

Métodos estatísticos para estudo de adaptabilidade e estabilidade em trigo

Statistical methods to study adaptability and stability of wheat genotypes

Elesandro Bornhofen¹, Giovani Benin^{1*}, Lindolfo Storck¹, Leomar Guilherme Woyann¹, Thiago Duarte¹, Matheus Giovane Stoco¹, Sergio Volmir Marchioro²

1. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Pato Branco (PR), Brasil.

2. Coodetec Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola - Cascavel (PR), Brasil.

RESUMO: A sensibilidade às variações ambientais observada na cultura do trigo implica na interação genótipo (G) × ambiente (A) (IGA) significativa. Objetivamos com o presente estudo comparar metodologias estatísticas para a análise da adaptabilidade e estabilidade de genótipos de trigo em ensaios de valor de cultivo e uso (VCU). Foram utilizados dados de desempenho produtivo de 22 genótipos de trigo avaliados em 3 locais (Guarapuava, Cascavel e Abelardo Luz), nas safras agrícolas de 2012 e 2013. Em cada ensaio, foi empregado o delineamento de blocos completos casualizados, com 3 repetições. Na avaliação da IGA, foram utilizadas metodologias baseadas em modelos mistos, análise de variância, regressão linear, análises multivariadas e não paramétricas. Para verificar semelhanças na seleção dos genótipos pelas diferentes metodologias, utilizou-se o coeficiente de correlação de postos de Spearman. As metodologias Annicchiarico, Lin e Binns modificada, bem como a média harmônica dos valores genéticos (MHVG) permitem identificar genótipos estáveis e, ao mesmo tempo, mais produtivos. A magnitude do rendimento de grãos não é associada às estimativas de estabilidade de Wricke, de Eberhart e Russell, escores do primeiro componente principal do método AMMI1 e a estabilidade pela análise GGE biplot, indicando que genótipos estáveis não necessariamente são mais produtivos. Para os dados analisados neste estudo, os métodos AMMI1 e GGE biplot mostraram-se equivalentes em relação ao ordenamento dos genótipos pela estabilidade e adaptabilidade.

Palavras-chave: *Triticum aestivum* L., métodos univariados e multivariados, correlação de postos, rendimento de grãos, ensaios multiambiente.

ABSTRACT: The sensitivity of wheat crop to environmental variations frequently results in significant genotype (G) × environment (E) interaction (GEI). We compared statistical methods to analyze adaptability and stability of wheat genotypes in value for cultivation and use (VCU) trials. We used yield performance data of 22 wheat genotypes evaluated in three locations (Guarapuava, Cascavel, and Abelardo Luz) in 2012 and 2013. Each trial consisted of a complete randomized block design with three replications. The GEI was evaluated using methodologies based on mixed models, analysis of variance, linear regression, multivariate, and nonparametric analysis. The Spearman's rank correlation coefficient was used to verify similarities in the genotype selection process by different methodologies. The Annicchiarico, Lin and Binns modified methodologies, as well as the Harmonic Mean of the Genetic Values (HMGV) allowed to identify simultaneously highly stable and productive genotypes. The grain yield is not associated with Wricke, Eberhart and Russell stability parameters, scores of the first principal component of the AMMI1 method, and GGE biplot stability, indicating that stable genotypes are not always more productive. The data analyzed in this study showed that the AMMI1 and GGE biplot methods are equivalent to rank genotypes for stability and adaptability.

Key words: *Triticum aestivum* L., univariate and multivariate methods, rank correlation, grain yield, multi-environment trials.

*Autor correspondente: benin@utfpr.edu.br

Recebido: 17 Nov. 2015 – Aceito: 7 Mar. 2016

INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum* L.) pode ser cultivado em uma vasta região do Brasil e se destaca principalmente na Região Sul e regiões de menor latitude com maior altitude. Nessas regiões produtoras, a variabilidade ambiental é ampla. 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 (Condé et al. 2010; De Vita et al. 2010). Essa flutuação é resultado do componente ambiental e refere-se à interação genótipo (G) × ambiente (A) (IGA).

A presença de IGA 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), reduzindo o progresso genético devido à seleção. 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). Por outro lado, a presença de IGA é passível de ser explorada, e a identificação de genótipos adaptados a ambientes específicos pode constituir oportunidades.

Duas são as formas de se contornar a presença de IGA. 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 (Mohammadi et al. 2007; Munaro et al. 2014). A segunda estratégia remete à seleção de genótipos com alta estabilidade entre os ambientes (Eberhart e Russell 1966). Na literatura, os diferentes níveis de associação entre metodologias avaliadoras da adaptabilidade e estabilidade indicam que mais de uma metodologia deve ser utilizada para a previsão confiável do desempenho genotípico (Silva e Duarte 2006; Roostaei et al. 2014). A depender do conjunto de dados, os métodos mais indicados para a avaliação da IGA podem mudar.

Inúmeros métodos têm sido propostos para estimar parâmetros de adaptabilidade e estabilidade em ensaios multiambiente. Esses métodos utilizam conceitos de modelos paramétricos univariados (Eberhart e Russell 1966; Wricke 1965), multivariados (Zobel et al. 1988; Yan 2001), mistos

(Resende 2006) e não paramétricos (Lin e Binns 1988). A capacidade de explicar a soma de quadrados da IGA é, principalmente, o que fomenta as diferenças entre os métodos existentes.

