



RICARDO ANTONIO RUIZ CARDOZO

**ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE DE CULTIVARES DE
TRIGO NAS MESORREGIÕES DO CAMPO DAS VERTENTES E
SUL/SUDOESTE DE MINAS GERAIS**

**LAVRAS – MG
2024**

RICARDO ANTONIO RUIZ CARDOZO

**ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE DE CULTIVARES DE TRIGO NAS
MESORREGIÕES DO CAMPO DAS VERTENTES E SUL/SUDOESTE DE
MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, área de concentração em Genética e Melhoramento de Plantas, para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. José Airton Rodrigues Nunes
Orientador

Dra. Aurinelza Batista Teixeira Condé
Coorientador(a)

**LAVRAS – MG
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Ruiz Cardozo, Ricardo Antonio.

Adaptabilidade e Estabilidade de Cultivares de Trigo nas
Mesorregiões do Campo das Vertentes e Sul/Sudoeste de Minas
Gerais / Ricardo Antonio Ruiz Cardozo. - 2024.

53 p.

Orientador(a): José Airton Rodrigues Nunes.

Coorientador(a): Aurinelza Batista Teixeira Condé.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Triticum aestivum. 2. Interação Genótipos x Ambientes. 3.
GGE Biplot. I. Rodrigues Nunes, José Airton. II. Teixeira Condé,
Aurinelza Batista. III. Título.

RICARDO ANTONIO RUIZ CARDOZO

**ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE DE CULTIVARES DE TRIGO NAS
MESORREGIÕES DO CAMPO DAS VERTENTES E SUL/SUDOESTE DE MINAS
GERAIS**

**ADAPTABILITY AND STABILITY OF WHEAT CULTIVARS IN THE CAMPO DAS
VERTENTES AND SUL/SUDOESTE DE MINAS MESOREGIONS OF MINAS GERAIS
STATE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, área de concentração em Genética e Melhoramento de Plantas, para obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 29 de fevereiro de 2024.
Prof. Dr. José Maria Villela Padua – UFLA
Dr. Vanoli Fronza – Embrapa Trigo
Dra. Aurinelza Batista Teixeira Condé – EPAMIG

Prof. Dr. José Airton Rodrigues Nunes
Orientador

Dra. Aurinelza Batista Teixeira Condé
Coorientador(a)

**LAVRAS – MG
2024**

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e meus irmãos por todo amor e por sempre me incentivarem a continuar os estudos.

Ao meu orientador Dr. José Airton pela orientação, por todo tempo que se dispôs a me ajudar, e pelos conselhos que levarei para a vida.

Aos meus amigos e ao grupo de melhoramento de trigo do departamento de Biologia que sempre me acompanharam e me ajudaram nesta jornada.

À UFLA por todo suporte e infraestrutura que me permitiu cursar o mestrado. Ao Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas pelo suporte para realização do meu curso de mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da FAPEMIG, CNPq e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 concedido ao Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas na formação de mestres e doutores.

A todos os demais que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão desta dissertação.

IMPACTOS SOCIAIS, AMBIENTAIS E TECNOLÓGICOS

A realização deste trabalho contribuiu a identificação e o futuro desenvolvimento de cultivares moderadamente adaptadas às características edafoclimáticas das mesorregiões de Campos das Vertentes e Sul/Sudoeste de Minas, proporcionando uma maior adoção do cultivo de trigo na região e melhores desempenhos produtivos e, conseqüentemente, contribuíram com a geração de emprego e renda. Além disso, os resultados obtidos serão difundidos por meio da dissertação redigida e disponibilizada no repositório institucional da UFLA, além da publicação de resumos em anais de congressos e de artigos científicos em periódicos nacionais e internacionais.

RESUMO

As mesorregiões do Campo das Vertentes e Sul/Sudoeste de Minas têm expressiva participação na triticultura no estado de Minas Gerais. Como nelas há uma grande diversidade macroambiental, torna-se necessário a avaliação em diferentes ambientes de cultivo, a fim de melhorar a assertividade e reduzir o risco de recomendação de cultivares. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a adaptabilidade e estabilidade de cultivares de trigo, oriundas de diferentes programas de melhoramento, em duas mesorregiões de Minas Gerais, em diferentes anos agrícolas. Foram conduzidos nove experimentos em condições de sequeiro: seis na mesorregião do Campos das Vertentes (Lavras, Itirapuã e Itutinga) e três na mesorregião de Sul/Sudoeste de Minas (Lambari e São Gonçalo do Sapucaí). Avaliaram-se 16 cultivares de trigo no delineamento em látice 4 x 4 com três repetições nos anos agrícolas de 2022 e 2023. Foram avaliados a altura de planta (ALT), peso de mil sementes (PMS), peso do hectolitro (PH) e produção dos grãos corrigido para 13% de umidade (PROD) e índice de produção corrigido para PH (IPPH). Os dados foram analisados no ambiente R usando a abordagem de modelos mistos. Foram testados vários modelos com correção espacial, sendo o melhor modelo escolhido pelo BIC corrigido. Posteriormente, aplicaram-se os métodos de Annicchiarico, para estimar o índice de recomendação, GGE biplot, e o índice de adaptabilidade multicaracterísticas (MTSI) para avaliar a adaptabilidade e a estabilidade das cultivares. A correção espacial proporcionou uma melhoria de precisão, com uma eficiência relativa entre 118% e 196% nos diferentes ambientes. Encontraram-se diferenças significativas entre as cultivares, anos agrícolas e locais para todas as características. O efeito da interação cultivares x locais foi mais expressivo do que a interação cultivares x anos. Pelo método de Annicchiarico não se observaram cultivares superiores às testemunhas (BRS 264 e TBIO Aton) com base na PROD e IPPH. Na análise GGE, as características ALT, PH e PMS apresentaram comportamento semelhante nos ambientes testados, não sendo possível identificar mega-ambientes. No entanto, para PROD e IPPH teve a formação de possíveis mega-ambientes. A cultivar destacada na ALT foi a MGS Brilhante; para PH e PMS foi a BR 18; para PROD se destacaram ORS Soberano, ORSSENNNA e TBIO Aton; e para IPPH se destacaram BR 18, ORS Soberano, TBIO Aton e ORSSENNNA. Itutinga foi um dos ambientes mais discriminativos e representativos para PROD. As cultivares selecionadas com base no índice MTSI foram ORS Soberano e ORS Absoluto. A interação G x A foi, principalmente, atribuída à interação das cultivares com os locais. Foi possível a identificação de mega-ambientes para PROD e IPPH. O ambiente simultaneamente mais representativo e discriminativo foi Itutinga em 2023 para PROD e IPPH.

Palavras-chave: *Triticum aestivum*; Annicchiarico; GGE biplot; melhoramento genético; índice de estabilidade.

ABSTRACT

The mesoregions of Campo das Vertentes and Sul/Sudoeste de Minas have a significant participation in wheat farming in the state of Minas Gerais. Due to the large macroenvironmental diversity within them, it becomes necessary to evaluate in different growing environments in order to improve assertiveness and reduce the risk of cultivar recommendations. Thus, the objective of this study was to evaluate the adaptability and stability of wheat cultivars from different breeding programs in two mesoregions of Minas Gerais over different agricultural years. Nine experiments were conducted under rainfed conditions: six in the Campo das Vertentes mesoregion (Lavras, Itirapuã, and Itutinga) and three in the Sul/Sudoeste de Minas mesoregion (Lambari and São Gonçalo do Sapucaí). Sixteen wheat cultivars were evaluated in a 4 x 4 lattice design with three replications in the agricultural years of 2022 and 2023. Plant height (PH), thousand-seed weight (TSW), hectoliter weight (HW), grain yield adjusted to 13% moisture (GY), and grain yield index adjusted to HW (GYHWI) were evaluated. The data were analyzed using mixed models in the R environment. Several models with spatial correction were tested, and the best model was chosen based on Bayesian Information Criterion. Subsequently, Annicchiarico's method GGE biplot, and multi-trait adaptability index (MTSI) were performed to evaluate cultivar adaptability and stability. Spatial correction provided improved precision, with relative efficiency between 118% and 196% in different environments. Significant differences were found among cultivars, agricultural years, and locations for all traits. The cultivar x location interaction effect was more pronounced than the cultivar x year interaction. Using Annicchiarico's method, no cultivars superior to the checks (BRS 264 and TBIO Aton) were observed based on GY and GYHWI. In the GGE analysis, PH, HW, and TSW showed similar behavior in the tested environments, with no identifiable mega-environments. However, for GY and GYHWI, possible mega-environments were formed. The cultivar highlighted for PH was MGS Brilhante; for HW and TGW, it was BR 18; for GY, ORS Soberano, ORSSENNNA, and TBIO Aton stood out; and for GYHWI, BR 18, ORS Soberano, TBIO Aton, and ORSSENNNA stood out. Itutinga was one of the most discriminative and representative environments for GY. Cultivars selected based on the MTSI index were ORS Soberano and ORS Absoluto. The G x A interaction was mainly attributed to the interaction of cultivars with locations. Mega-environments were identified for GY and GYHWI. The simultaneously most representative and discriminative environment was Itutinga in 2023 for GY and YIHW.

Keywords: *Triticum aestivum*; Annicchiarico; GGE biplot; plant breeding; stability index.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1. Cenário e Melhoramento do trigo no Brasil e em Minas Gerais	12
2.2. Interação genótipos x ambientes no trigo	15
2.3. Metodologias do estudo da interação genótipos x ambientes.....	18
2.3.1 Método de Annicchiarico	18
2.3.2 Método GGE Biplot e índice de adaptabilidade multicaracterísticas (MTSI).....	19
2.4. Análise espacial	20
3. MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1. Locais de condução dos experimentos	23
3.2. Cultivares, plano experimental e condução	26
3.3. Caracteres avaliados	28
3.4. Análise estatística	28
3.4.1 Análises individuais por ambiente:.....	28
3.4.2. Análise multiambientes.....	29
3.4.3. Análises de adaptabilidade e estabilidade.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5. CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS	48

1. INTRODUÇÃO

A produção do trigo no Brasil é concentrada, principalmente, nos estados da região sul do país (RS e PR), com cerca de 8,3 milhões toneladas em 2023. Esta produção é devido à grande diferença na quantidade de área cultivada, a exemplo de 3 milhões de hectares na região sul e 421 mil hectares no Cerrado e ao portfólio de cultivares lançadas mais adaptadas ao Sul do Brasil (CONAB, 2024). No entanto, na atualidade vêm se expandindo nas regiões centro-oeste e sudeste, com destaque para o estado de Minas Gerais, terceiro maior produtor deste cereal em 2023 (468 mil toneladas) numa área cultivadas de 168 mil hectares, representando um incremento de aproximadamente 54% relativo ao ano de 2022. Este avanço se deve ao intercâmbio tecnológico, à demanda de mercado deste cereal, visto a possibilidade da diminuição da dependência de importação deste cereal, aliado à atratividade do preço no mercado (CONAB, 2023).

O potencial de crescimento da triticultura em Minas Gerais depende, dentre outros fatores, da disponibilidade e adoção de cultivares adaptadas às condições de cultivo. Os programas de melhoramento de trigo existentes têm lançado cultivares de trigo com recomendações para o estado de Minas Gerais, seja para o cultivo de sequeiro ou irrigado, a exemplo das cultivares BRS 264 e TBIO Aton, provenientes dos programas de melhoramento da Embrapa e da Biotrigo, respectivamente, que estão entre as mais adotadas pelos triticultores de Minas Gerais (MACEDO *et al.*, 2021).

Embora, haja um portfólio de cultivares recomendadas para Minas Gerais provenientes de diferentes programas de melhoramento, como da EPAMIG, Embrapa, Biotrigo Genética e OR Genética de Sementes. O desenvolvimento dessas cultivares na sua maioria foram realizadas em outras regiões produtoras de trigo, a exemplo da região Sul do Brasil, o que remete a necessidade de pesquisas relacionadas ao melhoramento genético do trigo voltado para a região, especificamente na obtenção de cultivares adaptadas (CANZIANI; GUIMARÃES, 2009; TRINDADE, 2019). Vale destacar que, desde o ano de 2009, a Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) tem visado diversificar as cultivares de trigo plantadas na região sul do estado de Minas Gerais, avaliando cultivares quanto à produtividade, sanidade e qualidade tecnológica (EPAMIG, 2020). Para maior eficiência no desenvolvimento dessas linhagens adaptadas, há a necessidade de desenvolver um programa de melhoramento específico

para destacadas regiões tritícolas no estado de Minas Gerais, por exemplo nas mesorregiões dos Campo das Vertentes e Sul/Sudoeste de Minas, assim selecionando as melhores linhagens (MACHADO *et al.*, 2021; CONDÉ *et al.*, 2010).

Por meio do melhoramento genético, é possível obter genótipos com elevado potencial produtivo nestas condições tropicais, e que também associem ciclo adequado, maior resistência ao acamamento e às principais doenças, como a brusone, e com qualidade tecnológica de grãos desejada (PASINATO *et al.*, 2018). Ademais, um programa de melhoramento específico possibilita uma melhor exploração da interação genótipo x ambiente (G x A), otimizando a utilização de recursos e maximizando os rendimentos, a exemplo da melhor definição e caracterização dos ambientes de cultivo, contribuindo para maior assertividade na recomendação.

É importante ter como referência a variação ambiental, pois cada genótipo pode responder diferente segundo o ambiente de produção. Essa variação é um processo biológico natural e que repercute numa resposta diferencial das cultivares. Variações ambientais podem estar associadas a fatores do clima, como precipitação e temperatura, fatores geográficos, como latitude e altitude, fatores do solo, como tipo de solo, fatores de manejo tecnológico, como sistema de produção e densidade de semeadura, e fatores bióticos, como patógenos, insetos-praga e plantas daninhas, entre outros fatores que se adicionam para conformar um ambiente (EEUWIJK *et al.*, 2016). Isto é um desafio para selecionar as melhores cultivares de trigo, pois podem ter uma interação simples ou complexa, segundo a adaptabilidade que estas possuam e, por isso, é necessário avaliar diferentes genótipos em diferentes ambientes, o que permite estimar de forma adequada o efeito da interação dos genótipos com os ambientes e os parâmetros relativos à adaptabilidade e estabilidade das cultivares; além de permitir a classificação macroambiental (EEUWIJK *et al.*, 2016; RAMALHO *et al.*, 2012). Portanto, a avaliação da adaptabilidade e estabilidade agrônômica de cultivares de trigo oriundas de distintos programas de melhoramento nas mesorregiões do Campo das Vertentes e Sul/Sudoeste do estado de Minas Gerais, é necessária para possibilitar a identificação das cultivares mais adaptadas, junto com a importância relativa das diferentes regiões, com sua respectiva classificação

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a adaptabilidade e estabilidade fenotípica de cultivares de trigo oriundas de distintos programas de melhoramento nas mesorregiões do Campo das Vertentes e Sul/Sudoeste de Minas Gerais em diferentes anos

agrícolas. Em termos específicos, objetiva-se quantificar os efeitos das interações entre as cultivares com os anos agrícolas e locais de avaliação e identificar possíveis mega-ambientes com base na identificação de cultivares vencedoras.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Cenário e Melhoramento do trigo no Brasil e em Minas Gerais

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é uma planta hexaplóide ($2n = 6x = 42$), autógama que possui uma taxa de fecundação cruzada inferior a 5%. Os primeiros registros datam de 10.000 a 15.000 a.C., nas proximidades dos rios Tigre e Eufrates, na Ásia. Sua introdução no Brasil remonta ao século XVI, nos estados de Rio de Janeiro e São Paulo, por meio de imigrantes europeus (SILVA *et al.*, 1996). Ao longo dos séculos, embora tenha havido flutuações na área cultivada e na produção total, a cultura permaneceu concentrada nos estados do sul do Brasil, onde ainda prevalece até os dias atuais (BORÉM; SCHEEREN, 2015; CONAB, 2023).

