto completo (A), precoce (B), médio (C) e tardio (D) de cultivares de soja avaliadas na macrorregião 4 da região Centro-Oeste do Brasil. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.



Cada ponto no gráfico refere-se ao melhor preditor linear não viesado (BLUP - *best linear unbiased predictor*) médio de cada cultivar, obtido para o conjunto de 12 ambientes (local x ano) da região avaliada. *, ** e ***: Coeficientes de regressão significativos a 5% ($p < 0,05$), 1% ($p < 0,01$) e 0,1% ($p < 0,001$) de probabilidade de erro, respectivamente; ^{ns}: Não significativo.

As taxas de ganho obtidas na macrorregião 4, para ambos os grupos, foram superiores às observadas no presente estudo para a região Sul (macrorregiões 1 e 2), que variaram entre 11,98 e 15,31 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (0,33 a 0,42% ano⁻¹, respectivamente) (Figura 3). Este resultado pode ser atribuído, em parte, às baixas produtividades observadas nas décadas de 1960 e 1970 na macrorregião 4 (~2900 kg ha⁻¹, Figura 11A), sendo inferiores às obtidas na região Sul no mesmo período (~3600 kg ha⁻¹, Figura 3A), o que resultou em taxas de ganho superiores. Estes resultados demonstram, que os primeiros genótipos cultivados nas condições do Cerrado brasileiro apresentavam pouca adaptação, possivelmente por serem introduções diretas da região Sul do Brasil. Por outro lado, embora os trabalhos de melhoramento na região Centro-Oeste tenham iniciado posteriormente, os esforços dos programas foram bastante expressivos, com a seleção de genótipos adaptados para as condições da região, que resultaram em taxas de ganho superiores às observadas na região Sul.

Os principais estudos de ganho genético em soja no Brasil foram realizados na região Sul, sendo relatados ganhos de até 84,32 kg ha⁻¹ ano⁻¹, dependendo do conjunto de

genótipos, região e período avaliado. Em estudo realizado por Toledo et al. (1990), avaliando ensaios de linhagens entre os anos de 1981 e 1986 no Paraná, os autores observaram taxas de ganho superiores às obtidas no presente estudo. As estimativas de ganho absolutas foram 45,1 e 36,8 kg ha⁻¹ ano⁻¹, que representam 1,80 e 1,32% ano⁻¹ para os grupos de maturação precoce e semiprecoce, respectivamente. Em um estudo similar também no estado do Paraná, Alliprandini et al. (1993), avaliando linhagens desenvolvidas entre 1986 e 1990, observaram ganhos de 24,16, 10,83 e -8,17 kg ha⁻¹ ano⁻¹, que correspondem às taxas relativas de 0,89, 0,38 e -0,28% ano⁻¹ para os grupos precoce, semiprecoce e médio, respectivamente. No estado do Rio Grande do Sul, Rubin e Santos (1996), avaliando cultivares dos grupos precoce, médio e semitardio/tardio, relataram ganhos de 17,7, 5,1 e 22,7 kg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente, com ganho médio de 19,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (1,1% ano⁻¹) considerando um período de 40 anos de melhoramento. Em um estudo mais recente, também realizado no Rio Grande do Sul, Lange e Federizzi (2009) relataram ganhos variando entre 0,0 e 71,5 kg ha⁻¹ ano⁻¹, dependendo do grupo de maturação e região avaliada. Da mesma forma, Pagliosa (2016), avaliando genótipos convencionais e transgênicos conduzidos em ensaios de VCU entre as safras 2001/02 e 2013/14, relataram ganhos entre -13,01 e 84,32 kg ha⁻¹ ano⁻¹, os quais também variaram entre ambientes, grupos de maturação e regiões avaliadas.

Na região Centro-Oeste do Brasil, poucos estudos de ganho genético em soja têm sido conduzidos, havendo poucas informações sobre o progresso da cultura na região. No entanto, em um trabalho realizado por Mezzalira (2017), avaliando genótipos de uma rede de ensaios de VCU nas macrorregiões 3 e 4, foi relatado ganho absoluto de 18,3 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para o GM 8, considerando o período entre as safras de 2006/07 e 2015/16. Este ganho corresponde à taxa relativa de 0,59% ano⁻¹, estando dentro do intervalo das taxas obtidas no presente estudo para a macrorregião 4.

Diversos trabalhos conduzidos nos EUA, também têm relatado ganhos similares aos obtidos no presente estudo para a região Centro-Oeste do Brasil. Em estudo realizado por Rogers et al. (2015), avaliando cultivares dos GM IV, V e VI, os autores relataram ganho médio de 16,8 kg ha⁻¹ ano⁻¹, considerando um período de oito décadas de melhoramento (1920 - 2000). Rincker et al. (2014), avaliando cultivares lançadas entre 1923 e 2008, relataram ganhos de 23,1, 22,8 e 19,5 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para os GM II, III e IV, respectivamente. Em um estudo mais recente, realizado por Boehm Jr. et al. (2019), foram relatados ganhos de 17,6, 13,5 e 10,3 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (0,9, 0,7 e 0,6% ano⁻¹) para os GM V, VI e VII, respectivamente. Além disso, as taxas

de ganho obtidas no presente estudo também foram similares às relatadas em trabalhos conduzidos na China ($\sim 0,6\%$ ano⁻¹), Índia (23,1 kg ha⁻¹ ano⁻¹) e Canadá (0,45% ano⁻¹), mas inferiores às obtidas em trabalhos recentes realizados na Argentina ($\sim 1\%$ ano⁻¹) (MORRISON et al., 2000; JIN et al., 2010; RAMTEKE et al., 2011; WANG et al., 2016; DE FELIPE et al., 2016; 2020). Vale destacar, também, que, as taxas de ganho obtidas são muito dependentes do conjunto de genótipos e número de ambientes avaliados, o que pode explicar as diferenças observadas nos estudos anteriormente citados, como previamente discutido.

Conforme já destacado, taxas de ganho similares ou inferiores às obtidas nos EUA eram esperadas, pois o melhoramento de soja no Brasil foi iniciado a partir de introduções (PIs) oriundas do Sul dos EUA após a década de 1960 (SPECHT et al., 2014). Além disso, apesar de alguns estudos terem demonstrado que a base genética da cultura no Brasil ainda é estreita (HIROMOTO e VELLO, 1986; WYSMIERSKI e VELLO, 2013), o que limita a obtenção de altas taxas de ganho genético, não foram identificados platôs de produtividade nos principais estudos realizados no país, demonstrando que os ganhos permaneceram positivos ao longo dos anos para ambas as regiões avaliadas.

As primeiras introduções americanas oriundas do Sul dos EUA, eram adaptadas a latitudes que variavam entre 22 e 30° S, tais como as encontradas na região Sul do Brasil (SPECHT et al., 2014). Naquela época, os primeiros genótipos cultivados não eram adaptados às regiões de baixas latitudes, como das regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil. Nestas regiões, o fotoperíodo curto causava florescimento precoce, reduzindo o desenvolvimento vegetativo e, conseqüentemente, a produtividade de grãos (ALMEIDA et al., 1999). Frente às limitações do cultivo da soja em regiões de baixas latitudes, os programas de melhoramento tiveram um papel fundamental no desenvolvimento de cultivares adaptadas. A adaptação da cultura para condições de dias curtos, foi o principal desafio das décadas de 1970 e 1980. Isso só foi possível com a identificação e entendimento do período juvenil longo, que foi a solução encontrada pelos melhoristas para retardar o florescimento em baixas latitudes (HARTWIG e KIIHL, 1979; ALMEIDA et al., 1999). Essa descoberta permitiu o cultivo da soja em regiões antes inexploradas com a cultura no Brasil, movendo a produção brasileira para os trópicos e introduzindo a agricultura moderna nas extensas áreas planas do Cerrado (SPECHT et al., 2014).