Classificado na família Poaceae, gênero *Triticum*, o trigo compreende espécies principais como *T. monococcum*, *T. durum* e *T. aestivum* (CONAB, 2017). Com múltiplos usos, principalmente na indústria alimentícia, o trigo é a matéria-prima para diversos produtos, como farinhas, biscoitos, pães e massas, além de ser utilizado na alimentação animal (FARIAS *et al.*, 2017).

Globalmente, o trigo é um dos cereais mais cultivados, sendo o de maior importância econômica, com uma produção anual de mais de 700 milhões de toneladas, ficando atrás apenas do milho. No entanto, o Brasil continua sendo um importador significativo de trigo devido à demanda interna (PASINATO *et al.*, 2018; GASQUES *et al.*, 2019; FAO, 2024). Os principais produtores mundiais incluem China, Índia, Rússia, Estados Unidos e França, que respondem por aproximadamente 52% da produção global (FAO, 2024).

No Brasil, a produção de trigo é concentrada principalmente nos estados do sul do país. De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023), Paraná (3,9 milhões de toneladas) e Rio Grande do Sul (4,0 milhões de toneladas) respondem juntos por mais de 80% da produção nacional. Separadamente, Rio Grande do Sul e Paraná representam mais de 3/4 de toda a produção nacional, totalizando 8 milhões de toneladas em 2023 (CONAB, 2024).

Projeções do CONAB indicam que o Brasil produzirá mais de 9,5 milhões de toneladas de trigo em 2024, enquanto o consumo nacional será de cerca de 14 milhões de toneladas. Isso implicará na importação de aproximadamente 6 milhões de toneladas de trigo para atender à demanda interna (CONAB, 2024).

Em Minas Gerais, o cultivo de trigo é realizado desde 1920, mas sua produção permaneceu constante e baixa até recentemente, quando os preços atrativos incentivaram os produtores a expandir a cultura a partir de 2013. Isso resultou em um aumento de 87,8% na área plantada, passando de 36,2 mil ha na safra de 2013 para 82,2 mil ha na safra de 2015 (CONAB, 2017). Atualmente, o estado possui 168 mil ha plantados, representando um crescimento de 54% em relação a 2022, quando totalizou 108 mil ha (CONAB, 2023).

Esse aumento na área cultivada se deve, em grande parte, ao melhoramento genético que resultou no desenvolvimento de cultivares adaptadas às condições de Minas Gerais, que incluem um clima favorável, baixa umidade relativa (favorecendo o controle sanitário), alta qualidade da farinha e produtividade entre 2.000 e 3.000 kg ha⁻¹ (CONAB, 2017). Além disso, a colheita na entressafra da região Sul do Brasil, juntamente com a proximidade dos principais centros urbanos, aumenta a competitividade do Estado (TRINDADE, 2019).

Os plantios de trigo em Minas Gerais são conduzidos em dois sistemas de produção: sequeiro e irrigado com aproximadamente 85% e 15% da produção, respectivamente. Anteriormente, mais de 90% do trigo mineiro era cultivado no sistema irrigado, principalmente na região do Alto Paranaíba (CONAB, 2017; CONDÉ *et al.*, 2010).

Observa-se que, além do uso extensivo de tecnologias e do investimento em manejo da cultura, o uso de cultivares adaptadas tem impulsionado a produtividade, refletindo um bom potencial genético e contribuindo para o desempenho observado nos últimos anos, tornando o Estado mais independente no mercado (CAMPONOGARA *et al.*, 2015).

O melhoramento genético do trigo no Brasil começou por volta de 1919, com a criação de duas estações experimentais nos estados do Paraná e Rio Grande do Sul pelo Ministério da Agricultura. Inicialmente, o melhoramento envolveu a coleta de sementes de cultivares de produtores locais e seleção dentro das progênies. Em 1925, as primeiras seleções artificiais foram feitas (SOUZA; CAIERÃO, 2014).

A partir de 1970, o melhoramento foi expandido para locais fora do sul do Brasil. Entre 1979 e 1990, 17 novas cultivares foram disponibilizadas aos produtores, expandindo a produção agrícola do trigo para outras regiões do Brasil (CAMARGO *et al.*, 1987; SOUSA *et al.*, 1998).

Por outro lado, o melhoramento genético do trigo na região central do Brasil começou em 1973, com o início do Programa de Melhoramento Genético de Trigo da Embrapa Cerrados. Esse esforço intensificou-se em 1982, com o lançamento do Programa de Financiamento de Irrigação pelo Governo Federal, o qual tornou a cultura do trigo obrigatória nos sistemas de produção irrigado e resultou no lançamento de três cultivares na década de 1990 (CHAGAS *et al.*, 2020).

Inicialmente, o foco do melhoramento do trigo no Brasil foi adaptar a cultura a solos ácidos e melhorar a resistência a doenças como ferrugem-do-colmo, ferrugem-da-folha e giberela, que causam danos significativos. Atualmente, o objetivo é reduzir o ciclo da planta, melhorar a estatura para minimizar o acamamento, aumentar a capacidade de perfilhamento, melhorar a qualidade da farinha e desenvolver resistência à germinação na espiga e tolerância à geada (MORI *et al.*, 2016; FURLAN, 2018; ROSA, 2019).

A busca por cultivares de alta produtividade e qualidade, juntamente com características como tolerância ao acamamento, alumínio tóxico, adaptabilidade e estabilidade fenotípica, são temas importantes na pesquisa de novas cultivares de trigo (MARCHIORO *et al.*, 2009; ROSA, 2019). Para isto, o melhoramento genético emprega várias estratégias, como hibridação e introdução de germoplasma (RAMALHO; CARVALHO; NUNES, 2013). A disponibilidade e a diversidade das populações são cruciais para o sucesso de um programa de melhoramento (CHU *et al.*, 2020).

Essa diversidade deve ser preservada em bancos de germoplasma, que são fontes importantes de variabilidade genética para os melhoristas. O Brasil abriga o Banco Ativo de Germoplasma de Trigo do Centro Nacional de Pesquisa de Trigo da Embrapa (CNPT) em Passo Fundo, que conserva mais de 10 mil acessos de trigo e 2 mil acessos de espécies relacionadas (ROSA, 2019).

Os maiores bancos de germoplasma de trigo estão no Cavilo Ressarci Institut e os Plant Induzir na Rússia, no *Svalbard International Seed Vault*, na Noruega, e no Centro Internacional

de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), no México, que detém o maior número de acessos (CAIERÃO *et al.*, 2016), totalizando mais de 150.000 acessos (CIMMYT, 2022).

Essa variabilidade genética é fundamental para o melhoramento genético das culturas por meio de reprodução e hibridação (BHULLAR; MACKAY; KELLER, 2010). Exemplo disso é a cultivar BRS 264, originada do CIMMYT, que se destaca pelo alto potencial produtivo e pela precocidade. Outros estudos, como os de Bhanu, Arun e Mishra (2018), demonstraram a importância da variabilidade genética na avaliação da tolerância ao calor e na produtividade.

No Brasil, diversas instituições públicas e privadas estão envolvidas no melhoramento genético do trigo. Entre as públicas, destacam-se a Embrapa, institutos estaduais de pesquisa e universidades. No setor privado, empresas como Biotrigo Genética, OR Sementes, Limagrain, Tamona Agropecuária e Biotech do Brasil desempenham papéis importantes (CAIERÃO, 2016).

Embora o melhoramento genético do trigo em Minas Gerais tenha começado com cultivares como 'Kênia 155' e 'Salles', desenvolvidas na década de 1940 (THIBAU, 1950), o Estado viu um aumento significativo no desenvolvimento e na adoção de novas cultivares desde então. A Universidade Federal de Lavras, em parceria com a EPAMIG, iniciou um programa de melhoramento em 2018 para desenvolver cultivares adaptadas à região sul do estado, atendendo à necessidade dos produtores por novas variedades bem adaptadas às condições locais.

2.2. Interação genótipos x ambientes no trigo

A interação genótipos x ambientes (G x A), definida como a resposta diferencial dos genótipos à variação dos ambientes, dificulta a seleção de genótipos amplamente adaptados (DUARTE; VENCOVSKY, 1999). A avaliação de genótipos em um único ambiente não permite estimar o componente da interação, podendo gerar confusão na estimativa da herdabilidade, sendo necessário, para isto, que os genótipos sejam avaliados em dois ou mais ambientes, assim obter com maior precisão o ganho genético (TERASAWA *et al.*, 2008).

O trigo pode ser cultivado em uma vasta região do Brasil. Em programas de melhoramento genético, a obtenção de genótipos produtivos e com características desejáveis é resultado do processo de seleção em diferentes ambientes (anos e locais). Um mesmo genótipo, cultivado em diferentes ambientes, frequentemente mostra variação significativa no desempenho produtivo que é influenciado pela interação do genótipo com o ambiente (CONDÉ *et al.*, 2010).

A presença de interação de genótipos com os ambientes implica dificuldades na seleção e indicação de cultivares de trigo, principalmente por alterar o desempenho genotípico através dos ambientes (MOHAMED, 2013) e por minimizar a magnitude da associação entre os valores fenotípicos e genotípicos (ALWALA *et al.*, 2010; EEUWIJK *et al.*, 2016), reduzindo o progresso genético. A consequência disso para os programas de melhoramento está, principalmente, na necessidade de uma ampla rede de ensaios. Nesse caso, os melhoristas testam genótipos em ensaios multiambiente, inclusive alternando condições favoráveis e desfavoráveis (ALWALA *et al.*, 2010; SINGH *et al.*, 2019). Por outro lado, a presença dos genótipos como os ambientes é possível de ser explorada, e a identificação de genótipos adaptados a ambientes específicos pode constituir oportunidades de seleção.

Na perspectiva da genética, a interação acontece quando a contribuição dos genes que controlam o caráter, ou seu nível de expressão, é distinta entre os ambientes. (RAMALHO *et al.*, 2012). Duas são as formas de verificar a presença de interação G x A. A primeira consiste em subdividir regiões heterogêneas em sub-regiões menores e mais homogêneas, onde o melhoramento pode desenvolver cultivares específicas para cada sub-região. A segunda estratégia faz a seleção dos genótipos com alta estabilidade nos ambientes, permitindo obter uma subpopulação em cada ambiente (MUNARO *et al.*, 2014; EEUWIJK *et al.*, 2016).

Na literatura, os diversos níveis de associação entre metodologias para avaliação da adaptabilidade e estabilidade evidenciam que mais de uma metodologia deve ser empregada para uma estimativa confiável do desempenho genotípico. Os métodos mais indicados para a avaliação da interação genótipos-ambientes podem variar em função do conjunto de dados (BORNHOFEN *et al.*, 2017).

Em programas de melhoramento genético é indispensável a avaliação da interação G x A, pois o genótipo com melhor desempenho em um ambiente pode não ser em outro. Tal fato exerce influência sobre o ganho de seleção e torna a recomendação de cultivares com ampla adaptabilidade uma tarefa complexa. Desta forma, é necessário que o melhorista avalie a magnitude e significância da interação, além de quantificar seus efeitos sobre as metodologias a serem aplicadas no melhoramento e fundamentar a implementação de estratégias para minimizá-la e aproveitá-la (CRUZ; CARNEIRO; REGAZZI., 2014).

Segundo Cruz; Carneiro e Regazzi (2014), a interação G x A ocorre em função de dois componentes: um é denominado componente simples, causado pela diferença entre genótipos, e outro é chamado complexo, cuja ocorrência está relacionada à ausência de correlação entre genótipos. Uma baixa correlação entre genótipos e fenótipos evidencia que o melhor genótipo em um dado ambiente pode não alcançar desempenho equivalente em outro ambiente (EEUWIJK *et al.*, 2016).

Uma consideração importante que deve ser realizada é sobre a interação complexa e o efeito de interação simples, que pode ser observada entre vários ambientes avaliados. Considerando que a presença de interação complexa leva a alterações na classificação dos genótipos em cada ambiente. A ocorrência de G x E força aos modelos de previsão fenotípica a tornarem-se mais elaborados e a conterem parâmetros específicos do genótipo; intercepções, inclinações e curvaturas, por tanto são consideradas biologicamente mais relevantes (EEUWIJK *et al.*, 2016; EL-SODA *et al.*, 2014).

Um dos principais objetivos de muitos programas de melhoramento é a obtenção de cultivares com ampla adaptação ao maior número de ambientes possível. Tais cultivares são classificadas como amplamente adaptadas e possibilitam um bom posicionamento de mercado. A ampla adaptação é conceituada como a capacidade de a cultivar alcançar produtividades relativamente altas de modo consistente em diversos ambientes agrícolas de uma região (STUDNICKI *et al.*, 2019).

Como explicam Woyann *et al.* (2019), a adaptabilidade concerne à capacidade de um genótipo de responder de modo previsível a estímulos ambientais. Já a estabilidade relaciona a previsibilidade do desempenho do genótipo em locais distintos. Por outro lado, uma cultivar estável é aquela que conta com rendimento paralelo ao rendimento médio de todas as cultivares avaliadas em todos os ambientes, portanto, os genótipos mais estáveis apresentam menor variação fenotípica influenciada pelo ambiente (STUDNICKI *et al.*, 2019).

Singh *et al.* (2019) avaliaram genótipos de trigo em diferentes ambientes na Índia, visando identificar genótipos estáveis e com elevado rendimento, empregando as análises GGE-Biplot e índice de estabilidade de rendimento incorporando o valor de estabilidade AMMI e rendimento em um único índice não paramétrico. Os autores identificaram, por meio da análise GGE, a existência de dois mega ambientes, junto com as cultivares com desempenhos desejáveis.

Eles concluíram que ambas as abordagens possibilitam a identificação de genótipos estáveis, que poderiam ser incluídos nos programas de melhoramento de trigo da Índia, visando o lançamento de novas cultivares.

O trigo é cultivado em diversas condições edafoclimáticas, em especial no que se refere à disponibilidade hídrica, tipos de solo, incidência de doenças e condições climáticas (MUNARO *et al.*, 2014). Portanto, o genótipo ideal de trigo deveria alcançar elevados rendimentos em quaisquer condições edafoclimáticas. Por isso a interação G x A deve ser avaliada, pois é um fenômeno biológico natural que permite ser aproveitado no processo de seleção, por meio da avaliação de muitos genótipos nos diferentes ambientes (EEUWIJK *et al.*, 2016; RAMALHO *et al.*, 2012).

2.3. Metodologias do estudo da interação genótipos x ambientes

2.3.1 Método de Annicchiarico

Esta metodologia permite fazer uma classificação relativa dos genótipos segundo os seus desvios padrões em cada um dos ambientes. Para aplicar esta metodologia, as médias de cada genótipo em cada ambiente \bar{Y}_{il} são transformadas em porcentagens da média do ambiente, ou seja, $(p_{il} = \bar{Y}_{il}/\bar{Y}_j \times 100)$ (ANNICCHIARICO, 1992; DELGADO *et al.*, 2019).