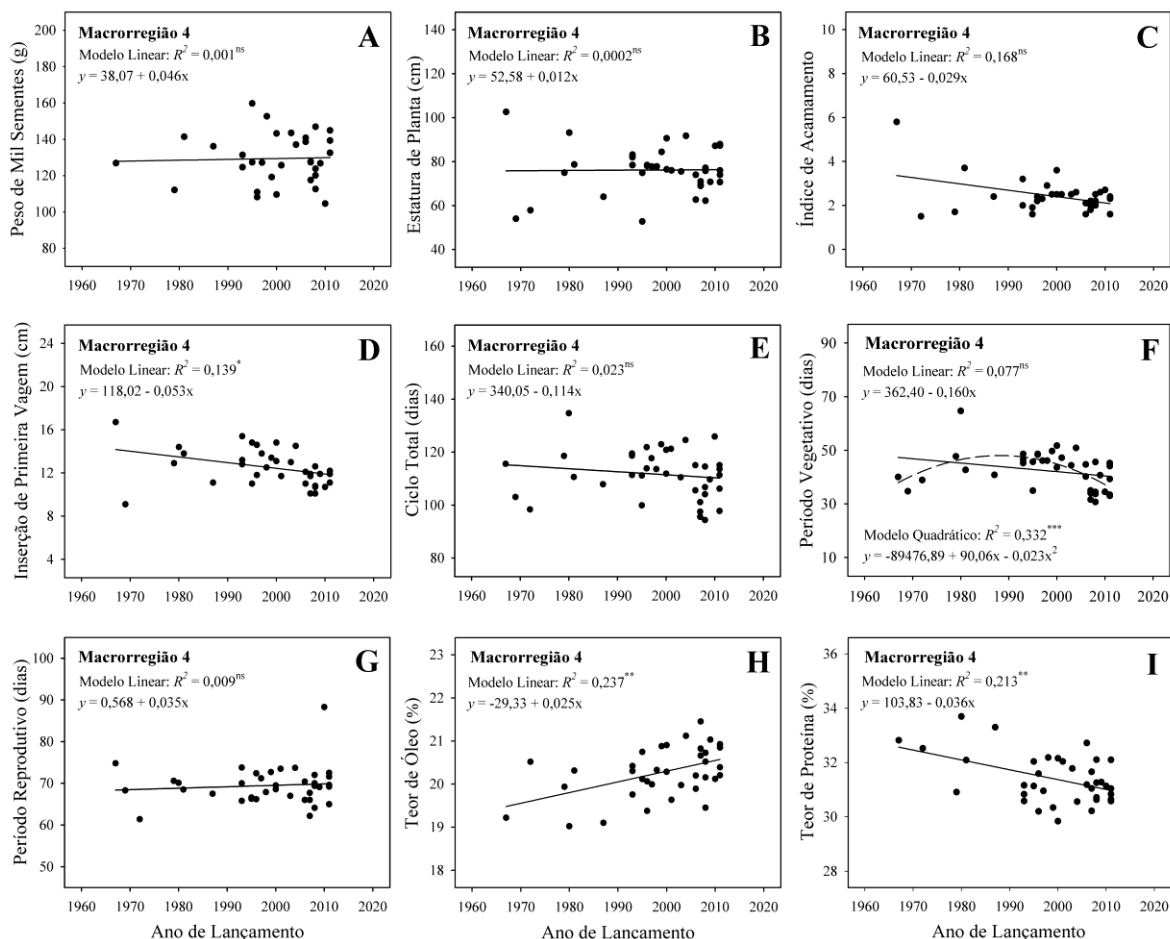
4.2.3 Caracteres Agronômicos, Fenológicos e Bioquímicos

Embora houve ganho genético positivo para o RG, não foi observado ganho para o peso de mil sementes (PMS) ao longo dos anos na região Centro-Oeste do Brasil (Figura 11A). Estes resultados corroboram com estudos recentes realizados nos EUA (RINCKER et al., 2014; BOEHM Jr. et al., 2019) e Argentina (DE FELIPE et al., 2016). Conforme já destacado, esse comportamento pode ser explicado pela ausência de correlação positiva deste caractere com o RG e demais componentes, como relatado em outros estudos (MORRISON et al., 2000; JIN et al., 2010; BOEHM Jr. et al., 2019). Além disso, esse resultado indica que as maiores produtividades das novas cultivares foram ocasionadas pelo maior número de sementes por unidade de área (sementes por vagem, vagens por planta e/ou sementes por planta), resultado observado por outros autores (MORRISON et al., 2000; CUI e YU, 2005; KAHN e BOARD, 2012; RINCKER et al., 2014).

Os caracteres estatura de planta (EP) e índice de acamamento (IA) também não apresentaram alterações significativas ao longo dos anos, embora houve uma forte tendência de redução no acamamento nas novas cultivares (Figura 11B e C). No entanto, apesar da falta de significância para estes caracteres, a estatura média das novas cultivares variou entre ~70-90 cm, mantendo o índice de acamamento de ~2-3 unidades na escala de notas, evitando, assim, perdas significativas a campo. Comportamento semelhante foi observado na macrorregião 1, onde apesar na ausência de diferenças para a EP, houve redução do acamamento nas novas cultivares (Figura 4).

Diversos estudos realizados em outros países, como EUA e China, têm mostrado redução simultânea da EP e IA ao longo dos anos (KEEP et al., 2016; WANG et al., 2016). Essa tendência de redução da EP tem sido favorecida pela seleção para maior resistência ao acamamento (USTUN et al., 2001; ROGERS et al., 2015), comportamento que não foi observado no presente estudo para a região Centro-Oeste do Brasil. Segundo Rincker et al. (2014), a EP não é um caractere de importância primária como o IA, e cultivares altas têm sido constantemente lançadas nos EUA desde que apresentem resistência ao acamamento. Vale destacar, também, que, embora não houve diferenças para EP ao longo dos anos, houve redução significativa na altura de inserção da primeira vagem (IPV). No entanto, apesar da redução deste caractere nas novas cultivares, os valores mínimos permaneceram acima de 10 cm, não comprometendo a colheita mecanizada e evitando perdas (Figura 11D).

Figura 11 – Regressões entre o ano de lançamento e o peso de mil sementes (A), estatura de planta (B), índice de acamamento (C), altura de inserção de primeira vagem (D), ciclo total (E), período vegetativo (F), período reprodutivo (G), teor de óleo (H) e proteína (I) de cultivares de soja avaliadas na macrorregião 4 da região Centro-Oeste do Brasil. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.



Cada ponto no gráfico refere-se ao melhor preditor linear não viesado (BLUP - *best linear unbiased predictor*) de cada cultivar, gerado para cada caractere agrônomo, fenológico e bioquímico para o conjunto de ambientes (local x ano) da região avaliada. *, ** e ***: Coeficientes de regressão significativos a 5% ($p < 0,05$), 1% ($p < 0,01$) e 0,1% ($p < 0,001$) de probabilidade de erro, respectivamente; ^{ns}: Não significativo.

Em relação aos caracteres fenológicos, houve uma leve tendência de redução no ciclo e período vegetativo ao longo dos anos, com taxas de $-0,11$ e $-0,16$ dias ano^{-1} , respectivamente, apesar das reduções observadas não serem significativas (Figura 11E e F). Vale destacar, também, que, para o período vegetativo, o modelo quadrático foi significativo, mostrando um aumento inicial entre as décadas de 1960 e 1990, seguido de redução no final da série histórica avaliada, principalmente após a década de 2000 (Figura 11F). No entanto, não houve diferença significativa para o período reprodutivo entre as cultivares antigas e modernas, o qual permaneceu constante ao longo dos anos (Figura 11G). Este comportamento foi similar ao observado na região Sul do Brasil (Figura 5), apesar da falta de significância para ambos os caracteres.

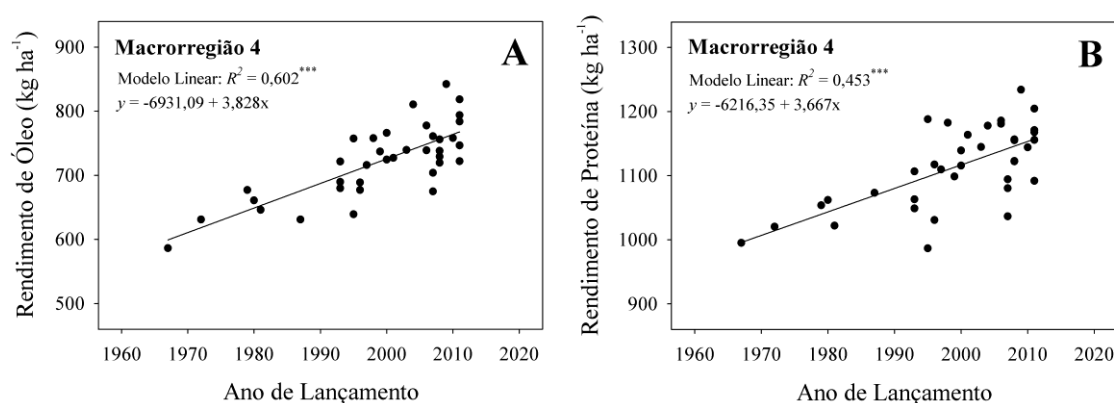
Embora a redução do ciclo não tenha sido significativa ao longo dos anos, pode-se observar que, nos últimos anos da série histórica avaliada, houve o lançamento de um grande número de cultivares precoces na região Centro-Oeste (Figura 11E). Conforme já destacado, a partir da década de 2000 houve a necessidade de obtenção de cultivares que possibilitassem a realização de uma segunda safra com milho (*Zea mays*) ou algodão (*Gossypium hirsutum* L.) na região, além de favorecer o controle da ferrugem asiática da soja (*Phakopsora pachyrhizi*) (TOLEDO et al., 2006; SPECHT et al., 2014). Para isso, houve a introdução de germoplasma indeterminado da Argentina e América do Norte, que apresentavam potencial produtivo aliado à precocidade, o que, até então, era difícil de se obter com os genótipos determinados, pois necessitavam de um período mínimo de desenvolvimento antes do florescimento para atingirem um porte adequado (SPECHT et al., 2014). De maneira geral, cultivares indeterminadas também apresentam folhas menores e mais eretas, além de entrenós mais curtos, o que também favoreceu o controle de doenças e uma maior resistência ao acamamento (SPECHT et al., 2014).

Em relação aos caracteres bioquímicos, foi observado aumento nos teores de óleo (TOL) e diminuição nos teores de proteína (TPR) ao longo dos anos na região Centro-Oeste do Brasil (Figura 11H e I). Para o TOL, houve ganho de $0,025\% \text{ ano}^{-1}$ ($0,127\% \text{ ano}^{-1}$), e para o TPR redução de $-0,036\% \text{ ano}^{-1}$ ($-0,111\% \text{ ano}^{-1}$). Essa tendência de aumento nos TOL e redução nos TPR ao longo dos anos foi similar a observada no presente estudo para a região Sul (Figura 7) e corrobora com diversos estudos conduzidos no Brasil (BONATO et al., 2000), Canadá (MORRISON et al., 2000; 2008) e EUA (USTUN et al., 2001; ROWNTREE et al., 2013; RINCKER et al., 2014). Estes resultados indicam que o melhoramento focado no RG alterou indiretamente estes caracteres, aumentando os teores de óleo e diminuindo os teores de proteína ao longo dos anos (RINCKER et al., 2014; ROGERS et al., 2015). Isso ocorre em função da correlação negativa existente entre óleo e proteína, sendo amplamente relatada por vários autores (COBER e VOLDENG, 2000; USTUN et al., 2001; DE FELIPE et al., 2016; BOEHM Jr. et al., 2019) e também identificada no presente estudo para a região Centro-Oeste ($r = -0,67^{**}$, dados não apresentados).

De maneira similar à região Sul, o rendimento de óleo e proteína também aumentou ao longo dos anos na região Centro-Oeste. As taxas de ganho absolutas foram de $3,83 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para óleo e $3,67 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para proteína. Estes ganhos equivalem a taxas relativas de $0,64$ e $0,37\% \text{ ano}^{-1}$, respectivamente (Figura 12A e B). Embora o rendimento por unidade de área destes componentes seja importante, o grande interesse das indústrias de

processamento está nas suas concentrações nos grãos. Conforme já destacado, a redução nos teores de proteína tem causado preocupação por parte das indústrias de esmagamento, uma vez que a composição das sementes tem um impacto direto sobre a qualidade dos produtos finais (RINCKER et al., 2014; PÍPOLO et al., 2015; DE FELIPE et al., 2016). No entanto, o mercado ainda não paga nenhum valor adicional sobre a composição das sementes, e o foco dos programas de melhoramento de modo geral tem sido a melhoria da produtividade, com poucas exceções. Neste sentido, alguns autores têm destacado a necessidade de seleção simultânea para estes caracteres nos próximos anos, para que esse problema seja amenizado no futuro (BOEHM Jr. et al., 2019).

Figura 12 – Regressões entre o ano de lançamento e o rendimento de óleo (A) e proteína (B) de cultivares de soja avaliadas na macrorregião 4 da região Centro-Oeste do Brasil. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.

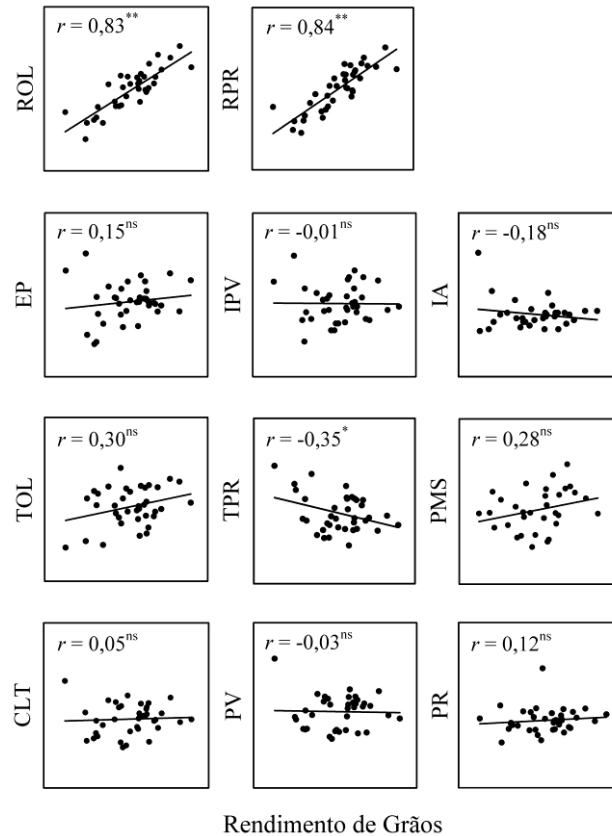


Cada ponto no gráfico refere-se ao melhor preditor linear não viesado (BLUP - *best linear unbiased predictor*) de cada cultivar, gerado para cada caractere bioquímico no conjunto de ambientes (local x ano) da região avaliada. ***: Coeficientes de regressão significativos a 0,1% ($p < 0,001$) de probabilidade de erro.

4.2.4 Correlação entre Caracteres

Análises de correlação também foram realizadas entre o RG com os caracteres agrônômicos, fenológicos e bioquímicos avaliados na região Centro-Oeste do Brasil (Figura 13). Foi identificada correlação positiva de elevada magnitude entre o RG e os caracteres ROL ($r = 0,83^{**}$) e RPR ($r = 0,84^{**}$). Estes resultados eram esperados, pois estes caracteres foram obtidos pela multiplicação dos teores de óleo e proteína pelo RG, assim como observado na região Sul do Brasil (Figura 9).

Figura 13 – Coeficientes de correlação de Pearson entre o rendimento de grãos e caracteres agrônômicos, fenológicos e bioquímicos de cultivares de soja avaliadas na macrorregião 4 da região Centro-Oeste do Brasil. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.



Correlações obtidas entre os melhores preditores lineares não viesados (BLUP - *best linear unbiased predictor*) de cada cultivar, gerados para cada caractere no conjunto de ambientes (local x ano) da região avaliada. * e **: Coeficientes de correlação significativos a 5% ($p < 0,05$) e 1% ($p < 0,01$) de probabilidade de erro pelo teste *t*, respectivamente. ns: Não significativo. ROL: Rendimento de Óleo; RPR: Rendimento de Proteína; EP: Estatura de Planta; IPV: Inserção de Primeira Vagem; IA: Índice de Acamamento; TOL: Teor de Óleo; TPR: Teor de Proteína; PMS: Peso de Mil Sementes; CLT: Ciclo Total; PV: Período Vegetativo; PR: Período Reprodutivo.

O rendimento de grãos também apresentou correlação positiva com o TOL ($r = 0,30^{ns}$) e negativa com o TPR ($r = -0,35^*$) na macrorregião 4 (Figura 13). No entanto, não foi observada significância para o TOL, resultado similar ao observado na região Sul e previamente discutido (Figura 9). Apesar da ausência de significância para o TOL, diversos estudos têm relatado que este caractere tem aumentado indiretamente com os aumentos de produtividade, sendo acompanhado por reduções nos teores de proteína (VOLDENG et al., 1997; MORRISON et al., 2008; BOEHM Jr. et al., 2019), como observado no presente estudo para as regiões Sul e Centro-Oeste. Além disso, correlação positiva de baixa magnitude também foi observada entre o RG e o PMS ($r = 0,28^{ns}$), mas com ausência de significância (Figura 13). Ausência de correlações significativas entre estes caracteres também tem sido relatada por vários autores

(MORRISON et al., 2000; JIN et al., 2010; DE FELIPE et al., 2016), o que indica que os aumentos de produtividade em soja estão mais associados com os demais componentes do rendimento. Para os demais caracteres avaliados na região Centro-Oeste, as correlações obtidas foram de baixa magnitude e não significativas (Figura 13).