Posteriormente, é estimado o desvio padrão (s_i) das porcentagens de cada genótipo pela expressão:

$$s_i = \sqrt{\sum_{l=1}^k \frac{(p_{il} - \bar{p}_i)^2}{k-1}} \quad (1)$$

em que \bar{p}_i é a média das porcentagens para o genótipo i nos k locais.

Com os dois parâmetros, \bar{p}_i e s_i pode-se estimar o parâmetro de estabilidade de Annicchiarico (1992) denominado de índice de confiança ou *reliability index* do genótipo i (I_i) que descreve, simultaneamente, a adaptabilidade e estabilidade:

$$I_i = \bar{p}_i - Z_{(1-\alpha)} s_i \quad (2)$$

em que:

$Z_{(1-\alpha)}$: é o quantil da distribuição normal padronizada;

α : é o nível de significância pré-fixado (0,25);

O detalhamento do método de Annicchiarico mostrado anteriormente relativo à média do ambiente pode ser feito em relação à média de testemunhas ou padrões comerciais. Para isso, basta substituir o valor do numerador \bar{p}_{il} da fórmula do desvio padrão (s_i) pela média da(s) testemunha(s) e assim estimar o índice de recomendação I_i para cada uma das cultivares (DELGADO *et al.*, 2019).

2.3.2 Método GGE Biplot e índice de adaptabilidade multicaracterísticas (MTSI)

O método GGE Biplot é equivalente à análise dos componentes principais da tabela G + GA de duas vias e compreende toda a teoria sobre os componentes principais. Este modelo GGE goza de uma grande popularidade na literatura aplicada na interação G x A. Uma razão é que o modelo GGE produz biplots que cobrem tanto o efeito genotípico principal como o G x A, enquanto os biplots da AMMI se concentram unicamente em G x A. Outra razão mencionada é que uma característica particular das biografias GGE é permitir a identificação de mega-ambientes (EEUWIJK *et al.*, 2016).

A análise do método GGE Biplot para determinada característica pode ser obtida seguindo o seguinte modelo, desenvolvido por Yan e Tinker (2006):

$$\bar{y}_{ij} = \lambda_1 \gamma_{i1} \delta_{j1} + \lambda_2 \gamma_{i2} \delta_{j2} + \rho_{ij} \quad (3)$$

onde λ_1 e λ_2 são valores singulares do primeiro e segundo componente principal (PC) associados à matriz dos efeitos dos genótipos adicionados aos efeitos das interações entre o genótipo x ambiente; γ_{i1} e γ_{i2} são vectores próprios do primeiro e segundo PC associados ao efeito do genótipo i; δ_{i2} e δ_{i2} são vectores próprios do primeiro e segundo PC associados ao efeito do ambiente j; ρ_{ij} é o resíduo do modelo associado ao genótipo i no ambiente j. Os Biplots dos valores associados aos dois primeiros componentes permitem compreender a interrelação entre os genótipos com os ambientes (DELGADO *et al.*, 2019).

O método GGE biplot consiste num método multivariado que visa a modelagem dos efeitos de genótipos mais a interação genótipos por ambientes usando um modelo bilinear a partir da análise de componentes principais mediada pela técnica da decomposição por valores

singulares (YAN *et al.*, 2007). As representações dos biplots por este método permitem compreender o inter-relacionamento dos genótipos e dos ambientes (YAN; TINKER, 2006). Este método permite a identificação de locais representativos e na determinação de mega-ambientes para recomendar os locais adequados para futuros experimentos (YAN, 2014).

O GGEbiplot é uma técnica que tem sido utilizada na avaliação de interação GxA em diferentes culturas e espécies. Glaz e Kang (2008) utilizaram o método para analisar a melhoria de eficiência de cana-de-açúcar na identificação de locais com solos orgânicos na Flórida, ao identificar pontos que podem ser substituídos sem comprometer a seleção de cultivares superiores. Ramburan *et al.* (2011) avaliaram a estabilidade genotípica e a magnitude da interação GxA, via método GGEbiplot, em áreas de sequeiro da indústria de cana-de-açúcar no Sul da África para melhorar a eficiência de seleção e avaliação. Sandhu *et al.* (2014), também, utilizaram a técnica GGEbiplot em cana-de-açúcar, para avaliar a estabilidade no avanço de genótipos de cana-de-açúcar testados em uma gama de zonas e locais na Índia, com discriminação de locais que favorecem as características de interesse econômico.

A análise da estabilidade para múltiplos caracteres foi realizada estimando o índice de estabilidade multicaracterística (MTSI) recomendado por Olivoto *et al.* (2019). Este índice é baseado na distância entre a cultivar e o ideótipo estimada com os valores das análises dos componentes principais. Este índice avalia a estabilidade das cultivares em relação com múltiplos caracteres simultaneamente, proporcionando uma visão mais abrangente do desempenho das variedades em diferentes condições. Este índice foi utilizado nas análises dos experimentos de aveia entre 2001 e 2015 por Olivoto *et al.* (2019). Eles determinaram o MTSI com as características de altura, massa e número de panículas, número de grãos e produção, permitindo a seleção dos genótipos mais estáveis com uma boa performance de cada uma das características.

2.4. Análise espacial

A experimentação de campo está sujeita a diversas formas de erro, tais como diferenças na competição entre parcelas, estresses abióticos, fertilidade do solo, fenotipagem de baixa qualidade, distribuição errada entre parcelas e outros problemas, que podem se distribuir de maneira não homogênea e não ser quantificados de forma consistente. Além disso, pode ser afetada no sentido em que os tratos culturais e a colheita são realizados, alterando a variabilidade

entre as parcelas (RAMALHO *et al.*, 2012). Todos esses fatores podem criar tendências no campo, inflacionando a variação residual.

O delineamento de blocos completos, por exemplo, é altamente eficaz para realizar um controle local, uma vez que cada tratamento estaria teoricamente dentro de um bloco homogêneo. Contudo, à medida que o número de genótipos a serem testados aumenta, torna-se desafiador realizar uma blocagem eficiente, pois obter um bloco com mais de 10 parcelas completamente homogêneo é difícil (DUARTE; VENCOVSKY, 2005). Mesmo com uma blocagem eficaz, alguns padrões, como os relacionados à fertilidade do solo, podem não ser capturados pelos blocos.

Por outro lado, delineamentos de blocos incompletos, como o látice e os “alpha designs”, são utilizados para lidar com essa situação. No entanto, mesmo com seu emprego, o pressuposto da independência das observações pode ser comprometido, levando ao aumento da variância do erro e prejudicando os testes de comparação entre tratamentos. Isso diminui a acurácia das estimativas e a eficiência em diferenciar os genótipos, elementos cruciais em um programa de melhoramento.

Existem vários modelos espaciais empregados no melhoramento de plantas para lidar com correlações espaciais. Esses modelos permitem obter resultados mais precisos em termos de parâmetros estimados e contrastes entre tratamentos (DUARTE; VENCOVSKY, 2005). Modelos mais recentes, como os autorregressivos integrados de médias móveis (ARIMA), o autorregressivo separável de primeira ordem em duas dimensões (AR1 x AR1), o modelo de variância linear e P-splines em duas dimensões, tornaram-se mais acessíveis devido ao avanço computacional, proporcionando maior velocidade nas análises (GLEESON; CULLIS, 1987; GILMOUR *et al.*, 1997; RODRÍGUEZ-ÁLVAREZ *et al.*, 2018).

Gilmour *et al.* (1997) afirmaram que o modelo autorregressivo de primeira ordem bidimensional (AR1×AR1) representa melhor as variações no campo; esses autores classificaram os erros em três tipos: variações locais, tendências globais e variações externas. Para o uso desse modelo, os autores sugeriram inicialmente modelar a matriz de variância-covariância dos erros em um processo AR1×AR1 para controlar a variação local.

Essas análises espaciais possibilitam conduzir estudos mais precisos, permitindo a realização de análises em duas etapas, o que aprimora a acurácia seletiva e a predição fenotípica. Isso é particularmente relevante para avaliações em múltiplos caracteres e ambientes e se traduz em

maiores ganhos na seleção, reduzindo o erro experimental e aumentando a acurácia seletiva. (PIEPHO; ECKL, 2013).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Locais de condução dos experimentos

Os experimentos foram conduzidos nos municípios de Lavras, Itutinga e no distrito de Itirapuã (Lavras), localizados na mesorregião de Campo das Vertentes, e nos municípios de Lambari e São Gonçalo do Sapucaí, localizados na mesorregião Sul/Sudoeste de Minas, no estado de Minas Gerais, nos anos agrícolas de 2022 e 2023, à exceção de São Gonçalo do Sapucaí, cujo experimento foi conduzido apenas no ano agrícola de 2022. A seguir é apresentada uma descrição ambiental de cada local de condução dos experimentos em cada mesorregião de Minas Gerais:

a) Campo das Vertentes:

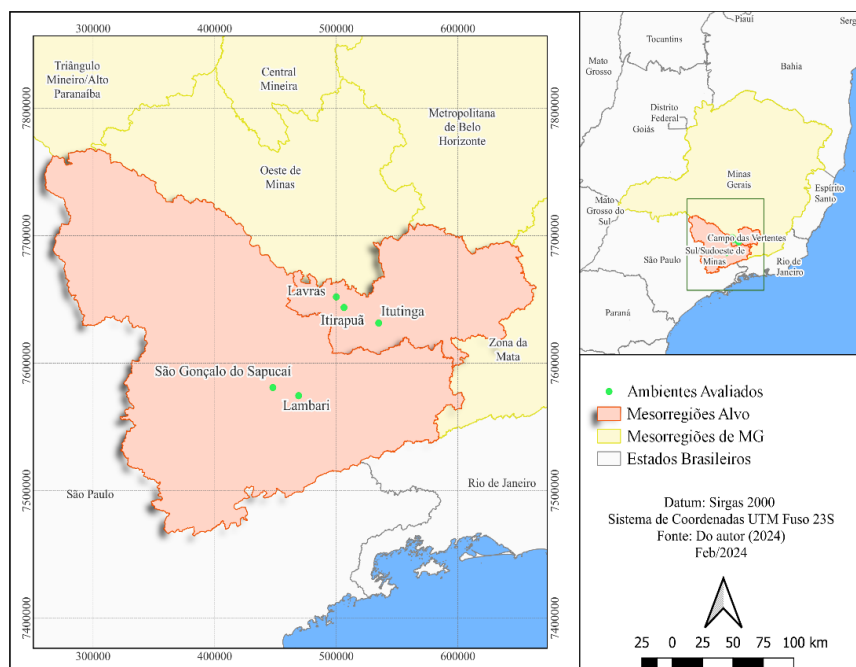
- Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária da Universidade Federal de Lavras (Fazenda Muquém), localizado no município de Lavras - MG, a uma altitude de 918 m, aos 21° 14' 00" de latitude sul e 45° 00' 00" de longitude oeste, com solo Latossolo Vermelho-Amarelo. A temperatura média anual é de aproximadamente 19,4°C e a precipitação média anual é de 1461,8 mm. O clima é classificado como Tropical de Altitude (CWa) na escala de Köppen (Semeadura: 18/03/2022 e 05/04/2023; Colheita: 29/07/2022 e 02/08/2023);
- Campo experimental da Faculdade Adventista de Minas Gerais (FADMINAS) – Campus I – Distrito de Itirapuã, localizada no município de Lavras – MG, a uma altitude média de 920 m, aos 21° 18' 03" de latitude sul e 44° 56' 20" de longitude oeste, com solos do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo. A temperatura média anual é de aproximadamente 19,1°C e a precipitação média anual é de 1400 mm. O clima é classificado como Tropical de Altitude (CWa) na escala de Köppen (Semeadura: 21/03/2022 e 31/03/2023; Colheita: 04/08/2022 e 01/08/2023);
- Fazenda 3W, localizada no município de Itutinga – MG, a uma altitude média de 969 m, aos 21° 25' 06" de latitude sul e 44° 39' 50" de longitude oeste. A temperatura média anual é de 19,3 °C e precipitação média anual de 1433,3 mm, com solos do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo. O clima é classificado como Tropical de Altitude (CWa) na escala de Köppen (Semeadura: 18/04/2022 e 30/03/2023; Colheita: 18/08/2022 e 09/08/2023);

b) Sul/Sudoeste de Minas:

- Campo Experimental da EPAMIG, localizado no município de Lambari - MG, a uma altitude média de 887 m, aos 21° 56' 00" de latitude sul e 45° 18' 00" de longitude oeste. A temperatura média anual é de 18,7 °C e precipitação total de 1654,3 mm, com solo Latossolo Vermelho-Amarelo. O clima é classificado como Tropical de Altitude (CWa) na escala de Köppen (Semeadura: 23/03/2022 e 20/04/2023; Colheita: 16/08/2022 e 26/09/2023);
- Fazenda Nacional Agrofarm, localizada no município São Gonçalo do Sapucaí (SG), a uma altitude média de 967 m, aos 21° 52' 30" de latitude sul e 45° 30' 19" de longitude oeste, com solos do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo. A temperatura média anual é de aproximadamente 19,5°C e a precipitação média anual é de 1256,7 mm. O clima é classificado como Tropical de Altitude (CWa) na escala de Köppen (Semeadura: 22/03/2022; Colheita: 27/07/2022).