4.3 REGIÃO NORTE E NORDESTE

4.3.1 Caracterização dos Ambientes

Foi observada significância para o efeito de genótipo, ambiente e interação genótipo x ambiente para a maioria dos caracteres avaliados, com exceção do efeito de genótipo para os caracteres RG, IA e PR, e do efeito de interação genótipo x ambiente para o TOL (Tabela 6). No entanto, as regressões foram ajustadas para todos os caracteres para fins de comparação. Considerando o conjunto de oito ambientes (local x ano) avaliados nas regiões Norte e Nordeste, o rendimento de grãos variou de 3264 a 5175 kg ha⁻¹, com média geral de 3913 kg ha⁻¹ (Tabela 6).

Tabela 6 – Estimativas dos componentes da variância associados ao efeito de genótipo, ambiente e interação genótipo x ambiente para caracteres agrônômicos, fenológicos e bioquímicos de cultivares de soja avaliadas nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.

Fontes de Variação	Caracteres									
	RG	PMS	IPV	EP	IA	PV	PR	CLT	TOL	TPR
Genótipo	4965,9 ^{ns}	211,40 ^{***}	6,93 ^{**}	92,77 ^{***}	0,52 ^{ns}	33,53 ^{***}	9,93 ^{ns}	31,73 ^{***}	0,36 ^{***}	0,41 ^{***}
Gen x Amb	98638,5 ^{***}	52,53 ^{***}	2,35 ^{**}	63,06 ^{***}	4,45 ^{***}	24,00 ^{***}	42,75 ^{***}	19,08 ^{***}	0,07 ^{ns}	0,14 [*]
Ambiente	498809,3 ^{***}	309,05 ^{***}	7,59 ^{**}	101,18 ^{***}	3,78 ^{***}	46,74 ^{***}	14,53 ^{**}	106,97 ^{***}	0,29 ^{***}	0,88 ^{***}
Resíduo	206245,8	17,49	1,51	36,17	0,27	1,13	0,57	1,35	0,44	0,48
Média	3913	144,6	12,1	84,1	3,3	48	74	121	20,06	31,75
CV (%)	11,61	2,89	10,15	7,15	15,39	2,23	1,01	0,96	3,31	2,18

RG: Rendimento de Grãos (kg ha⁻¹); PMS: Peso de Mil Sementes (g); IPV: Inserção de Primeira Vagem (cm); EP: Estatura de Planta (cm); IA: Índice de Acamamento (notas); PV: Período Vegetativo (dias); PR: Período Reprodutivo (dias); CLT: Ciclo Total (dias); TOL: Teor de Óleo (%); TPR: Teor de Proteína (%); Gen: Genótipo; Amb: Ambiente; Gen x Amb: Interação Genótipo x Ambiente; CV: Coeficiente de Variação (%). *, ** e ***: Valores significativos a 5% ($p < 0,05$), 1% ($p < 0,01$) e 0,1% ($p < 0,001$) de probabilidade de erro, respectivamente; ^{ns}: Não significativo.

As estimativas dos componentes de variância, obtidas para o rendimento de grãos, mostraram que o efeito de ambiente foi responsável pela maior parte da variância total. A elevada variância para o efeito da interação genótipo x ambiente, também indica alterações

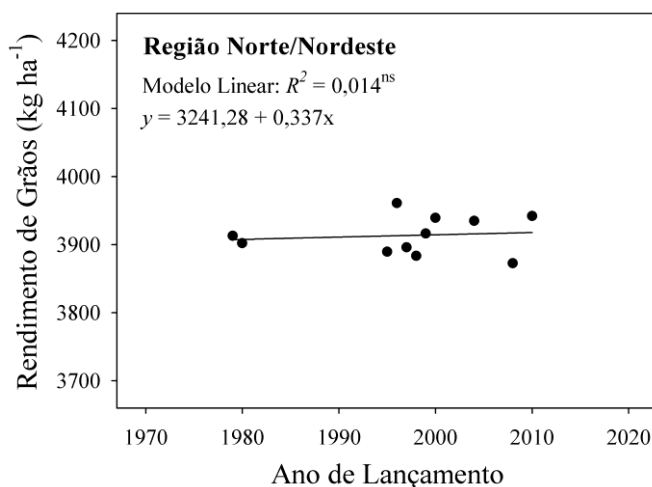
no ranqueamento das cultivares entre os ambientes avaliados (Tabela 6). O efeito de ambiente também apresentou a maior parte da variância total para a maioria dos caracteres, o que é esperado para ensaios conduzidos em uma ampla área de cultivo. Os ensaios foram conduzidos em ambientes com latitudes variando entre 8,83 e 12,15 S, e altitudes entre 210 e 490 m, o que influencia significativamente o comportamento dos genótipos.

4.3.2 Ganho Genético para o Rendimento de Grãos

Conforme destacado anteriormente, não houve significância para o efeito de genótipo para o RG nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. Consequentemente, não foi observado ganho genético ao longo dos anos (Figura 14). Vale destacar, também, que, das 11 cultivares avaliadas nas regiões Norte e Nordeste, 10 cultivares também foram avaliadas na macrorregião 4 da região Centro-Oeste (RECs 401 e 402) (Tabela 1). A partir da avaliação do ganho genético apenas destas 10 cultivares na região Centro-Oeste, foi observado ganho positivo de 20,15 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (0,66% ano⁻¹), embora com ausência de significância ($p = 0,062$; dados não apresentados).

Estes resultados indicam que as novas cultivares apresentam uma maior adaptação à região Centro-Oeste comparativamente as regiões Norte e Nordeste do Brasil. Vale destacar, também, que, a média geral dos ensaios na região Nordeste (REC 405, 4450 kg ha⁻¹) foi superior à média da região Norte (REC 501, 3393 kg ha⁻¹) (dados não apresentados). Os ambientes avaliados na REC 405 possuem altitudes e latitudes mais similares às encontradas na região Centro-Oeste, diferentemente dos ambientes avaliados na REC 501 que estão localizados em latitudes e altitudes mais baixas, sendo, portanto, uma condição mais restritiva para a cultura. Além disso, é provável que as novas cultivares avaliadas na região Norte e Nordeste no presente estudo, foram desenvolvidas e lançadas para a região Centro-Oeste, mas tiveram a sua recomendação estendida. Isso poderia explicar a ausência de ganho genético na região, e destaca a necessidade do lançamento de cultivares mais adaptadas, principalmente por se tratar de uma região mais recente de expansão da cultura.

Figura 14 – Regressão entre o ano de lançamento e o rendimento de grãos de cultivares de soja avaliadas nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.



Cada ponto no gráfico refere-se ao melhor preditor linear não viesado (BLUP - *best linear unbiased predictor*) médio de cada cultivar, obtido para o conjunto de 8 ambientes (local x ano) das regiões Norte e Nordeste do Brasil. ^{ns}: Coeficiente de regressão não significativo a 5% ($p \geq 0,05$) de probabilidade de erro.

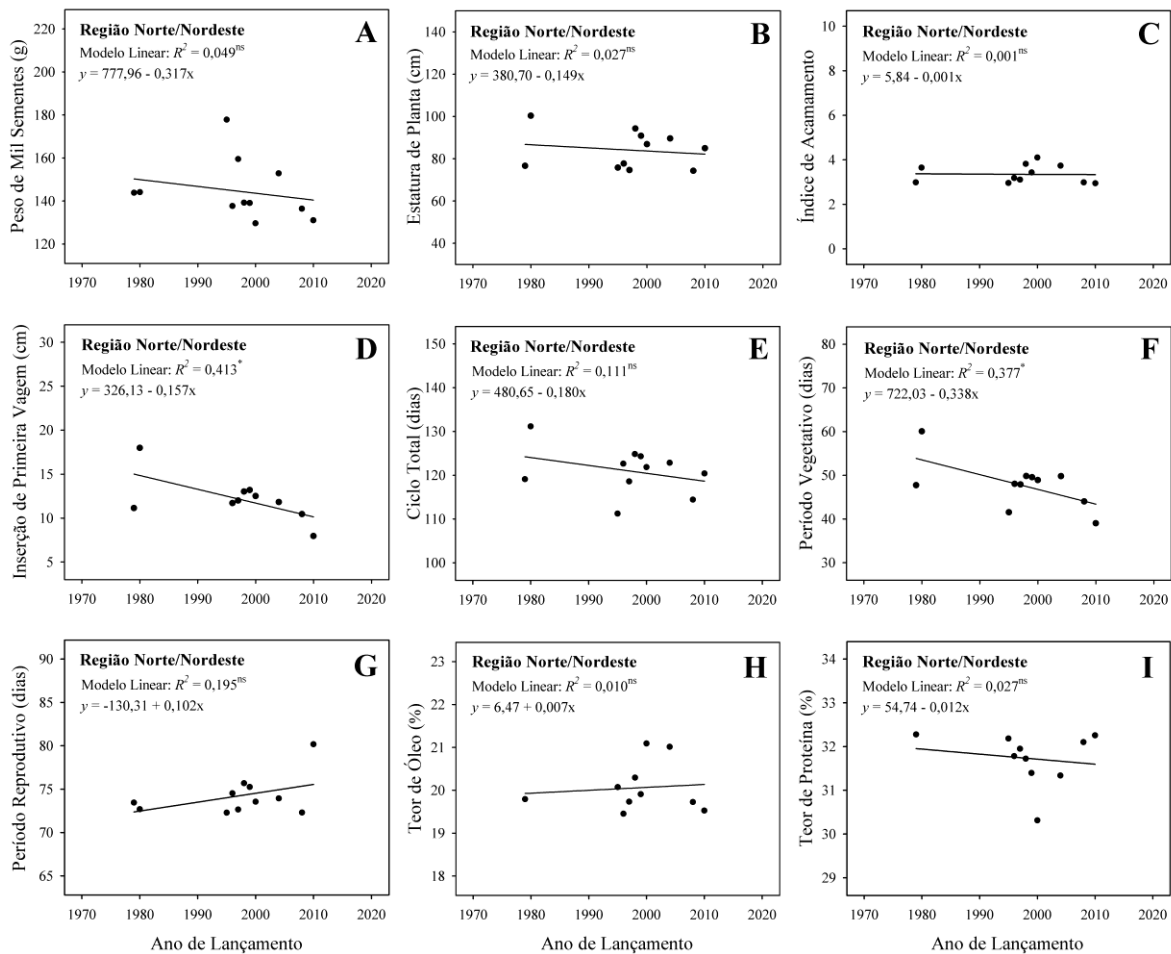
4.3.3 Caracteres Agronômicos, Fenológicos e Bioquímicos