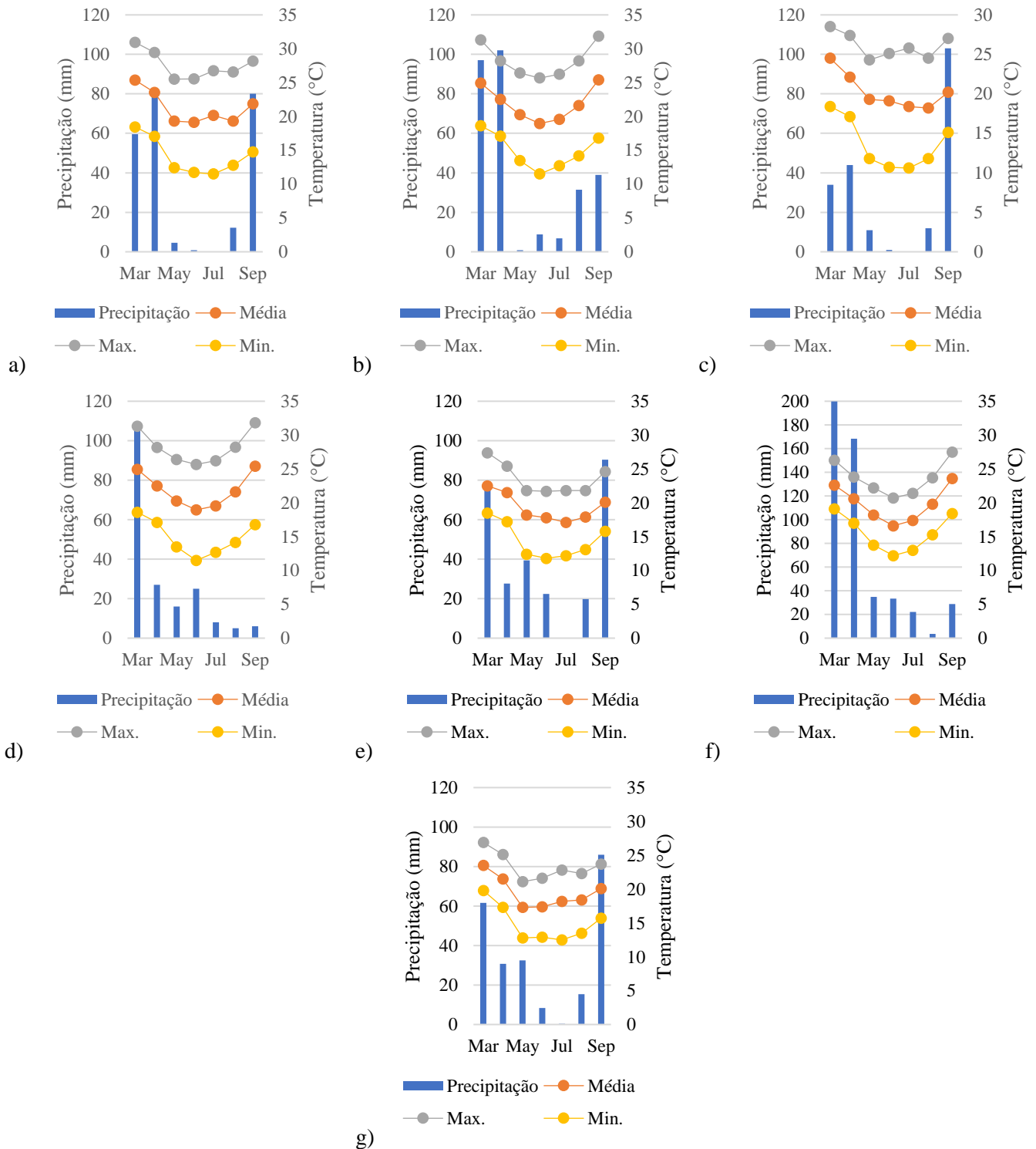
A localização das áreas experimentais no estado de Minas Gerais e os dados climáticos mensais da precipitação e das temperaturas mínima e máxima, nos dois anos agrícolas de 2022 e 2023 (da sementeira à colheita), estão apresentados nas Figuras 1 e 2, respectivamente.

Figura 1 – Mapa da localização geográfica das áreas experimentais nas mesorregiões Campo das vertentes e Sul/Sudoeste de Minas do estado de Minas Gerais.



Fonte: Do autor (2024).

Figura 2 - Dados diários de precipitação, temperaturas mínima, média e máxima para o período de cultivo dos experimentos de avaliação de cultivares de trigo nas safras 2022 e 2023. a) Lavras 2022, b) Lavras – 2023, c) Itutinga - 2022, d) Itutinga – 2023, e) Lambari - 2022, f) Lambari – 2023, g) São Gonçalo do Sapucaí - 2022



Fonte: INMET (2023).

3.2. Cultivares, plano experimental e condução

Avaliaram-se 16 cultivares de trigo de diferentes programas de melhoramento do Brasil, como Biotrigo Genética, Embrapa, EPAMIG e OR Genética de Sementes (Tabela 1).

Tabela 1 - Cultivares de trigo recomendadas para o Estado de Minas Gerais a serem avaliadas e seus obtentores (Continua).

Cultivar	Obtendor	Ciclo* (dias)	Regiões Recomendadas	Classificação
BR 18-Terena	Embrapa	P (102)	PR, SP, MG, GO, DF e MT (Sequeiro)	Pão
BRS 264	Embrapa	P (70 – 90)	RS, MG, GO, DF e MT (Irrigado e Sequeiro)	Pão
BRS 404	Embrapa	P/M (118)	MG, GO e DF (Sequeiro)	Pão
MGS Brilhante	EPAMIG	M (100-120)	GO, DF e MG (Sequeiro)	Pão
ORS 1403	OR Genética de Sementes	M (120)	RS, MG, GO, MT, MS, BA e DF (Sequeiro e Irrigado)	Pão
ORS Soberano	OR Sementes	M (120)	RS, SC, PR, SP, MG, GO, DF, BA (Sequeiro e Irrigado)	Melhorador
ORS Absoluto	OR Sementes	P (90-120)	RS, SC, PR, SP, MG, GO, DF, BA (Sequeiro e Irrigado)	Melhorador
ORS Guardiã	OR Sementes	M/P (100)	RS, SC, PR, SP, MG, GO, DF, BA (Sequeiro e Irrigado)	Pão
ORSENNA	OR Sementes	P (80-90)	RS, SC, PR, SP, MS, MG (Sequeiro e Irrigado)	Melhorador
ORS Feroz	OR Sementes	P (90)	RS, SC, MS, SP, MG, GO, DF, BA (Sequeiro e Irrigado)	Melhorador

Tabela 1 - Cultivares de trigo recomendados para o Estado de Minas Gerais a serem avaliadas e seus obtentores (Conclusão).

Cultivar	Obtentor	Ciclo* (dias)	Regiões Recomendadas	Classificação
ORS Premium	OR Sementes	M/P (100-120)	RS, MG, GO, MT, MS, BA e DF (Sequeiro e Irrigado)	Melhorado/Branqueador
TBIO Mestre	Biotrigo	M (120)	RS, PR, MS, MG (Sequeiro e Irrigado)	Melhorador
TBIO Aton	Biotrigo	M (120)	RS, SC, MG, GO e DF (Sequeiro e Irrigado)	Pão
TBIO Duque	Biotrigo	P (90)	RS, SC, MG, GO e DF (Sequeiro e Irrigado)	Pão
TBIO Audaz	Biotrigo	P (90)	RS, SC, PR, MS, MG e GO (Sequeiro e Irrigado)	Melhorador
TBIO Sintonia	Biotrigo	P (90)	RS, SC, PR, MG e GO (Sequeiro e Irrigado)	Melhorador

* SP: Super precoce; P: Precoce; M: Médio; MT: Médio-Tardio; T: Tardio.

Os experimentos seguiram o delineamento látice 4 x 4 com três repetições, com parcela constituída por cinco linhas de 5,0 m e espaçamento de 20 cm com diferentes “layouts” (linhas por colunas) de campo. A densidade de semeadura foi de 300 sementes por metro quadrado. O preparo das áreas constituiu-se da dessecação em pré-semeadura das plantas daninhas com herbicida à base de glifosato e de uma posterior roçagem. Posteriormente realizou-se a sulcagem e simultânea adubação de plantio. A semeadura foi realizada usando semeadora-adubadora de parcelas Semina II de cinco linhas, sendo aplicados 200 kg ha⁻¹ da formulação NPK 8-28-16 no sulco de semeadura.

Os experimentos foram conduzidos sob condições de sequeiro, utilizando-se irrigação suplementar em Lavras – 2022 e Lambari – 2023 para estabelecimento das plantas. A adubação

de cobertura foi realizada aos 15 dias após a emergência, mediante aplicação de 45 kg de N por hectare. O controle das plantas daninhas foi realizado com aplicação dos herbicidas Topik (Clodinafope-propargil) 240 EC (150 mL p.c. ha⁻¹) e Metsulfurom-metil (3,0 g.ha⁻¹) complementado por controle mecânico quando necessário. Não houve aplicação para controle fitossanitário. A colheita foi feita manualmente em todos os locais, excetuando-se Itutinga - 2023, no qual foi utilizada a colhedora de parcela Wintersteiger.

3.3. Caracteres avaliados

As características agronômicas mensuradas foram:

- a) Altura de planta (ALT, cm): medida da superfície do solo até a parte superior da espiga com auxílio de uma régua, após o florescimento de todas as plantas. Foram tomadas medidas da altura em dois pontos nas linhas centrais da parcela e, em seguida, calculada a média;
- b) Peso de mil grãos (PMS, g): medido utilizando contador eletrônico de sementes ESC 2011 Comp, desenvolvido pela empresa Sanik®, a partir do peso de 1000 grãos sem a palha;
- c) Peso do hectolitro (PH, kg hL⁻¹): medido utilizando o analisador de umidade e impurezas Gehaka® G650, a partir de uma amostra de grãos sem a palha, na umidade de 13%;
- d) Produtividade de grãos (PROD, kg ha⁻¹): medido a partir do peso dos grãos sem a palha aferido por balança, em umidade corrigida para 13%;
- e) Índice de produção corrigido ao PH (IPPH): estimado a partir da produtividade de grãos à 13% umidade e valores do PH corrigidos para 78% pela expressão proposta por Ignaczak e Andrade (1982): $PROD \times \left(\frac{PH+22}{100}\right)$.

3.4. Análise estatística

3.4.1 Análises individuais por ambiente:

Primeiramente foram realizadas as análises individuais para cada ambiente (combinação ano-local), de acordo com os seguintes modelos:

Modelo 1: Modelo linear misto - assumindo erros independentes (modelo base)

$$y = 1\mu + X_r\theta_r + X_g\theta_g + Z_bu_b + e \quad (4)$$

em que: \mathbf{y} é o vetor $N \times 1$ dos dados das N parcelas; $\mathbf{1}$ é o vetor de uns; μ é uma constante associada a todos os dados; θ_r é o vetor de efeitos fixos das repetições; θ_g é o vetor de efeitos fixos das cultivares; u_b é o vetor de efeitos aleatórios dos blocos dentro das repetições, $u_b \sim N(0, I\sigma_b^2)$; e é o vetor de efeitos aleatórios dos erros, $e \sim N(0, I\sigma_e^2)$. X_r , X_g e Z_b são as matrizes de delineamento associadas aos efeitos θ_r , θ_g e u_b , respectivamente. σ_b^2 e σ_e^2 são os componentes de variância dos blocos dentro de repetições e erros.

Modelo 2: Modelo linear misto assumindo erros autocorrelacionados

Para este modelo assumiu-se que os erros são autocorrelacionados ao longo das dimensões linha e coluna do experimento, e posteriormente, ajustados a partir de um processo autorregressivo de primeira ordem (AR1) (GILMOUR *et al.*, 1997). Assim, foi empregado o modelo 1, contudo para o termo do erro assumiu-se $e \sim N(0, R)$, em que R apresenta uma estrutura de covariância $R = \sigma_e^2 [AR1(\rho_L) \otimes AR1(\rho_C)]$, sendo ρ_L e ρ_C os coeficientes de autocorrelação para as coordenadas espaciais nas linhas e colunas, respectivamente, e \otimes representa o produto de Kronecker.

Utilizou-se a estatística de ajuste BIC (Critério de Informação Bayesiano ou de Schwarz) para avaliar a eficiência da correção espacial e, por conseguinte, escolha do modelo. Adicionalmente, foram estimadas para cada experimento (local e ano) as métricas de qualidade coeficiente de variação experimental (CVe) e a acurácia seletiva ($r\hat{g}g$) (RESENDE; DUARTE, 2007) usando os seguintes estimadores:

$$CVe = \frac{\sigma_e}{\bar{y}}; r\hat{g}g = \sqrt{1 - \frac{1}{F_{cg}}} \quad (5)$$

em que: σ_e : desvio padrão do erro experimental; \bar{y} : média geral; F_{cg} : valor do teste F de Snedecor calculado para o efeito de cultivar.

3.4.2. Análise multiambientes

Procedeu-se a análise multiambientes a partir das médias fenotípicas ajustadas das cultivares (médias BLUE) em cada ambiente do modelo escolhido baseado no BIC ponderados pelos erros-padrões associados. Esta análise foi realizada de acordo com o seguinte modelo estatístico:

$$\bar{y} = 1\mu + X_a\theta_a + X_g\theta_g + X_{ga}\theta_{ga} + \varepsilon \quad (6)$$

$$\bar{y} = 1\mu + X_s\theta_s + X_l\theta_l + X_{sl}\theta_{sl} + X_g\theta_g + X_{gs}\theta_{gs} + X_{gl}\theta_{gl} + X_{gsl}\theta_{gsl} + \varepsilon \quad (7)$$

em que: \bar{y} é o vetor $n \times 1$ das médias das cultivares em cada ambiente; θ_a é o vetor de efeitos fixos dos ambientes; θ_g é o vetor de efeitos fixos das cultivares; θ_{ga} é o vetor de efeitos fixos da interação cultivares x ambientes; θ_s é o vetor de efeitos fixos dos anos agrícolas; θ_l é o vetor de efeitos fixos dos locais; θ_{sl} é o vetor de efeitos fixos da interação anos agrícolas x locais; θ_{gs} é o vetor de efeitos fixos da interação cultivares x anos agrícolas; θ_{gl} é o vetor de efeitos fixos da interação cultivares x locais; θ_{gsl} é o vetor de efeitos fixos da interação cultivares x anos agrícolas x locais; ε é o vetor de efeitos aleatórios dos erros, $\varepsilon \sim N(0, W)$, sendo W uma matriz diagonal dos pesos correspondentes ao recíproco dos erros-padrões associados às médias das cultivares em cada ambiente. $X_g, X_{ga}, X_s, X_l, X_{sl}, X_{gs}, X_{gl}$ e X_{gsl} são as matrizes de delineamento associadas aos efeitos $\theta_a, \theta_g, \theta_{ga}, \theta_s, \theta_l, \theta_{sl}, \theta_{gs}, \theta_{gl}$ e θ_{gsl} , respectivamente.

Para as análises foi empregada a abordagem de modelos lineares mistos de Henderson (RESENDE, 2007) com recuperação da informação interblocos usando o pacote lme4 e ASREML-R (BATES *et al.*, 2015; BUTLER *et al.*, 2009) no programa R (R CORE TEAM, 2020). Os componentes da variância foram estimados pelo método da máxima verossimilhança residual, sendo a significância verificada pelo teste da razão de verossimilhança à 5% de probabilidade usando o pacote lmerTest (KUZNETSOVA *et al.*, 2017) e ASREML-R. A significância do efeito de cultivares à 5% de probabilidade foi avaliada pelo teste F-Snedecor usando o pacote car (FOX; WEISBERG, 2019) e testes de Wald no ASREML-R (BUTLER *et al.*, 2009).

As médias fenotípicas ajustadas das cultivares foram estimadas usando o pacote ASREML-R (BUTLER *et al.*, 2009). O agrupamento das médias foi realizado mediante aplicação do teste de Scott-Knott usando “script” customizado da função sk do pacote ExpDes (FERREIRA *et al.*, 2013).

3.4.3. Análises de adaptabilidade e estabilidade

Empregou-se o método de Annicchiarico para estimação do parâmetro de adaptabilidade e estabilidade associada a cada cultivar relativo à média do local, denominado de índice de

confiabilidade ou de recomendação. Este índice também foi calculado relativo às cultivares testemunhas BRS 264 e TBIO Aton. O índice de recomendação de Annicchiarico de cada cultivar (I_i) foi calculado a partir da seguinte expressão (ANNICCHIARICO, 1992):

$$I_i = \bar{p}_i - Z_{(1-\alpha)}s_i \quad (8)$$

em que: \bar{p}_i é a resposta percentual média da cultivar i nos l locais; $Z_{(1-\alpha)}$ é o quantil da distribuição normal padronizada; α é o nível de significância pré-fixado (0,25); s_i é o desvio padrão das porcentagens da cultivar i nos l locais.