O caractere peso de mil sementes (PMS) apresentou tendência de redução ao longo dos anos, com taxa de $-0,317 \text{ g ano}^{-1}$. No entanto, a redução não foi significativa (Figura 15A). Este resultado foi similar ao observado no presente estudo para a região Sul (Figura 4A), bem como em vários estudos conduzidos em outros países, que também não identificaram ganho significativo para este caractere em soja (MORRISON et al., 2000; JIN et al., 2010; RINCKER et al., 2014; DE FELIPE et al., 2016). Da mesma forma, a estatura de planta (EP) e o índice de acamamento (IA) também não apresentaram ganho significativo na região Norte e Nordeste, resultado similar ao observado na região Centro-Oeste, com ausência de diferenças entre as cultivares antigas e modernas (Figura 15B e C). Por outro lado, houve redução significativa na altura de inserção da primeira vagem (IPV), com taxa de $-0,157 \text{ cm ano}^{-1}$ ($-1,05\% \text{ ano}^{-1}$) (Figura 15D). No entanto, os valores mínimos observados para este caractere ficaram próximos a 10 cm, que são valores aceitáveis para evitar perdas durante a colheita mecanizada.

Em relação aos caracteres fenológicos, não foram identificadas diferenças significativas para o ciclo total das cultivares avaliadas, embora houve tendência de redução ao longo dos anos (Figura 15E). No entanto, foi observada redução significativa para o período vegetativo, com taxa de $-0,338 \text{ dias ano}^{-1}$, o que equivale à taxa relativa de $-0,63\% \text{ ano}^{-1}$ (Figura

15F), resultado similar ao observado nas macrorregiões 1 e 2 (Figura 5E e F). Por outro lado, houve tendência de aumento do período reprodutivo, mas com ausência de significância entre as cultivares antigas e modernas ao longo dos anos (Figura 15G).

Figura 15 – Regressões entre o ano de lançamento e o peso de mil sementes (A), estatura de planta (B), índice de acamamento (C), altura de inserção de primeira vagem (D), ciclo total (E), período vegetativo (F), período reprodutivo (G), teor de óleo (H) e proteína (I) de cultivares de soja avaliadas nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. UTFPR, Pato Branco - PR, 2021.



Cada ponto no gráfico refere-se ao melhor preditor linear não viesado (BLUP - *best linear unbiased predictor*) de cada cultivar, gerado para cada caractere agrônomo, fenológico e bioquímico para o conjunto de ambientes (local x ano) da região avaliada. *: Coeficientes de regressão significativos a 5% ($p < 0,05$) de probabilidade de erro; ^{ns}: Não significativo.

Embora houve aumento nos teores de óleo e redução nos teores de proteína no presente estudo para as regiões Sul e Centro-Oeste (Figura 7 e 11), não foram identificados ganhos nas regiões Norte e Nordeste do Brasil ao longo dos anos (Figura 15H e I). Vale destacar ainda, que, a ausência de ganhos significativos para estes caracteres, bem como para a maioria

dos caracteres avaliados nas regiões Norte e Nordeste, possa ser resultado do baixo número de cultivares avaliadas comparativamente às regiões Sul e Centro-Oeste.

Os resultados obtidos no presente estudo mostraram que a atuação dos programas de melhoramento resultou em ganho positivo para o rendimento de grãos nas principais regiões produtoras do país, além de melhorias em diversos caracteres de importância em soja. As taxas lineares e crescentes de ganho genético indicam ausência de platôs de produtividade, demonstrando que mais ganhos podem ser obtidos no futuro. No entanto, apesar do ganho genético positivo, as taxas de ganho obtidas durante as cinco décadas avaliadas ainda estão abaixo das necessárias para alimentar a população projetada de mais de 9 bilhões de habitantes até 2050 (FAO, 2009; RAY et al., 2013), conclusão também destacada por Boehm Jr. et al. (2019) para as condições dos EUA.

Vale destacar, também, que, do volume total da produção global projetada para as próximas décadas, espera-se que apenas uma pequena parte seja da expansão de áreas agricultáveis, mas que aproximadamente 90% seja resultado de maiores produtividades e intensidades de cultivo (FAO, 2009). Portanto, para atender à demanda crescente por alimentos e garantir a segurança alimentar no futuro, é necessário aumentar ainda mais as taxas de ganho das principais culturas de importância agrônômica (CASSMAN, 1999; SPECHT et al., 1999; DE FELIPE et al., 2016). Neste sentido, Crossa et al. (2021) destacam várias tecnologias que estão disponíveis atualmente e que podem ser incorporadas em programas de melhoramento para acelerar o ganho genético. Como exemplo, pode-se citar o uso da genômica para predição de valores genéticos, reduzindo o tempo e aumentando a acurácia na seleção, bem como a fenotipagem de alto rendimento, que permite obter dados agrônômicos com precisão, rapidez e menores custos, entre outras ferramentas que permitirão potencializar o ganho genético nos próximos anos.

5 CONCLUSÕES

O ganho genético para o rendimento de grãos no período entre 1966 e 2011 foi de 15,31, 13,83 e 14,13 kg ha⁻¹ ano⁻¹ na região Sul; 14,89, 14,17 e 13,75 kg ha⁻¹ ano⁻¹ na macrorregião 1; e de 14,47, 11,98 e 13,48 kg ha⁻¹ ano⁻¹ na macrorregião 2, para o conjunto completo, precoce e médio de cultivares, respectivamente. Estes ganhos equivalem a taxas relativas que variam entre 0,33 e 0,42% ano⁻¹.

As taxas de ganho obtidas na região Centro-Oeste entre 1967 e 2011 foram de 17,55, 13,58, 21,84 e 20,83 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para o conjunto completo de cultivares, e para os grupos de maturação precoce, médio e tardio. Estes ganhos equivalem às taxas relativas de 0,62, 0,47, 0,77 e 0,69% ano⁻¹, respectivamente.

Não houve ganho genético significativo para o rendimento de grãos nas regiões Norte e Nordeste do Brasil no período compreendido entre 1979 e 2010. Estes resultados destacam a necessidade de mais esforços dos programas de melhoramento na região, visando o lançamento de cultivares mais adaptadas.

Os ganhos de produtividade ao longo dos anos foram acompanhados por aumento na estatura de planta, teor de óleo e rendimento de óleo e proteína na região Sul, e redução no peso de mil sementes, período vegetativo, ciclo e teor de proteína, embora com diferenças entre macrorregiões. Na região Centro-Oeste, também houve aumento no teor de óleo e rendimento de óleo e proteína ao longo dos anos, além de redução nos teores de proteína.

Os resultados obtidos mostraram que os programas de melhoramento têm sido eficientes no aumento do rendimento da cultura, não sendo identificados platôs de produtividade nas principais regiões produtoras do país. Isso demonstra que os esforços do melhoramento ao longo dos anos, visando selecionar genótipos adaptados para as diferentes regiões de cultivo do Brasil, e mais recentemente, a introdução de germoplasma indeterminado, foram fundamentais para a obtenção de ganhos genéticos positivos para a cultura, permitindo ao Brasil estar hoje na posição de maior produtor e exportador mundial de soja.