O método multivariado GGE Biplot foi aplicado para detalhar o inter-relacionamento das cultivares e dos locais (YAN; TINKER, 2006) a partir do ajuste do seguinte modelo linear-bilinear:

$$\bar{y}_{ij} = \lambda_1\gamma_{i1}\delta_{j1} + \lambda_2\gamma_{i2}\delta_{j2} + \rho_{ij} \quad (9)$$

em que: \bar{y}_{ij} é a média fenotípica ajustada de cada cultivar em cada local obtida a partir da análise multiambientes; λ_1 e λ_2 são valores singulares do primeiro e segundo componente principal (CP) associados à matriz dos efeitos das cultivares adicionados aos efeitos das interações cultivares x locais; γ_{i1} e γ_{i2} são elementos dos vetores singulares do primeiro e segundo CP associados ao efeito da cultivar i ; δ_{i1} e δ_{i2} são elementos dos vetores singulares do primeiro e segundo PC associados ao efeito do local j ; ρ_{ij} é o desvio (“noise”) do modelo.

Foram geradas as representações gráficas biplots para descrever as cultivares quanto a sua adaptabilidade e estabilidade, bem como acerca da representatividade e poder discriminativo dos ambientes ou locais ou possível definição de mega-ambientes (YAN; TINKER, 2006).

A análise da estabilidade para múltiplos caracteres foi realizada estimando o índice de estabilidade multicaracterística (MTSI) recomendado por Olivoto *et al.* (2019). Este índice é baseado na distância entre a cultivar e o ideotipo estimada com os valores das análises dos componentes principais. A estabilidade de cada cultivar foi calculada pela média ponderada dos escores absolutos da decomposição por valores singulares da matriz $G + GA$ ($WAASB_i$) a partir da seguinte equação:

$$WAASB_i = \sum_{k=1}^2 \frac{|IPCA_{ik} \times EP_k|}{EP_k} \quad (10)$$

em que: $IPCA_{ik}$ é o escore da i -ésimo cultivar no k -ésimo eixo do componente principal e EP_k é a quantidade de variação explicada pelo k -ésimo componente principal (λ_k^2). A cultivar com menor $WAASB_i$ é considerada mais estável.

A seleção simultânea para performance e estabilidade foi realizada como base no índice $WAASBY_i$, o qual corresponde à média ponderada da média (Y) e estabilidade ($WAASB_i$), a partir da seguinte expressão:

$$WAASBY_i = \frac{(rY_i \times \theta_Y) + (rW_i \times \theta_s)}{\theta_Y + \theta_s} \quad (11)$$

em que: θ_Y e θ_s são os pesos da média e do $WAASB_i$ (considerados 65 e 35%, respectivamente). rY_i e rW_i são os valores reescalados entre 0-100 para cada característica avaliada e o $WAASB_i$ calculado. O ideótipo é definido como aquele com o $WAASBY$ reescalado mais alto (100) para todas as variáveis analisadas.

A estimação do índice de estabilidade multicaracterística foi a partir da seguinte expressão:

$$MTSI_i = \left[\sum_{j=1}^f (F_{ij} - F_j) \right]^{0.5} \quad (12)$$

em que: $MTSI_i$ é o índice de estabilidade multicaracterística da i -ésima cultivar, F_{ij} é o escore j da i -ésima cultivar e F_j é a j -ésimo escore do ideótipo. A cultivar com o menor $MTSI$ está mais próximo do ideótipo e possui um alto desempenho médio e estabilidade para as características avaliadas (OLIVOTO *et al.*, 2019). Para a seleção de cultivares foi utilizada uma intensidade de seleção de 15%.

As análises do método GGE Biplot e do índice $MTSI$ foram realizadas usando o pacote Metan (OLIVOTO; LUCIO, 2020). Para o índice de recomendação de Annicchiarico foi utilizado um “script” customizado no software R (R CORE TEAM, 2020).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A correção espacial AR1 x AR1 proporcionou uma melhor qualidade de ajuste de modelo e um aumento na precisão na comparação entre duas médias fenotípicas ajustadas de cultivares nos experimentos de São Gonçalo do Sapucaí para as características altura de planta (ALT), produção de grãos (PROD) e índice IPPH, Itirapuã para peso de mil sementes (PMS) e em Lambari para PROD, PMS e IPPH. A eficiência relativa ao modelo AR1 x AR1 variou de 118% (PMS, Lambari 2022) e 196% (IPPH, São Gonçalo do Sapucaí) comparado ao modelo base sem a correção espacial. Em estudo realizado por Raffo *et al.* (2023), os autores reportaram vantagens com o uso da correção espacial em análise em dois estágios na predição genômica da produção de grãos de trigo de inverno. Os autores relataram ainda que, sem fazer a correção espacial, resultou num inflacionamento das estimativas.

A acurácia (r_{gg}) para seleção de cultivares em cada ambiente para as características ALT e PMS foram, em geral, acima de 0,90 (Tabela 2), retratando cenários da classe de precisão muito alta (RESENDE; DUARTE, 2007), enquanto que para peso do hectolitro (PH), PROD e IPPH, observaram-se valores mais variáveis, com destaque para valores baixos em alguns ambientes, que denotaram baixa variação entre as cultivares, como destacado para a característica PH, reforçado pelos valores dos coeficientes de variação experimental ($CV_e < 8\%$) (Tabela 2). Em alguns ambientes, houve maior influência de fatores microambientais aleatórios que acentuaram a variação do erro experimental, conforme assinalado pelo CV_e , a exemplo de Itutinga, Lambari e Lavras no ano agrícola de 2022 para a característica PROD ($CV_e > 35\%$), no entanto, para o ano 2023 se encontraram CV_e próximos ao recomendado por Nardino *et al.* (2023).

Teixeira *et al.* (2023) encontraram valores da acurácia semelhantes para cada uma das características avaliadas em cultivares de trigo em Lavras e Itutinga. Os autores relataram que a característica PROD foi a mais afetada pelo ambiente e que essas diferenças podem ser associadas aos fatores macroambientais, especialmente tecnológicos em Itutinga, que possuem uma melhor estrutura e manejo do solo (NARDINO *et al.* 2023; THIND *et al.*, 2019).

As análises individuais revelaram diferenças significativas entre as cultivares de trigo dos diferentes obtentores ($P < 0,05$) (Tabela 2), com destaque para as características ALT e PMS em todos os ambientes avaliados. As cultivares, em geral, não diferiram quanto à característica PROD, excentuando-se Itutinga 2023, como foi encontrado nos ensaios de Teixeira *et al.* (2023).

Tabela 2 – Estimativas de parâmetros das análises individuais para as características altura de planta (ALT, cm), peso de mil sementes (PMS, g), peso do hectolitro (PH, kg hL⁻¹), produção de grãos (PROD, kg ha⁻¹) e IPPH referente à avaliação de cultivares de trigo em cinco locais nos anos agrícolas 2022 e 2023 (Continua).

Parâmetro	Campo das Vertentes						Sul/Sudoeste de Minas		
	Lavras		Itirapuã		Itutinga		Lambari		SGS
	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022
ALT (cm)									
Fc Cult.	4,4*	8,5*	7,4*	29,5*	5,9*	28,9*	5,3*	28,2*	13,0*
Média	56	67	62	80	64	82	68	89	64
σ_e^2	29,37	7,18	28,19	8,77	17,22	10,57	44,26	16,28	18,8
CVe (%)	10	4	9	4	6	4	10	4	7
<i>rgg</i>	0,87	0,93	0,93	0,98	0,91	0,98	0,90	0,98	0,96
PMS (g)									
Fc Cult.	46,9*	41,1*	141,6*	34,8*	38,5*	9,3*	36,6*	44,3*	21,1*
Média	38	36	39	40	39	42	38	34	39
σ_e^2	1,74	1,63	0,58	1,82	1,32	3,93	1,24	1,27	3,17
CVe (%)	4	3	2	3	3	5	3	3	5
<i>rgg</i>	0,98	0,98	0,99	0,98	0,98	0,94	0,98	0,98	0,97
PH (g)									
Fc Cult.	2,6*	8,1*	1,3	5,4*	2,2	2,6*	1,2	1,2	4,5*
Média	77,22	78,19	81,59	76,90	80,59	78,88	83,63	83,63	90,45
σ_e^2	10,81	0,86	3,16	1,54	9,69	2,55	30,46	30,46	2,51
CVe (%)	4	1	2	2	4	2	7	7	2
<i>rgg</i>	0,78	0,93	0,45	0,90	0,73	0,78	0,44	0,44	0,88
PROD (kg ha⁻¹)									
Fc Cult.	1,7	1,3	1,4	1,4	0,6	2,3*	0,7	1,7	0,9
Média	1001	2691	904	3317	2040	6414	1492	2049	2449
σ_e^2	175771	93684	43630	178023	529224	136196	483258	150111	157625
CVe (%)	36	11	23	13	36	6	40	18	16
<i>rgg</i>	0,63	0,48	0,51	0,51	NA	0,75	NA	0,63	NA

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de Snedecor; Fc Cult.: Fc Cultivar; σ_e^2 : variância residual; *rgg*: acurácia seletiva e CVe: coeficiente de variação experimental. Fonte: Do autor (2024).

Tabela 2 – Estimativas de parâmetros das análises individuais para as características altura de planta (ALT, cm), peso de mil sementes (PMS, g), peso do hectolitro (PH, kg hL⁻¹), produção de grãos (PROD, kg ha⁻¹) e IPPH referente à avaliação de cultivares de trigo em cinco locais nos anos agrícolas 2022 e 2023 (Conclusão).

Parâmetro	Campo das Vertentes						Sul/Sudoeste de Minas		
	Lavras		Itirapuã		Itutinga		Lambari		SGS
	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022
IPPH									
Fc Cult.	1,5	1,3	1,3	1,5	0,5	2,7*	4,1*	2,12	9,3*
Média	1001	2697	937	3283	2106	6473	1605	2077	2776
σ_e^2	128504	101531	53271	182631	489117	153058	189949	137118	100938
CVe (%)	35	11	24	13	33	6	27	17	11
<i>rgg</i>	0,57	0,48	0,42	0,60	NA	0,80	0,86	0,73	0,94

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de Snedecor; Fc Cult.: Fc Cultivar; σ_e^2 : variância residual; *rgg*: acurácia seletiva e CVe: coeficiente de variação experimental. Fonte: Do autor (2024).

Para o PH, diferenças foram observadas em seis dos nove ambientes (Tabela 2). Para o índice IPPH, observou-se diferenças entre as cultivares nos ambientes da mesorregião Sul/Sudoeste de Minas, possivelmente devido à correção pelo PH e em Itutinga em 2023, devido às diferenças de produção de grãos (MACHADO *et al.*, 2021).

Pela tabela 2, também é possível destacar com base no CVe para as características ALT, PROD e IPPH que a precisão experimental foi mais baixa, em geral, no ano agrícola de 2022, quando comparado a 2023.

Observando a variável climática precipitação (Figura 2), percebe-se uma distribuição pluviométrica mais favorável ao trigo em 2023. Contudo, pode-se creditar parte destas diferenças de precisão a uma melhoria nas práticas de experimentação relacionadas com o controle do ataque de pássaros e de plantas daninhas em Itirapuã, Lambari e Lavras. Em suma, as diferenças de precisão entre os ambientes remetem à heterocedasticidade, a qual foi levada em conta por ocasião da análise multiambientes, ao proceder a uma análise com base nas médias fenotípicas ajustadas ponderadas pelos respectivos erros-padrões associados, o que configura uma análise em dois estágios (MÖHRING; PIEPHO 2009; RAFFO *et al.*, 2023).

As análises multiambientes mostraram diferenças significativas entre os anos e locais para todas as características, com destaque para o efeito expressivo destes fatores na variação fenotípica das características PROD e IPPH (Tabela 3). Em geral, houve um efeito mais pronunciado de local do que de ano, com destaque para PMS e PH. A estatura média das plantas em 2023 (79 cm) foi superior a 2022 (63 cm). Em Lambari, a estatura média das cultivares foi a maior observada (78 cm), ao passo que em Lavras foi de 61 cm. Este valor mais baixo em Lavras pode ser explicado pela condição de solo mais compactado em 2022 e a época de semeadura mais tardia em 2023 (CONDÉ *et al.*, 2010; NARDINO *et al.*, 2022). Para PMS os valores médios variaram de 36 g (Lambari) a 40 g (Itutinga). As médias de PH foram, em geral, acima de 78 kg/hL em todos os ambientes (Tabela 2), permitindo classificar o trigo como tipo I, apropriado para produção de farinha de qualidade pelos moinhos.

No que diz respeito à característica PROD, a produção em 2023 (3617 kg/ha) foi mais que duas vezes superior à observada em 2022 (1577 kg/ha), o que deve estar associado à melhoria das condições edafoclimáticas e de manejo (MACHADO *et al.*, 2021; CASAGRANDE *et al.*, 2024). Em termos de efeito de local, destaque pode ser dado a Itutinga pelo elevado nível de manejo tecnológico adotada, com expressiva cobertura do solo com palhada, aliado à maior frequência e intensidade de orvalho, que fortemente contribuem para um cultivo de trigo sob condições de sequeiro, no qual a disponibilidade de água é um importante limitador (CONDÉ *et al.*, 2010). O índice IPPH combina as características PROD e PH com referência a um PH de 78. Deste modo, devido à forte influência da PROD, o padrão de resposta relativo aos efeitos de ano e local se assemelha ao ocorrido para PROD.

A interação ano x local foi significativa ($P < 0,05$) para todas as características (Tabela 3), indicando que o efeito do ano variou entre os locais testados, devido às diferentes condições ambientais, como distribuição pluviométrica, data de plantio, solo e manejo (NARDINO *et al.*, 2022; CASAGRANDE *et al.*, 2024). Por exemplo, em Lavras, no ano de 2022, a área experimental apresentou deficiências nas condições físicas devido à compactação.

As cultivares de trigo testadas de diferentes obtentores apresentaram diferenças para todos os caracteres mensurados, com maior destaque relativamente para ALT e PMS (Tabela 3), fato ratificado pela separação de grupos pelo teste de Scott-Knott à 5% de probabilidade (Figura 3). A cultivar MGS Brilhante, obtida pela EPAMIG, apresentou a maior estatura (92 cm). Vale

mencionar que esta cultivar é mística e está sendo utilizada para fins forrageiros. Em termos de ideótipo de trigo para fins de produção de grãos, há interesse mais voltado para cultivares de estatura inferior a 75 cm, as quais, em geral, apresentam maior tolerância ao acamamento. Para PMS, destacaram-se as cultivares BR 18 e ORS Guardiã, com grãos maiores e PMS em torno de 47 g. Para os demais caracteres PROD, PH e IPPH, o teste de Scott-Knott não conseguiu separar as cultivares em grupos, embora o teste de Wald tivesse detectado significância para o efeito de cultivares.

Tabela 3 – Valores da estatística de Wald para os caracteres altura de planta (ALT, cm), peso de mil sementes (PMS, g), peso do hectolitro (PH, kg hL⁻¹), produção de grãos (PROD, kg ha⁻¹) e IPPH referente à avaliação de cultivares de trigo nos anos agrícolas 2022 e 2023.

FV	GL	ALT	PMS	PH	PROD	IPPH
Ano	1	1261*	18*	177*	2187,6*	1910,1*
Local	4	1204*	602*	2432*	5778,1*	5135,8*
Ano x Local	3	49*	387*	101*	561*	476,1*
Cultivar	15	1688*	5582*	311*	39,5*	42,4*
Cultivar x Ano	15	24	141*	23	6,6	7,6
Cultivar x Local	60	234*	266*	89*	92,9*	103,4*
Cultivar x Ano x Local	45	84*	109*	65*	54,8	53,8

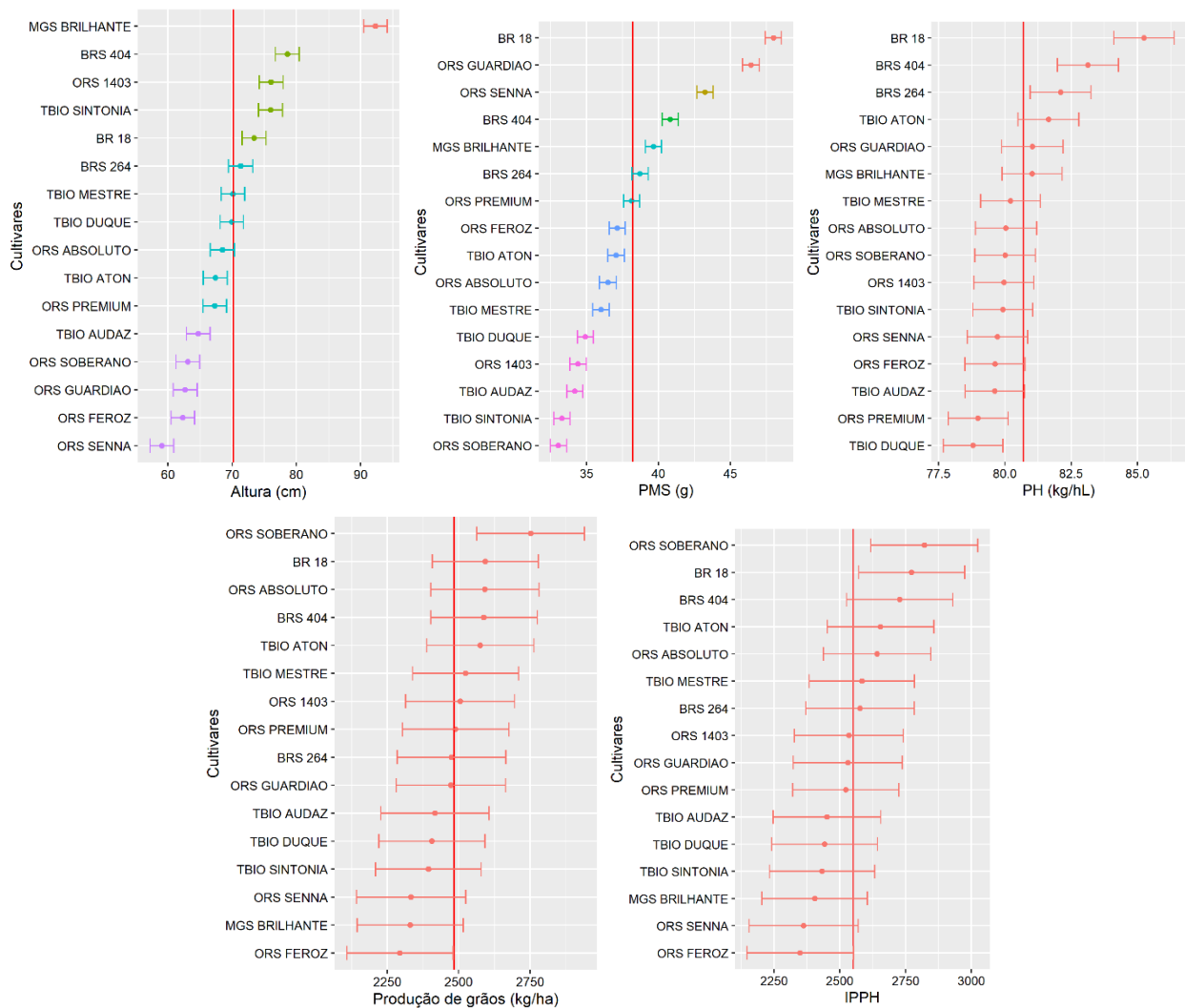
*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de Wald. Fonte: Do autor (2024).

Observou-se que para PH, o maior valor médio observado foi da cultivar BR 18, enquanto para PROD e IPPH foi da ORS Soberano. A divergência entre testes pode ocorrer devido a diferenças existentes nas suas propriedades relacionadas ao controle das taxas de erro tipo I e II, e ao poder. Acrescenta-se, ainda, que os testes estatísticos podem diferir quanto a robustez, ou seja, na capacidade de preservar suas propriedades sob cenários em que pressupostos requeridos não sejam atendidos (e.g. homocedasticidade, normalidade).

A avaliação de cultivares em múltiplos ambientes tem por objetivo permitir estimar e explorar a interação cultivares por ambientes (G x A), a qual implica em diferenças nos padrões de resposta das cultivares devido apresentarem níveis distintos de adaptabilidade e estabilidade. A plasticidade genotípica frente aos diferentes ambientes de cultivo, que correspondem a combinações de variados fatores macroambientais previsíveis e imprevisíveis (ALLARD;

BRADSHAW, 1965; YAN; TINKER, 2006; CASAGRANDE *et al.*, 2024), é almejada pelos melhoristas como forma de mitigar o efeito da interação G x A. Neste estudo, evidenciou-se interação G x A significativa para todos os caracteres E, ao desdobrar este efeito, notou-se que a maior fração da interação G x A está relacionada com a interação cultivares x locais (CONDÉ *et al.*, 2010). A interação cultivares x anos foi detectada apenas para PMS, enquanto a interação cultivares x ano x local foi detectada para ALT, PMS e PH (Tabela 3).

Figura 3 – Médias fenotípicas ajustadas com a análise de Scott-Knott (SK) de cultivares de trigo para os caracteres altura de planta (ALT, cm), peso de mil sementes (PMS, g), peso do hectolitro (PH, kg hL⁻¹), produção de grãos (PROD, kg ha⁻¹) e IPPH referentes à avaliação nos anos agrícolas 2022 e 2023.



As Cores representam grupos independentes determinados pela análise de Scott-Knott. Fonte: Do autor (2024).

Tabela 4 -Índice de recomendação de Annicchiarico I_i (%) das cultivares avaliadas relativo às testemunhas BRS 264 e TBIO Aton para as características altura de planta (ALT, cm), peso de mil sementes (PMS, g), peso do hectolitro (PH, kg hL⁻¹), produção de grãos (PROD, kg ha⁻¹) e IPPH.

Cultivares	ALT		PMS		PH		PROD		IPPH	
	BRS 264	TBIO Aton	BRS 264	TBIO Aton	BRS 264	TBIO Aton	BRS 264	TBIO Aton	BRS 264	TBIO Aton
BR 18	97,9	106,9	116,9	123,7	102,3	102,9	91	87,4	93,8	90,8
BRS 264	100	101,3	100	100,3	100	99	100	82,7	100	84,4
BRS 404	103,4	108,2	102,1	106,4	100,2	100,7	80,4	88,6	81,8	90,4
MGS BRILHANTE	123,1	130	97,5	102	96,9	97,2	79,1	82,8	78,2	81
ORS 1403	102,3	109,5	85,9	90,6	95,7	96,1	81	88,7	78,5	86,3
ORS ABSOLUTO	92,8	98,7	90,8	96,9	96,3	96,5	90,7	93,5	88,4	92,6
ORS FERROZ	83,6	88,8	91,3	97,9	96	96,6	72,1	71,4	71,1	71,5
ORS GUARDIÃO	83,7	87,8	114,9	121,1	97,1	98,1	88,1	87,5	87,7	87,3
ORS PREMIUM	91,5	95,7	94,1	99,9	94,7	95,5	91,2	88,6	89,1	87,8
ORS SENNA	76,3	80,3	107,8	114,4	94,8	95,2	84,9	75,9	80,1	72,9
ORS SOBERANO	85,5	90,5	82,7	87,5	95,4	96	103,3	99,1	101,3	99,3
TBIO ATON	89,9	100	91,9	100	97,9	100	85,7	100	85,4	100
TBIO AUDAZ	87,5	93,6	84,3	90,1	95,3	96,1	82,1	84	79,6	82,2
TBIO DUQUE	93,6	100,3	86,7	92,2	93,5	94,4	87,6	84,2	83,5	82
TBIO MESTRE	93,9	101	88,3	94,9	96,1	96,8	90,8	91,1	88,4	91
TBIO SINTONIA	102,8	109,1	82,7	88,1	94,8	95,6	82,9	84,8	80,4	83,3

Fonte: Do autor (2024)

Existem vários métodos de estudo de adaptabilidade e estabilidade que permitem o melhorista descrever as cultivares baseado em diferentes parâmetros e conceitos. Contudo, é, em geral, entendido que o emprego de métodos complementares pode auxiliar sobremaneira na

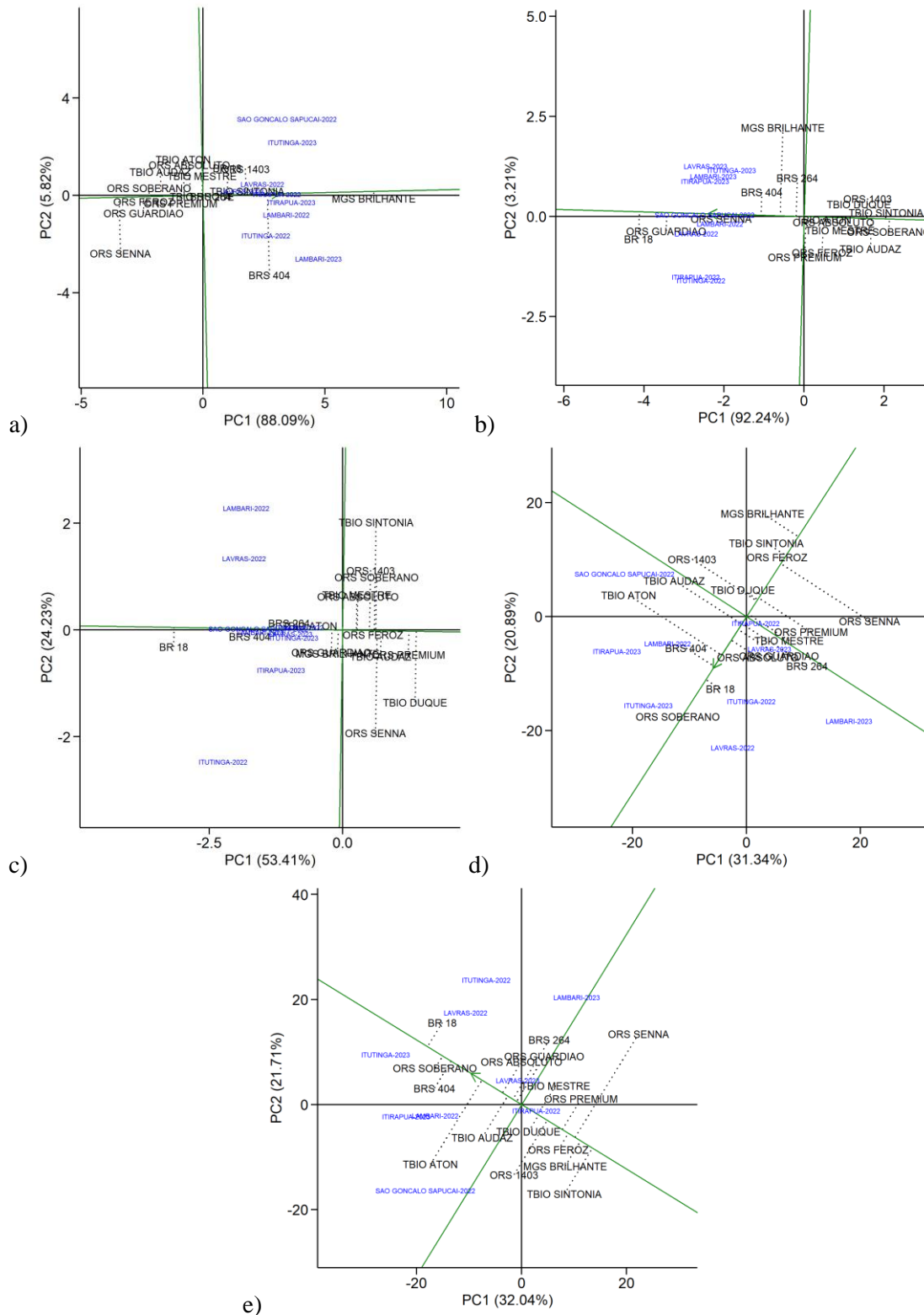
descrição mais assertiva das cultivares. O método de Annicchiarico (1992) proporciona um índice de recomendação para classificação das cultivares de trigo, em que valores mais altos indicam menor risco em relação às características avaliadas.

Na Tabela 4, são apresentados os valores do índice de recomendação, em porcentagem, obtidos pelo método de Annicchiarico, com base nas testemunhas BRS 264 e TBIO Aton, as quais são as cultivares mais adotadas na região. Verificou-se que as cultivares se comportaram de maneira muito semelhante, com algumas destacando-se por características específicas. Por exemplo, em relação à ALT, a cultivar MGS Brilhante tem elevada confiabilidade (75%) de apresentar estatura 23% superior à BRS 264 e 30% superior à TBIO Aton, mesmo em ambientes menos favoráveis, o que a torna uma opção para silagem e alimentação animal, enquanto a ORS Feroz, nestas condições, apresentaria estatura 16,4% inferior à BRS 264 e 11,2% inferior à TBIO Aton. Outras cultivares que se destacaram foram a BR 18 e a ORS Guardião quanto ao PMS, com elevados índices de recomendação relativo à BRS 264 (116,9% e 114,9%) e à Tbio Aton (123,7% e 121,1%). Para a característica PH, apenas a cultivar BR 18 apresentou índice de recomendação acima de 100% relativo às cultivares BRS 264 e Tbio Aton. Em relação à PROD e ao IPPH, a cultivar que se destacou foi a ORS Soberano, enquanto a ORS Feroz mostrou-se com maior risco de recomendação.

Os dois primeiros componentes principais da análise GGE Biplot proporcionaram uma explicação de mais de 70% da soma dos quadrados de $G + G \times A$ para os caracteres ALT, PMS e PH, no entanto para as características PROD e IPPH, a variação retida foi de apenas aproximadamente 52% (Figura 4). Porém, esse resultado é explicado por Yan *et. al.* (2000), que nos mostra que o estudo com uma gama de locais, em pontos bem dispersos, e levando-se em conta a alta sensibilidade das cultivares com fatores bióticos e abióticos, dificilmente alcançaria uma alta eficiência em um modelo bidimensional. Ressalta-se ainda que o objetivo da análise é explicar a variação que remeta ao padrão de resposta atribuído ao efeito da interação cultivares x ambientes, sem inclusão de ruído (*noise*).

A figura 4 permite a caracterização das cultivares quando a adaptabilidade e estabilidade e seus resultados têm sido bastante utilizado para seleção e ciclagem de cultivares (YAN *et al.*, 2007).