REFERÊNCIAS

- ABREU, A. F. B.; RAMALHO, M. A. P.; SANTOS, J. B. MARTINS, L. A. Progresso do melhoramento genético do feijoeiro nas décadas de setenta e oitenta nas regiões Sul e Alto Paranaíba em Minas Gerais. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.29, p.105-112, 1994.
- AGROSTAT. Estatísticas de Comércio Exterior do Agronegócio Brasileiro. Exportação Importação – Soja em Grãos. Disponível em: <<http://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm>>. Acesso 22 Abr 2021.
- ALLIPRANDINI, L. F.; TOLEDO, J. F. F.; FONSECA JR, N. S.; KIIHL, R. A. S.; ALMEIDA, L. A. Ganho genético em soja no estado do Paraná, via melhoramento, no período de 1985/86 a 1989/90. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.28, p.489-497, 1993.
- ALMEIDA, L.A., KIIHL, R.A.S., MIRANDA, M.A.C., CAMPELO, G.J.A. Melhoramento da soja para regiões de baixas latitudes. Recursos Genéticos e Melhoramento de Plantas para o Nordeste Brasileiro. 1999. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/458966/melhoramento-da-soja-para-regioes-de-baixas-latitudes>.
- ALVARADO, G., LÓPEZ, M., VARGAS, M., PACHECO, Á., RODRÍGUEZ, F., BURGUEÑO, J., CROSSA J. META-R (Multi Environment Trial Analysis with R for Windows), Version 6.04. CIMMYT Research Data & Software Repository Network, V23, 2015.
- AMORIM NETO, S.; ANDRADE, W. E. B.; COSTA, R. A. Aumento da produtividade de arroz irrigado no estado do Rio de Janeiro de 1981/82 a 1991/92. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.33, p.369-374, 1998.
- ARIAS, E. R. A.; RAMALHO, M. A. P. Progresso genético em milho no estado do Mato Grosso do Sul, no período de 1986/87 a 1993/94. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.33, p.1549-1554, 1998.
- ATROCH, A. L.; NUNES, G. H. S. Progresso genético em arroz de várzea úmida no estado do Amapá. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.35, p.767-771, 2000.
- BARBOSA NETO, J. F.; MATIELLO, R. R.; CARVALHO, F. I. F.; OLIVEIRA, J. M. S.; PEGORARO, D. G.; SCHNEIDER, F.; SORDI, M. E. B.; VACARO, E. Progresso genético no melhoramento da aveia-branca no Sul do Brasil. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.35, p.1605-1612, 2000.

BEICHE, E.; BENIN, G.; SILVA, C. L.; MUNARO, L. B.; MARCHESE, J. A. Genetic gain in yield and changes associated with physiological traits in Brazilian wheat during the 20th century. *European Journal of Agronomy*, v.61, p.49-59, 2014.

BOEHM JR., J.D., ABDEL-HALEEM, H., SCHAPAUGH JR., W.T., RAINEY, K., PANTALONE, V.R., SHANNON, G., KLEIN, J., CARTER JR., T.E., CARDINAL, A.J., SHIPE, E.R., GILLEN, A.M., SMITH, J.R., CHEN, P., WEAVER, D.B., BOERMA, H.R., LI, Z. Genetic Improvement of US Soybean in Maturity Groups V, VI, and VII. *Crop Science*, v.59, p.1838-1852, 2019.

BOERMA, H. R. Comparison of past and recently developed soybean cultivars in maturity groups VI, VII and VIII. *Crop Science*, v.19, p.611-613, 1979.

BONATO, E.R., BERTAGNOLLI, P.F., LANGE, C.E., RUBIN, S.A.L. Teor de óleo e de proteína em genótipos de soja desenvolvidos após 1990. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v.35, p.2391-2398, 2000.

BORNHOFEN, E., TODESCHINI, M.H., STOCO, M.G., MADUREIRA, A., MARCHIORO, V.S., STORCK, L., BENIN, G. Wheat Yield Improvements in Brazil: Roles of Genetics and Environment. *Crop Science*, v.57, p.1-12, 2018.

BRASIL. Lei nº 9.456, de 25 de abril de 1997. Institui a Lei de Proteção de Cultivares e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19456.htm>. Acesso em 21 Nov 2020.

BRESEGHELLO, F.; RANGEL, P. H. N.; DE MORAIS, O. P. Ganho de produtividade pelo melhoramento genético do arroz irrigado no nordeste do Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.34, p.399-407, 1999.

CARGNIN, A.; SOUZA, M. A.; FRONZA, V.; FOGAÇA, C. M. Genetic and environment contributions to increased wheat yield in Minas Gerais, Brazil. *Scientia Agricola*, v.66, p.317-322, 2009.

CASSMAN, K.G. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 96, p. 5952–5959, 1999.

CESB (2017). Case campeão nacional e regional sul safra 2016/2017. Comitê Estratégico Soja Brasil. Disponível em: <<http://www.cesbrasil.org.br/case-campeao-nacional-e-regional-sul-safra-20162017>>. Acesso em: 27 Fev 2020.

CHIORATO, A. F.; CARBONELL, S. A. M.; VENCovsky, R.; FONSECA JUNIOR, N. S.; PINHEIRO, J. B. Genetic gain in the breeding program of common beans at IAC from 1989 to 2007. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, v.10, p.329-336, 2010.

COBER, E.R.; VOLDENG, H.D. Developing High-Protein, High-Yield Soybean Populations and Lines. *Crop Science*, v. 40, p. 39-42, 2000.

COBER, E. R.; VOLDENG, H. D. A retrospective look at short-season soybean cultivar development in Ontario. *Canadian Journal of Plant Science*, v.92, p.1239-1243, 2012.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Série Histórica das Safras - Soja. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras?start=30>>. Acesso em 23 Dez 2020.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, v.8 – Safra 2020/21, n.8 – 8º Levantamento. Tabela de Dados – Produção e Balanço de Oferta e Demanda de Grãos (Soja – Safras 2019/20 e 2020/21). Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em 26 Mai 2021.

COSTA, M.M.; DI MAURO, A.O.; UNÊDA-TREVISOLI, S.H.; ARRIEL, N.H.C.; BÁRBARO, I.M.; MUNIZ, F.R.S. Ganho genético por diferentes critérios de seleção em populações segregantes de soja. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v.39, n.11, p.1095-1102, 2004.

COX, T. S.; SHROYER, J. P.; BEN-HUI, L.; SEARS, R. G.; MARTIN, T. J. Genetic improvement in agronomic traits of hard red winter wheat cultivars from 1919 to 1987. *Crop Science*, v.28, p.756-760, 1988.

CROSSA, J.; FRITSCHÉ-NETO, R.; MONTESINOS-LOPEZ, O. A.; COSTA-NETO, G.; DREISIGACKER, S.; MONTESINOS-LOPEZ, A.; BENTLEY, A. R. The Modern Plant Breeding Triangle: Optimizing the Use of Genomics, Phenomics, and Enviromics Data. *Frontiers in Plant Science*, v.12, p.1-7, 2021.

CRUZ, C.D. Programa Genes: versão Windows; aplicativo computacional em genética e estatística. Viçosa: Editora UFV, 2001. 648p.

CRUZ, C.D. Genes Software – extended and integrated with the R, Matlab and Selegen. *Acta Scientiarum*. v.38, n.4, p.547-552, 2016.

CUI, S.Y.; YU, D.Y. Estimates of relative contribution of biomass, harvest index and yield components to soybean yield improvements in China. *Plant Breeding*, v.124, p.473-476, 2005.

DE FELIPE, M.; GERDE, J.A.; ROTUNDO, J.L. Soybean genetic gain in maturity groups III to V in Argentina from 1980 to 2015. *Crop Science*, v.56, p.1-12, 2016.

DE FELIPE, M., BORRAS, L., TRUONG, S. K., MCCORMICK, R. F., & ROTUNDO, J. L. Physiological processes associated with soybean genetic progress in Argentina. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, p. 1-15, 2020.

DO VALE, J. C.; SOARES, P. C.; CORNÉLIO, V. M. O.; REIS, M. S.; BORGES, V.; BISI, R. B.; SOARES, A. A.; FRITSCHÉ-NETO, R. Contribuição genética na produtividade do arroz irrigado em Minas Gerais no período de 1998 a 2010. *Bragantia*, v.71, p.460-466, 2012.