Figura 4 – Biplot médias vs estabilidade dos cultivares para os caracteres. a) altura de planta (ALT, cm); b) peso de mil sementes (PMS, g), c) peso do hectolitro (PH, kg hL⁻¹); d) produção de grãos (PROD, kg há⁻¹); e) IPPH



Fonte: Do autor (2024)

A cultivar com maior altura de planta e boa adaptabilidade foi a MGS Brilhante, no entanto, a mais estável em todos os ambientes com uma boa altura (>75 cm) foi a TBIO Sintonia, por outro lado, a cultivar com menor altura de planta foi a ORSSENNNA (Figura 4a).

Para as características PMS e PH a BR18 foi a cultivar com os maiores valores e com boa estabilidade nos ambientes avaliados (Figura 4b e Figura 4c). Para a produção de grãos e IPPH a cultivar mais estável foi a ORS Soberano, de igual maneira foi a mais produtiva com respeito aos outros cultivares (Figura 4d e Figura 4e).

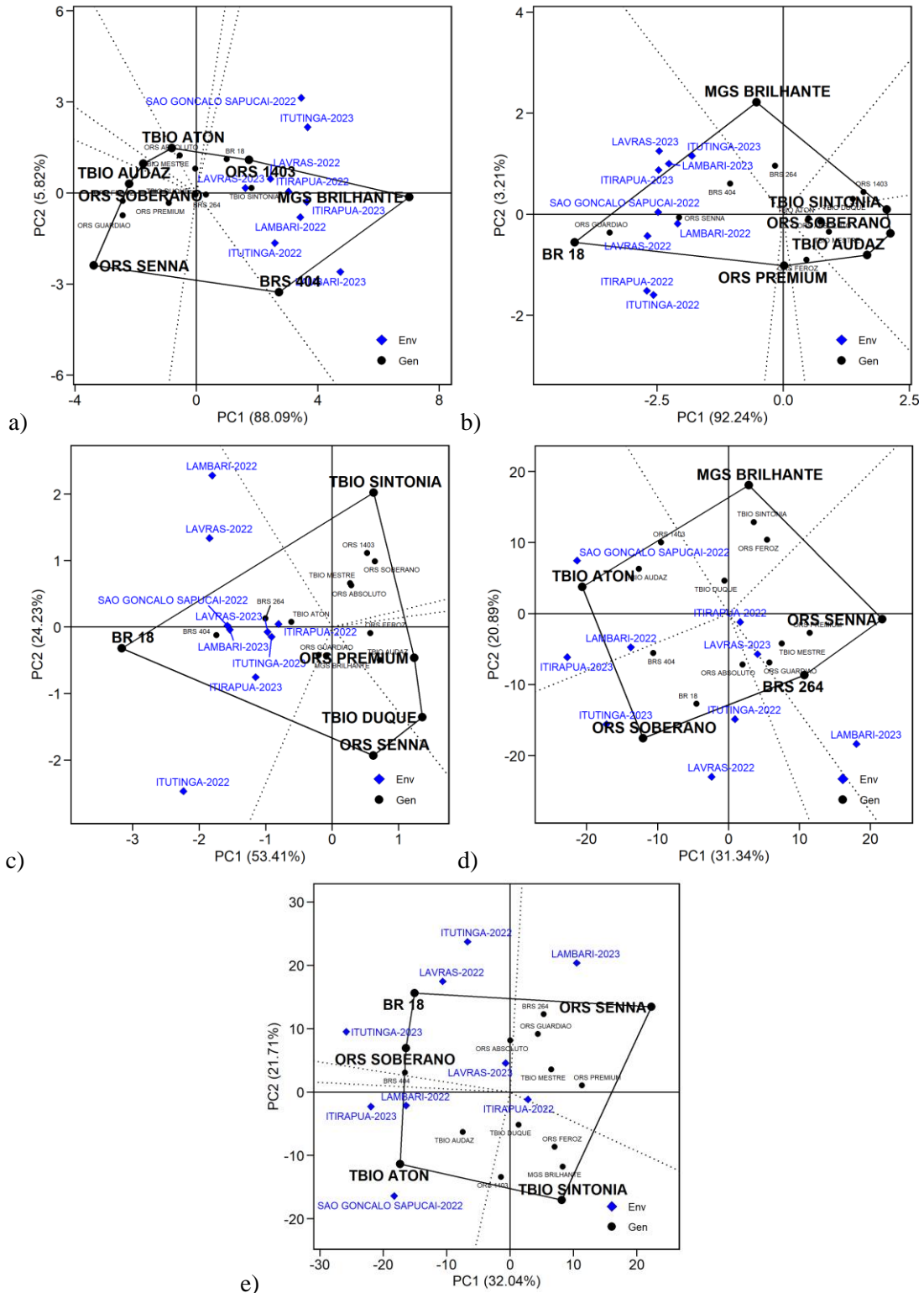
O agrupamento dos diferentes ambientes para formar os mega-ambientes, juntamente com a identificação das melhores cultivares em cada ambiente, é apresentado na Figura 5. A linha pontilhada que se estende da origem do Biplot indica que cada vértice forma um mega-ambiente (ME), com a divisão baseada na performance da cultivar em um grupo específico de ambientes. Neste estudo, foi identificado, somente, um mega-ambiente para as características de altura de planta, PMS e PH, indicando que as cultivares podem ter comportamentos semelhantes em relação a essas características (Figura 5a, Figura 5b e Figura 5c).

As cultivares localizadas em cada vértice do grupo de ambientes representam as melhores cultivares para aquele mega-ambiente, com destaque para as cultivares MGS Brilhante para ALT e BR 18 para PMS e PH. Nos setores onde nenhum dos ambientes foi agrupado com as cultivares, indica que eles obtiveram as piores médias em um ou mais ambientes (YAN *et al.*, 2007).

Por outro lado, nas características de produção e IPPH (Figura 5d e Figura 5e) os locais mostraram um comportamento heterogêneo entre os anos agrícolas, permitindo determinar alguns mega-ambientes como Lavras (2022) com Itutinga (2022 e 2023) e Lambari (2022) com Itirapuã (2023) e São Gonçalo do Sapucaí para PROD (Figura 5d). Essa divergência nos ambientes pode ser explicada pelas diferenças agroclimáticas, entre eles, em cada ano agrícola.

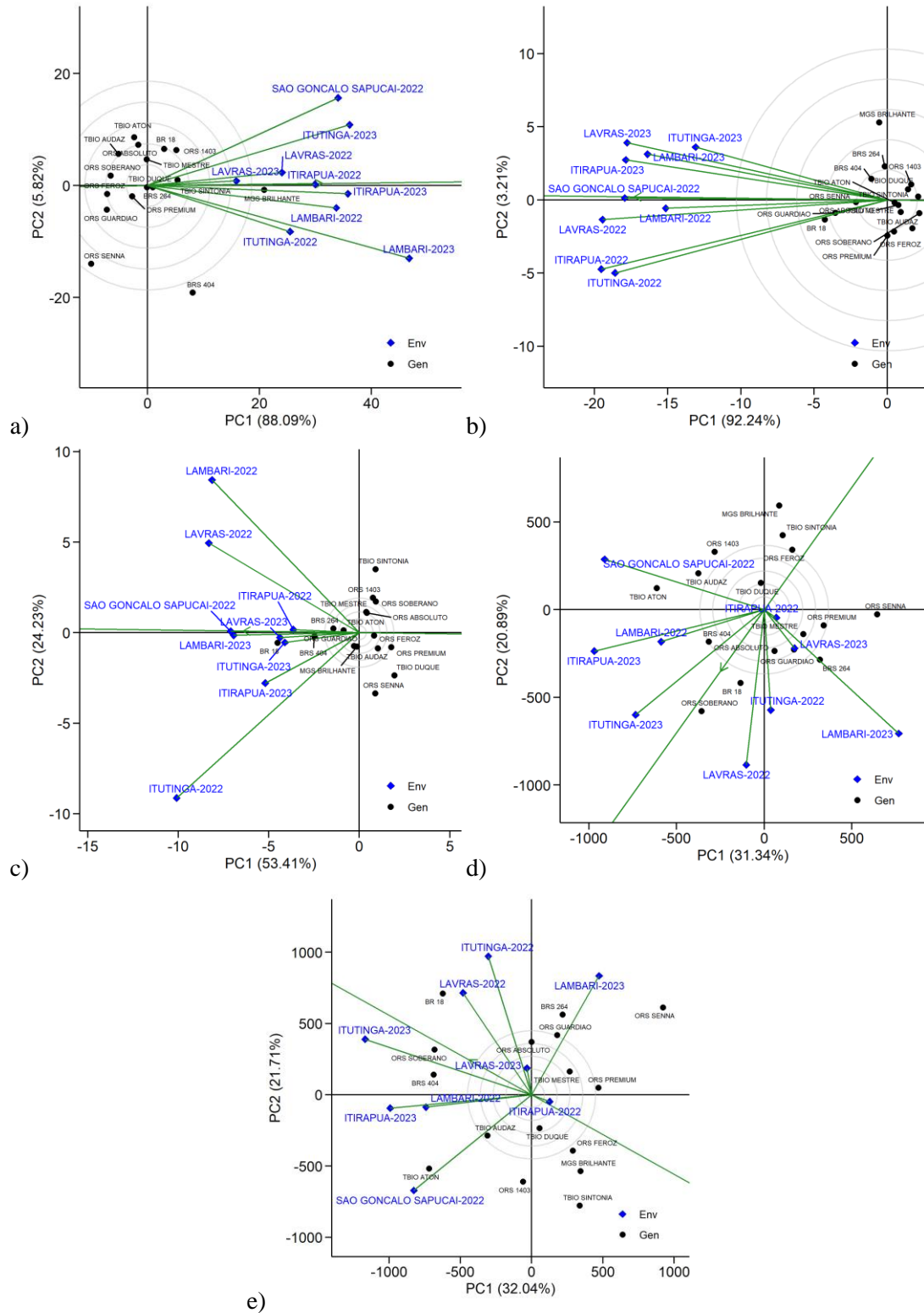
Yan *et al.* (2014) indicam que essas variações não sempre são constantes aos anos avaliados, portanto, as cultivares podem ser selecionadas segundo sua performance na região; por isso é importante destacar a performance das cultivares ORS Soberano e TBIO Aton, que foram mais produtivas na maioria dos locais e anos avaliados (Figura 5d e Figura 5e).

Figura 5 – Biplot quem-ganhou-onde do inter-relacionamento de cultivares e ambientes para os caracteres a) altura de planta (ALT, cm); b) peso de mil sementes (PMS, g), c) peso do hectolitro (PH, kg hL⁻¹); d) produção de grãos (PROD, kg ha⁻¹); e) IPPH.



Fonte: Do autor (2024).

Figura 6 – Biplot discriminabilidade e representabilidade dos ambientes para os caracteres nas cultivares de trigo avaliadas. a) altura (ALT); b) peso de mil sementes (PMS), c) peso do hectolitro (PH, kg hL⁻¹); d) produção de grãos (PROD, kg ha⁻¹); e) IPPH.



Fonte: Do autor (2024)

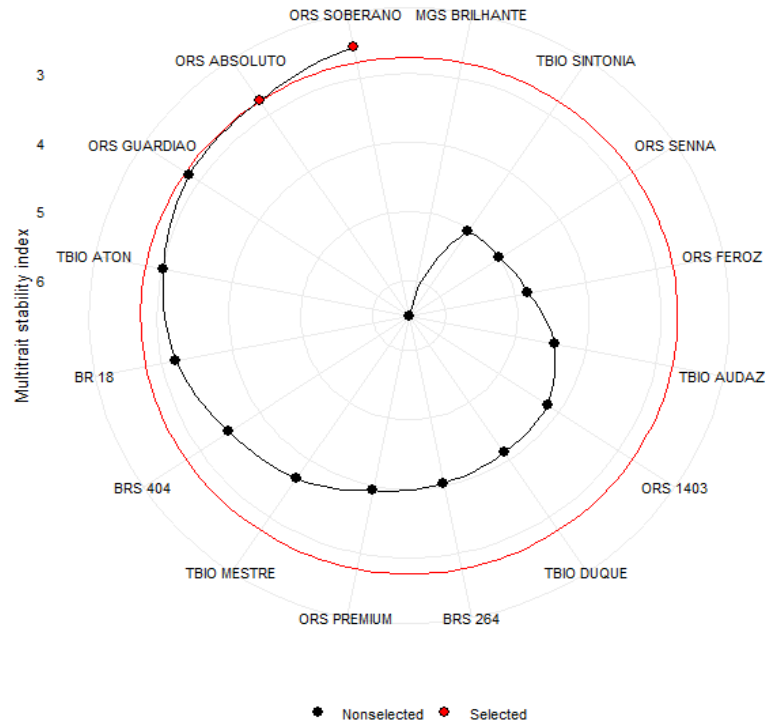
As cultivares que apresentaram as piores médias foram, por exemplo TBIO Sintonia ou TBIO Duque para PH (Figura 5c) e MGS Brilhante para PROD (Figura 5d). A representação dos ambientes com maior capacidade de discriminar uma cultivar e representar melhor os diferentes ambientes, está ilustrada na Figura 6. O comprimento da linha que se estende da origem do gráfico até o ponto correspondente é utilizado para discriminar o ambiente, sendo que ambientes mais distantes da origem da reta são os mais apropriados para testar as cultivares e aqueles ambientes com menor ângulo com respeito à origem são os mais representativos (YAN *et al.*, 2007).

O estudo mostrou que os ambientes mais discriminativos e representativos, simultaneamente, para as características de altura de planta, PMS e PH foram Itirapuã (2023), Lavras (2022) e São Gonçalo do Sapucaí (2022) respectivamente (Figura 6a, Figura 6b e Figura 6c). Por outro lado, encontrou-se também uma correlação negativa para os ambientes de Lambari e São Gonçalo do Sapucaí para PH. Para características de produção (PROD e IPPH) foi identificado Itutinga (2023) como aquele ambiente simultaneamente mais discriminativo e representativo (Figura 6d, Figura 6e).

O índice de estabilidade multicaracterística, aplicado a uma intensidade de seleção de 15%, mostrou que as cultivares mais estáveis foram ORS Soberano e a ORS Absoluto. Este índice avalia não apenas a estabilidade das cultivares em relação a uma única característica, mas sim, considera múltiplos caracteres simultaneamente, proporcionando uma visão mais abrangente do desempenho das variedades em diferentes condições. A seleção de uma intensidade de 15% indica um equilíbrio entre a estabilidade e a produtividade, buscando cultivares que apresentem um bom desempenho médio em conjunto com uma baixa variabilidade entre ambientes (OLIVOTO *et al.*, 2019).

Identificou-se a ORS Soberano e ORS Absoluto como as cultivares mais estáveis, devido a seu baixo valor de MTSI (entre 3 e 4). Isto ressalta sua capacidade de manter um desempenho consistente em uma ampla gama de condições de cultivo, o que pode ser altamente benéfico para os agricultores que buscam minimizar os riscos e maximizar a produção em diferentes contextos agrícolas (OLIVOTO *et al.*, 2019).

Figura 7 – Gráfico de radar do índice de estabilidade multicaracterística (MTSI) descrito por Olivoto *et al.* (2019) para as 16 cultivares de trigo avaliadas nos anos 2022 e 2023 em cinco locais a uma intensidade de seleção de 15%.



Fonte: Do autor (2024)

5. CONCLUSÕES

A avaliação da adaptabilidade e estabilidade agronômica de cultivares de trigo nas mesorregiões do Campo das Vertentes e Sul/Sudoeste de Minas Gerais demonstrou a existência de cultivares com ampla estabilidade e adequada performance segundo o índice de estabilidade multicaracterística (MTSI), como a ORS Soberano e ORS Absoluto.

A interação G x A foi principalmente atribuída à interação das cultivares com os locais do que com os anos agrícolas avaliados, demonstrando a importância de escolher adequadamente locais para representar as mesorregiões Campo das Vertentes e Sul/Sudoeste de Minas com foco na recomendação de cultivares para estes ambientes.

A identificação de mega-ambientes com base nas cultivares vencedoras para características de PROD e IPPH destaca a diversidade de condições macroambientais de cultivo presentes nas mesorregiões estudadas. No caso, encontrou-se um mega-ambiente para as características de altura de planta, PMS e PH. O ambiente simultaneamente mais representativo e discriminativo foi Itutinga, especialmente nas condições do ano 2023, com base nas características PROD e IPPH.

REFERÊNCIAS

- ALLARD, W.; BRADSHAW, A. Implications of Genotype-Environmental Interactions in Applied Plant Breeding. **Crop science**, v. 4, n. 5, p. 503-508, 1964.
- ALWALA, S., *et al.* A comprehensive comparison between Eberhart and Russell joint regression and GGE biplot analyses to identify stable and high yielding maize hybrids. **Field Crops Research**, v. 119, p. 225-230, 2010.
- ANDRADE, M. *et al.* Accounting for spatial trends to increase the selection efficiency in potato breeding. *Crop Science*, v. 60, p. 2354 – 2372, 2020.
- ANNICCHIARICO, P. Cultivar adaptation and recommendation from alfalfa trials in Northern Italy. *Journal of Genetics and Plant Breeding*, v. 46, p. 269-78, 1992.
- BATES, D., *et al.* Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, v. 67, n. 1, p. 1-48, 2015.
- BHANU, A. N.; ARUN, B.; MISHRA, V. K. Genetic Variability, Heritability and Correlation Study of Physiological and Yield Traits in Relation to Heat Tolerance in Wheat (*Triticum aestivum* L.). **Biomedical Journal of Scientific & Technical Research**, v. 2, n. 1, 2018.
- BHULLAR, N. K.; MACKAY, M.; KELLER, B. Genetic Diversity of the Pm3 Powdery Mildew Resistance Alleles in Wheat Gene Bank Accessions as Assessed by Molecular Markers. **Diversity**, v. 2, n. 5, p. 768–786, 2010.
- BORÉM, A.; SCHEEREN, P. L. **Trigo: do plantio à colheita**. 1º Ed. UFV, 260 p. 2015.
- BORNHOFEN, E. *et al.* Wheat yield improvements in Brazil: Roles of genetics and environment. **Crop Science**, v. 58, n. 3, p. 1082–1093, 2018.
- BUTLER, D. G. *et al.* ASReml-R reference manual. **The State of Queensland, Department of Primary Industries and Fisheries, Brisbane**, 2009.
- CAIERÃO, E. *et al.* Origem, evolução e melhoramento genético. In: De Mori *et al.* (eds.) **Trigo: o produtor pergunta, a EMBRAPA responde**. Brasília: Embrapa, p. 15–29, 2016.
- CAMARGO, C.E. *et al.* Melhoramento do trigo: XV. Produtividade e outras características agronômicas de novas linhagens para o Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 46, p. 105–120, 1987.
- CAMPONOGARA, A. *et al.* O atual contexto da produção de trigo no Rio Grande do Sul. **Revista eletrônica em gestão, educação e tecnologia ambiental**, p. 246–257, 2015.
- CANZIANI, J. R.; GUIMARÃES, V. A. O trigo no Brasil e no mundo: cadeia de produção, transformação e comercialização. In: CUNHA, G. R. (Org.). Oficina sobre trigo no Brasil: bases para a construção de uma nova triticultura. **Passo Fundo: Embrapa Trigo**, p. 77 29-72, 2009.

CASAGRANDE, C. *et al.* Envirotypes applied to evaluate the adaptability and stability of wheat genotypes in the tropical region in Brazil. **Euphytica**, v. 220, n. 27, p. 1-30, 2024.

CHAGAS, J. *et al.* **Informações fitotécnicas das cultivares de trigo BRS 254, BRS 264 e BRS 394 para o sistema irrigado do Cerrado do Brasil Central.** Passo Fundo: Embrapa Trigo, p. 37, 2020.

CHU, J. *et al.* Suitability of Single-Nucleotide Polymorphism Arrays Versus Genotyping-By-Sequencing for Genebank Genomics in Wheat. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, n. February, p. 1–12, 2020.

Centro Internacional de Melhoramento de Milho e Trigo (CIMMYT). **Recursos Genéticos.** Disponível em: <https://www.cimmyt.org/es/nuestro-trabajo/recursos-geneticos/>. Acesso em: 30 jun. 2023.

CONAB. **A Cultura do Trigo.** Brasília: Conab, 2017.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Análise Mensal Trigo novembro de 2023.** Disponível em: <https://www.conab.gov.br/> Acesso em: 28 de dezembro de 2023.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Série histórica das safras do 2024.** Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras> Acesso em: 12 de março 2024.

CONDÉ, A. *et al.* Adaptabilidade e estabilidade de genótipos de trigo sob cultivo de sequeiro em Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40, n. 1, p. 45-52, 2010.

CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S.; REGAZZI, A. J. **Modelos Biométricos Aplicados ao Melhoramento Genético - Vol 2 - 3ª Edição.** Viçosa, MG: Editora UFV, 2014.

DELGADO, I. *et al.* Genotype by environment interaction and adaptability of photoperiod-sensitive biomass sorghum hybrids. **Plant Breeding** , v. 78, n. 4, p.509-521, 2019.

DUARTE, J. B.; VENCOVSKY, R. **Interação genótipos x ambientes: uma introdução à análise“AMMI”.** Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, p 60, 1999.

DUARTE, J. B.; VENCOVSKY, R. Spatial statistical analysis and selection of genotypes in plant breeding. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 2, p. 107-114, 2005.

EL-SODA, M. *et al.* Genotype × environment interaction QTL mapping in plants: Lessons from Arabidopsis. **Trends in Plant Science**, v. 19, n. 6, p. 390–398, 2014.

Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG). **EPAMIG avalia onze novas cultivares de trigo para o Sul de Minas.** 2020. Disponível em: <https://epamig.wordpress.com/2020/07/30/epamig-avalia-onze-novas-cultivares-de-trigo-para-o-sul-de-minas/>. Acesso em: 29 de junho 2022.

EEUWIJK, F. *et al.* What Should Students in Plant Breeding Know About the Statistical Aspects of Genotype x Environment Interactions? **Crop Science**, v. 56, p. 2119 - 2140, 2016.

IGNACZAK J.; ANDRADE D. Correção do rendimento de grãos de trigo pelo peso do hectolitro. **Pesq. agropec. Bras**, v. 17, n. 3, p. 361-369, 1982.

FAO.FAOSTAT: **Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 06 de março 2024.

FARIAS, A. R. *et al.* Dinâmica Espacial da Cultura do Trigo no Brasil no período de 1990 a 2014. **Documentos / Embrapa Gestão Territorial**, p. 29, 2017.

FERREIRA, E. *et al.* ExpDes.pt: Experimental Designs package (Portuguese). **R package version 1.1.2**. 2013.

FOX, J., WEISBERG, S. An {R} Companion to Applied Regression, Third Edition. Thousand Oaks CA: Sage. Disponível em: <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>. Acesso em: 8 agosto de 2022.

FURLAN, F. J. F. **Caracterização agronômica e qualidade industrial da farinha de linhagens melhoradas de trigo para a região dos campos gerais**. 2018. 103 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2018.

GASQUES, J. G. *et al.* **Brasil projeções do agronegócio 2018/2019 a 2028/2029**. 10 ed. Brasília: Mapa, p. 124. 2019.

GLAZ, B.; KANG, M. S. Location contributions determined via GGE biplot analysis of multi-environment sugarcane genotype-performance trials. **Crop Science**, Madison, v. 48, n. 3, p. 941-950, 2008.

GILMOUR, A. R.; CULLIS, B. R.; VERBYLA, A. P. Accounting for natural and extraneous variation in the analysis of field experiments. **J Agric Biol Environ Stat**, v. 2, n. 3, p. 269-293, 1997.

GLEESON, A. C.; CULLIS, B. R. Residual Maximum Likelihood (REML) Estimation of a Neighbour Model for Field Experiments. **Biometrics**, v. 43, n. 2, p. 277-287, 1987.

KUZNETSOVA, A., BROCKHOFF PB, CHRISTENSEN RHB. “lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models.” **Journal of Statistical Software**, v. 82, n. 13, p. 1-26. 2017.

MACEDO, J. *et al.* **Desempenho de cultivares de trigo na região do cerrado mineiro**. Minas Gerais, 2021. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1143591/1/Desempenho-de-cultivares.pdf>. Acesso em: 4 dezembro 2022.

- MACHADO, C. *et al.* Selection of tropical wheat lines based on classical and modern parameters of adaptability and stability. **Bulgarian Journal of Agricultural Science**, v. 27, n. 5, p. 933–941, 2021.
- MARCHIORO, V.S. *et al.* CD 117: nova cultivar de trigo de ampla adaptação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 4, p. 424–426, 2009.
- MOHAMED, N. E. M. Genotype by environment interactions for grain yield in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). **Journal of Plant Breeding and Crop Science**, v. 5, p. 150-157, 2013.
- MÖHRING, J., PIEPHO, P. Comparison of weighting in two-stage analyses of series of experiments. **Crop Science**, v. 49, p. 1977–1988, 2009.
- MORI, C. *et al.* **O produtor pergunta, a EMBRAPA responde**. Brasília: Embrapa, 2016.
- MUNARO, L. B. *et al.* Brazilian spring wheat homogeneous adaptation regions can be dissected in major megaenvironments. **Crop Science**, v. 54, p. 1374-1383, 2014.
- NARDINO, M. *et al.* Understanding drought response mechanisms in wheat and multi-trait selection. **PloS One**, v. 17, e0266368. 2022.
- NARDINO, M. *et al.* Meta-analysis of the experimental coefficient of variation in wheat using the Bayesian and Frequentist approaches. **Scientia Agricola**, v. 80, e20210190, 2023.
- OLIVOTO, T. *et al.* Mean Performance and Stability in Multi-Environment Trials II: Selection Based on Multiple Traits. *Agronomy Journal*, v. 3, p. 2961 – 2969, 2019.
- OLIVOTO, T., LÚCIO, A.D. Metan: an R package for multi-environment trial analysis. *Methods Ecol Evol*. v. 11, p. 783-789, 2020.
- PASINATO, A. *et al.* Potential area and limitations for the expansion of rainfed wheat in the Cerrado biome of Central Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 7, p. 779–790, jul. 2018.
- PIEPHO, H. P., ECKL, T. Analysis of series of variety trials with perennial crops. **Grass and Forage Science**, v. 69, p. 431-440, 2014.
- R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. 2020.
- RAFFO, M. *et al.* Genomic prediction for grain yield and micro-environmental sensitivity in winter wheat. **Front. Plant Sci.**, v. 13, p. 1 – 15, 2023.
- RAMALHO, M. A. P. *et al.* **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas**. Lavras, MG: Editora UFLA, 2012.

- RAMALHO, M. A. P.; CARVALHO, B. L.; NUNES, J. A. R. Perspectives for the Use of Quantitative Genetics in Breeding of Autogamous Plants. **ISRN Genetics**, v. 2013, p. 1–6, 2013.
- RAMBURAN, S.; *et al.* Interpretation of genotype x environment interactions of sugarcane: identifying significant environmental factors. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 124, n. 3, p. 392-399, 2011.
- RESENDE, M. D. V. de. **Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético**. Colombo: Embrapa Florestas, 362p. 2007.
- RESENDE, M.D.V., DUARTE, J.B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 3, p. 182-194, 2007.
- RODRÍGUEZ-ÁLVAREZ, M. X. *et al.* Correcting for spatial heterogeneity in plant breeding experiments with P-splines. **Spatial Statistics**, v. 23, p. 52–71, 2018.
- ROSA, É. S. **Acompanhamento das Etapas do Melhoramento de Trigo na Biotrigo Genética**. Orientador: Renata Pereira da Cruz. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação Engenharia Agrônoma) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- SANDHU, S. K. *et al.* GGE Biplot analysis for cane and sugar yield from advanced- stage sugarcane trials in subtropical India. **Journal of Crop Improvement**, London, v. 28, n. 5, p. 641-659, 2014.
- SINGH, C. *et al.* Genotype x environment interaction analysis of multi-environment wheat trials in India using AMMI and GGE biplot models. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 19, n. 3, p. 309–318, set. 2019.
- SILVA, D. B. *et al.* Trigo para o abastecimento familiar: do plantio à mesa. Brasília, DF: Embrapa-SPI; Planaltina: Embrapa-CPAC, 176, 1996.
- SOUSA, C.N.A.; *et al.* Criação de cultivares de trigo no Centro Nacional de Pesquisa de Trigo - Período de 1986 a 1990. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, p. 553–563, 1998.
- SOUZA, C.N.A.; CAIERÃO, E. **Cultivares de Trigo indicadas para cultivo no Brasil e Instituições criadoras 1922 a 2014**. EMBRAPA TRIGO. p. 202, 2014.
- STUDNICKI, M. *et al.* Consistency of Yield Ranking and Adaptability Patterns of Winter Wheat Cultivars between Multi-Environmental Trials and Farmer Surveys. **Agronomy**, 9(5), 245, 2019.
- TEIXEIRA, C.H. *et al.* Performance of potential parents for a rainfed tropical wheat breeding program. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 23, n. 3, e45452336, 2023.
- TERASAWA JR. F.; VENCOVSKY, R.; KOEHLER, H. Environment and genotype environment interaction in maize breeding in Paraná, Brazil. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 8, p. 17-22, 2008.

THIBAU, C. E. **A cultura do trigo e sua importância para Minas Gerais**. Belo Horizonte: Departamento de Produção Vegetal/Secretaria da Agricultura, Indústria, Comércio e Trabalho, 39p, 1950.

THIND, H. *et al.* Rice–wheat productivity and profitability with residue, tillage and green manure management. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 113, p. 113-125, 2019.

TRINDADE, J. A. DE S. **Avaliação da eficiência na produção de trigo no Brasil: aplicação da análise envoltória de dados**. Dissertação (Mestrado em Ciências Contábeis) - Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

WOYANN, L. G. *et al.* Selection of high-yielding, adapted and stable wheat lines in preliminary trials. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 19, n. 4, p. 412–419, 2019.

YAN, W; *et al.* Crop Breeding, Genetics & Cytology. **Crop Science**, v. 40, p. 597 – 605, 2000.

YAN, W., TINKER, N. Biplot analysis of multi-environment trial data: principles and applications. **Canadian Journal Plant Science**. v. 86, p. 623-645, 2006.

YAN, W. *et al.* GGE Biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. **Crop Science**, v. 47, n. 2, p. 653, 2007.

YAN, W. Crop Variety Trials: Data Management and Analysis. **Crop Science**, v. 54, p. 2910 – 2911, 2014.