EGLI, D.B.; LEGGETT, J.E.; WOOD, J.M. Influence of Soybean Seed Size and Position on the Rate and Duration of Filling. *Agronomy Journal*, v.70, p.127-130, 1978.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global agriculture towards 2050. Rome, FAO, 2009. Disponível em: <http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/HLEF2050_Global_Agriculture.pdf>. Acesso em: 4 Ago 2020.

FARIA, A.P., FONSECA JR, N.S., DESTRO, D., FARIA, R.T. Ganho genético na cultura da soja. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 28, p.71-78, 2007.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. Stages of Soybean Development. Special Report 80. Cooperation Extension Service, Agriculture and Home Economic Experiment Station. Iowa State University, Ames, 1977.

FERNANDES, J. S. C.; FRAZON, J. F. Thirty years of genetic progress in maize (*Zea mays* L.) in a tropical environment. *Maydica*, v.42, p.21-27, 1997.

GODOI, C.R.C., DUARTE, J.B., PINHEIRO, J.B. Genetic dissimilarity in tropical soybean genotypes. Paper presented at World Soybean Research Conference, IX. Durban, South Africa. 17–22 February, 2013.

HARTWIG, E.E.; KIIHL, R.A.S. Identification and utilization of a delayed flowering character in soybean for short-day conditions. *Field Crops Research*, v.2, p.145-151, 1979.

HEIL, C. (2010) Rapid, multi-component analysis of soybeans by FT-NIR Spectroscopy. Madison: Thermo Fisher Scientific, 3 p, 2010 (Application note: 51954). Disponível em: <http://www.nicoletcz.cz/userfiles/file/vjegy/soybeans.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2012.

HIROMOTO, D. M.; VELLO, N. A. The genetic base of Brazilian soybean [(*Glycine max* L. (Merrill)] cultivars. *Brazilian Journal of Genetics*, v.9, p.295-306, 1986.

JIN, J.; LIU, X.; WANG, G.; MI, L.; SHEN, Z.; CHEN, X.; HERBERT, S. J. Agronomic and physiological contributions to the yield improvement of soybean cultivars released from 1950 to 2006 in Northeast China. *Field Crops Research*, v.115, p.116-123, 2010.

KAHLON, C.S.; BOARD, J.E. Growth Dynamic Factors Explaining Yield Improvement in New Versus Old Soybean Cultivars. *Journal of Crop Improvement*, v.26, p.282-299, 2012.

KAHLON, C.S.; BOARD, J.E.; KANG, M.S. An Analysis of Yield Component Changes for New vs. Old Soybean Cultivars. *Agronomy Journal*, v.103, p.13-22, 2011.

KARMAKAR, P. G.; BHATNAGAR, P. S. Genetic improvement of soybean varieties released in India from 1969 to 1993. *Euphytica*, v.90, p.95-103, 1996.

KASTER, M.; FARIAS, J. R. B. Regionalização dos testes de valor de cultivo e uso e da indicação de cultivares de soja – terceira aproximação. Londrina: Embrapa Soja, 69p, 2012 (Documentos/ Embrapa Soja, ISSN: 2176-2937; n.330).

KEEP, N. R.; SCHAPAUGH Jr, W. T.; PRASAD, P. V. V.; BOYER Jr, J. E. Changes in

Physiological Traits in Soybean with Breeding Advancements. *Crop Science*, v.56, p.122-131, 2016.

KOESTER, R. P.; SKONECZKA, J. A.; CARY, T. R.; DIERS, D. W.; AINSWORTH, E. A. Historical gains in soybean (*Glycine max* Merr.) seed yield are driven by linear increases in light interception, energy conversion, and partitioning efficiencies. *Journal of Experimental Botany*, p.1-11, 2014.

KOESTER, R. P.; NOHL, B. M.; DIERS, B. W.; AINSWORTH, E. A. Has photosynthetic capacity increased with 80 years of soybean breeding? An examination of historical soybean cultivars. *Plant, Cell and Environment*, p.1-10, 2016.

LANGE, C. E.; FEDERIZZI, L. C. Estimation of soybean genetic progress in the south of Brazil using multi-environmental yield trials. *Scientia Agrícola*, v.66, p. 309-316, 2009.

LIU, G.; YANG, C.; XU, K.; ZHANG, Z.; LI, D.; WU, Z.; CHEN, Z. Development of yield and some photosynthetic characteristics during 82 years of genetic improvement of soybean genotypes in northeast China. *Australian Journal of Crop Science*, v.6, p.1416-1422, 2012.

LOPES, A.C.A.; VELLO, N.A.; PANDINI, F.; ROCHA, M.M.; TSUTSUMI, C.Y. Variabilidade e correlações entre caracteres em cruzamentos de soja. *Scientia Agrícola*, v.59, n.2, p.341-348, abr./jun. 2002.

LUEDDERS, V. D. Genetic improvement in yield of soybeans. *Crop Science*, v.17, p.971-972, 1977.

MATOS, J. W.; RAMALHO, M. A. P.; ABREU, A. F. B. Trinta e dois anos do programa de melhoramento genético do feijoeiro comum em Minas Gerais. *Ciência e Agrotecnologia*, v.31, p.1749-1754, 2007.

MESSINA, C.; HAMMER, G.; DONG, Z.; PODLICH, D.; COOPER, M. Modeling crop improvement in a GxExM framework via gene-trait-phenotype relationships. In V.O. Sadras & D.F. Calderni (Eds.), *Crop physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy* (pp. 235-265). Academic Press, 2009.

MEZZALIRA, I. Ganho genético para produtividade de grãos de soja na região central do

Brasil. Universidade Federal de Lavras-UFLA, Lavras, MG, 2017 (Dissertação).

MORRISON, M. J.; VOLDENG, H. D.; COBER, E. R. Physiological changes from 58 years of genetic improvement of short-season soybean cultivars in Canada. *Agronomy Journal*, v.91, p.685-689, 1999.

MORRISON, M. J.; VOLDENG, H. D.; COBER, E. R. Agronomic Changes from 58 Years of Genetic Improvement of Short-Season Soybean Cultivars in Canada. *Agronomy Journal*, v.92, p.780-784, 2000.

MORRISON, M. J.; COBER, E. R.; SALEEM, M. F.; MCLAUGHLIN, N. B.; FRÉGEAU-REID, J.; MA, B. L.; YAN, W.; WOODROW, L. Changes in Isoflavone Concentration with 58 Years of Genetic Improvement of Short-Season Soybean Cultivars in Canada. *Crop Science*, v.48, p.2201-2208, 2008.

PAGLIOSA, E. S. Ganho genético em soja na região meridional do Brasil. Universidade Estadual de Londrina-UEL, Londrina, PR, 2016 (Tese).

PENG, S.; LAZA, R. C.; VISPERAS, R. M.; SANICO, A. L.; GASSMAN, K. G.; KUSH, G. S. Grain yield of rice cultivar and lines developed in Philippines since 1966. *Crop Science*, v.40, p.307-314, 2000.

PÍPOLO, A.E., HUNGRIA, M., FRANCHINI, J.C., BALBINOT JUNIOR, A.A., DEBIASI, H., MANDARINO, J.M.G. Teores de óleo e proteína em soja: fatores envolvidos e qualidade para a indústria. Comunicado Técnico, Londrina, PR, 2015.

QIN, X.; FENG, F.; LI, D.; HERBERT, S.J.; LIAO, Y.; SIDDIQUE, K.H.M. Changes in yield and agronomic traits of soybean cultivars released in China in the last 60 years. *Crop & Pasture Science*, 2017.

QUIRINO, J.R.; OLIVEIRA, M.A.; LORINI, I.; ROSA, E.S.; HENNING, A.A.; FRANÇANETO, J.B.; KRZYZANOWSKI, F.C.; LEITE, R.S. Efeito comparativo dos sistemas de exaustão e respiro do silo na qualidade da soja armazenada, p. 230-238. In: Conferência Brasileira de Pós-Colheita, 6, 2014, Maringá. Anais... Londrina: ABRAPÓS, 2014.

RAMTEKE, R.; GUPTA, G. K.; MURLIDHARAN, P.; SHARMA, S. K. Genetic progress of soybean varieties released during 1969 to 2008 in India. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*, v.71, p.333-340, 2011.

RAY, D.K., MUELLER, N.D., WEST, P.C., FOLEY, J.A. Yield Trends Are Insufficient to Double Global Crop Production by 2050. *Plos One*, v.8, p. 1-8, 2013.

REIS, E. F.; REIS, M. S.; CRUZ, C. D.; SEDIYAMA, T. Comparação de procedimentos de seleção para produção de grãos em populações de soja. *Ciência Rural*, v.34, p.685-692, 2004.

RIBEIRO, N. D.; POSSEBON, S. B.; STORCK, L. Progresso genético em caracteres agronômicos no melhoramento do feijoeiro. *Ciência Rural*, v.33, p.629-633, 2003.

RINCKER, K.; NELSON, R.; SPECHT, J.; SLEPER, D.; CARY, T.; CIANZIO, S. R.; CASTEEL, S.; CONLEY, S.; CHEN, P.; DAVIS, V.; FOX, C.; GRAEF, G.; GODSEY, C.; HOLSHOUSER, D.; JIANG, G. L.; KANTARTZI, S. K.; KENWORTHY, W.; LEE, C.; MIAN, R.; MCHALE, L.; NAEVE, S.; ORF, J.; POYSA, V.; SCHAPAUGH, W.; SHANNON, G.; UNIATOWSKI, R.; WANG, D.; DIERS, B. Genetic Improvement of U.S. Soybean in Maturity Groups II, III, and IV. *Crop Science*, v.54, p.1419-1432, 2014.

RODRIGUES, O.; LHAMBY, J. C. B.; DIDONET, A. D.; MARCHESE, J. A. Fifty years of wheat breeding in Southern Brazil: yield improvement and associated changes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.42, p.817-825, 2007.

ROGERS, J.; CHEN, P.; SHI, A.; ZHANG, B.; SCABOO, A.; SMITH, F.; ZENG, A. Agronomic performance and genetic progress of selected historical soybean varieties in the southern USA. *Plant Breeding*, v.134, p.85-93, 2015.

ROWNTREE, S. C.; SUHRE, J. J.; WEIDENBENNER, N. H.; WILSON, E. W.; DAVIS V. M.; NAEVE, S. L.; CASTEEL, S. N.; DIERS, B. W.; SPECHT, J. E.; CONLEY, S. P. Genetic Gain × Management Interactions in Soybean: I. Planting Date. *Crop Science*, v.53, p.1128-1138, 2013.

ROWNTREE, S. C.; SUHRE, J. J.; WEIDENBENNER, N. H.; WILSON, E. W.; DAVIS, V. M.; NAEVE, S. L.; CASTEEL, S. N.; DIERS, B. W.; ESKER, P. D.; CONLEY, S. P. Physiological and Phenological Responses of Historical Soybean Cultivar Releases to Earlier Planting. *Crop Science*, v.54, p.804-816, 2014.

RUBIN, S. A. L.; SANTOS, O. S. Progresso do melhoramento genético da soja no estado do Rio Grande do Sul: Rendimento de grãos. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, v.2, p.139-147, 1996.

SALADO-NAVARRO, L. R.; SINCLAIR, T. R.; HINSON, K. Change in yield and seed growth traits in soybean cultivars released in the southern USA from 1945 to 1983. *Crop Science*, p.33, v.1204–1209, 1993.

SANTOS, E. R.; BARROS, H. B.; FERRAZ, E. C.; CELLA, A. J. S.; CAPONE, A.; SANTOS, A. F.; FIDELIS, R. R. Divergência entre genótipos de soja, cultivados em várzea irrigada. *Revista Ceres*, v. 58, p.755-764, 2011.

SLAFER, G.A.; ANDRADE, F.H. Changes in physiological attributes of the dry matter economy of bread wheat (*Triticum aestivum*) through genetic improvement of grain yield potential at different regions of the world. *Euphytica*, v.58, p.37-49, 1991.

SLAFER, G.A.; SATORRE, E.H.; ANDRADE, F.H. Increase in grain yield in bread wheat from breeding and associated physiological changes. In: Slafer, G.A. (Ed.), *Genetic Improvement of Field Crops*. Marcel Dekker, Inc., NewYork, p.1–68, 1994.

SOARES, A. A.; SANTOS, P. G.; MORAIS, O. P.; SOARES, P. C.; REIS, M. S.; SOUZA, M. A. Progresso genético obtido pelo melhoramento do arroz se sequeiro em 21 anos de pesquisa em Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.34, p.415-424, 1999.

SPECHT, J. E.; WILLIAMS, J. H. Contribution of Genetic Technology to Soybean Productivity – Retrospect and Prospect. In: W.R. FEHR, editor, *Genetic Contributions to Yield Gains of Five Major Crop Plants*. CSSA Special Publ. 7. CSSA, ASA, Madison, WI. p. 49–74, 1984.

SPECHT, J.E.; D.J. HUME; S.V. KUMUDINI. Soybean yield potential: A genetic and physiological perspective. *Crop Science*, v.39, p.1560–1570, 1999.

SPECHT, J.E., B.W. DIERS, R.L. NELSON, J.F.F. DE TOLEDO, J.A. TORRION, P. GRASSINI. Soybean. In: S. Smith, B. DIERS, J. SPECHT, B. CARVER (ed.), *Yield Gains in Major U.S. Field Crops*. CSSA special publication 33. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. p.311-356, 2014.

STORCK, L.; BISOGNIN, D. A.; CARGNELUTTI FILHO, A. Ganho genético decorrente da substituição anual de cultivares de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.40, p.881-886, 2005.

TODESCHINI, M.H.; MILIOLI, A.S.; ROSA, A.C.; DALLACORTE, L.V.; PANHO, M.C.; MARCHESE, J.A.; BENIN, G. Soybean genetic progress in South Brazil: physiological, phenological and agronomic traits. *Euphytica*, v.215, p.1-12, 2019.

TOLEDO, J. F. F.; ALMEIDA, L. A.; KIIHL, R. A. S.; MENOSSO, O. G. Ganho genético em soja no estado do Paraná, via melhoramento. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.25, p.89-94, 1990.

TOLEDO, J.F.F., CARVALHO, C.G.P., ARIAS, C.A.A., ALMEIDA, L.A., BROGIN, R.L.; OLIVEIRA, M.F., MOREIRA, J.U.V., RIBEIRO, A.S., HIROMOTO, D.M. Genotype and environment interaction on soybean yield in Mato Grosso State, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.41, p.785-791, 2006.

TRETHOWAN, R.; GINKEL, M. V.; RAJARAN, S. Progress in breeding wheat for yield and adaptation in global drought affected environments. *Crop Science*, v.42, p.1441-1446, 2002.

USDA – United States Department of Agriculture – Foreign Agricultural Service. World Agricultural Production. Circular Series, WAP 5-21, May 2021. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>>. Acesso em: 26 Mai 2021.

USTUN, A.; ALLEN, F. L.; ENGLISH, B. C. Genetic progress in soybean of the U.S. Midsouth. *Crop Science*, v.41, p.993-998, 2001.

VENCOVSKY, R.; MORAIS, A. R.; GARCIA, J. C.; TEIXEIRA, N. M. Progresso genético em vinte anos de melhoramento do milho no Brasil. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 16, 1988, Belo Horizonte. Anais. Sete Lagoas: Embrapa-CNPMS, p.300-307, 1988.

VOLDENG, H. D.; COBER, E. R.; HUME, D. J.; GILLARD, C.; MORRISON, M. I. Fifty-eight years of genetic improvement of short-season soybean cultivars in Canada. *Crop Science*, v.37, p.428-431, 1997.

WANG, C.; WU, T.; SUN, S.; XU, R.; REN, J.; WU, C.; JIANG, B.; HOU, W.; HAN, T. Seventy-five years of improvement of yield and agronomic traits of soybean cultivars released in the yellow-huai-hai river valley. *Crop Science*, v. 56, p. 2354-2364, 2016.

WILCOX, J.R. Sixty Years of Improvement in Publicly Developed Elite Soybean Lines. *Crop Science*, v.41, p.1711-1716, 2001.

WOYANN, L.G.; ZDZIARSKI, A.D.; ZANELLA, R.; ROSA, A.C.; CASTRO, R.L.; CAEIRÃO, E.; TOIGO, M.D.C.; STORCK, L.; WU, J.; BENIN, G. Genetic Gain Over 30 Years of Spring Wheat Breeding in Brazil. *Crop Science*, v.59, p.2036-2045, 2019.

WU, T.; SUN, S.; WANG, C.; LU, W.; SUN, B.; SONG, X.; HAN, X. et al. Characterizing Changes from a Century of Genetic Improvement of Soybean Cultivars in Northeast China. *Crop Science*, v.55, p.2056-2067, 2015.

WYSMIERSKI, P.T.; VELLO, N.A. The genetic base of Brazilian soybean cultivars: evolution over time and breeding implications. *Genetics and Molecular Biology*, v.36, p.547-555, 2013.

YU, F.; XIN, X.; ZHANG, D.; ZHOU, S.; QIU, H. Evolution tendency for agronomic characters of major soybean cultivars in east Heilongjiang reclamation area from 1980-2008. *Soybean Science*, v.28, p.628-640, 2009.