Estudos de comparações de métodos para avaliar parâmetros de adaptabilidade e estabilidade em trigo são escassos e não há consenso quanto aos procedimentos mais adequados a serem utilizados (Mohammadi et al. 2010; Tadege et al. 2014). Há a necessidade de se proceder a estudos comparativos com métodos tradicionais e modelos estatísticos recentes, viabilizando a indicação de metodologias que aumentem a acurácia no processo de seleção de genótipos de trigo, implicando ganho genético superior.

Diante disso, da diversidade de modelos para estudo da IGA e da importância desse fenômeno para a triticultura, o objetivo deste estudo foi comparar diferentes metodologias de estimação da adaptabilidade e estabilidade.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram usados os dados de rendimento de grãos de trigo de experimentos conduzidos em 3 locais: Abelardo Luz (SC), Cascavel (PR) e Guarapuava (PR) durante 2 anos consecutivos (2012 e 2013). Dados referentes aos ambientes estão apresentados na Figura 1. Para efeito de análise e

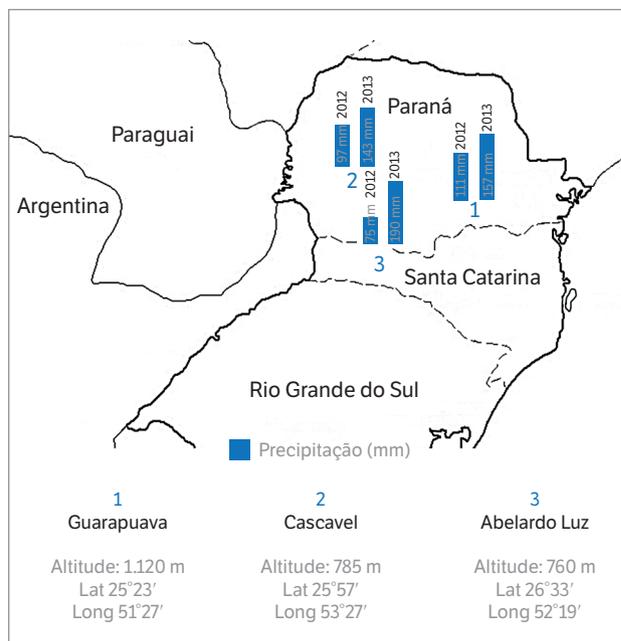


Figura 1. Identificação dos ambientes de testes de genótipos de trigo, incluindo posição geográfica e precipitação média mensal durante o crescimento e desenvolvimento da cultura nos 2 anos de experimentação (2012 e 2013).

interpretação, cada local, em cada ano, foi considerado um ambiente, totalizando 6 ambientes de teste. Os ambientes de cultivo foram assim denominados: Guarapuava — 2012 (A1) e 2013 (A2); Cascavel — 2012 (A3) e 2013 (A4); Abelardo Luz — 2012 (A5) e 2013 (A6).

Foram avaliados 22 genótipos, incluindo linhagens e cultivares comerciais de trigo (codificados de G1 a G22), avaliados em ensaios de valor de cultivo e uso (VCU), sendo eles: BRS Guamirim (G1); CD 0940 (G2); CD 105 (G3); CD 114 (G4); CD 117 (G5); CD 119 (G6); CD 120 (G7); CD 121 (G8); CD 122 (G9); CD 123 (G10); CD 124 (G11); CD 12860 (G12); CD 12862 (G13); CD 12864 (G14); CD 12880 (G15); CD 12882 (G16); CD 12884 (G17); CD 1440 (G18); CD 1550 (G19); Fundacep Raízes (G20); Mirante (G21) e Quartzó (G22). O delineamento experimental foi de blocos completos casualizados, com 3 repetições. Cada unidade experimental foi composta por 6 linhas de 5 m de comprimento, espaçadas em 0,20 m (1,2 m × 5 m). A densidade de semeadura foi de 360 sementes·m⁻² e os tratamentos culturais empregados seguiram as indicações técnicas para a cultura do trigo. As estimativas de rendimento de grãos (RG), em kg·ha⁻¹, foram obtidas pela conversão da massa de grãos colhida por unidade experimental para 1 ha, com correção da umidade para 13% (base úmida).

Foi realizada a análise de variância para cada ambiente e no conjunto. A significância dos efeitos de G, A e da IGA foram determinadas pelo teste F. Os pressupostos da ANOVA foram testados por meio do *software* Genes (Cruz 2013). Verificou-se a homogeneidade das variâncias residuais (QMR) de acordo com Cruz et al. (2004), onde a razão entre o maior e o menor quadrado médio residual foi inferior a 7. Em adição, foi confirmado que os resíduos do modelo da ANOVA seguem distribuição normal pelo teste de Lilliefors. A acurácia seletiva foi calculada conforme descrito em Resende e Duarte (2007).

Para a avaliação da adaptabilidade e estabilidade dos 22 genótipos de trigo, foram aplicados os seguintes métodos: Wricke (1965) (WR); Eberhart e Russell (1966) (E-R); efeitos principais aditivos e interação multiplicativa — AMMI (Zobel et al. 1988). No método AMMI, foram utilizados, como medida de estabilidade, os escores do primeiro componente principal (IPCA1) de cada genótipo. A magnitude desses escores reflete a contribuição para a interação (IGA). Quanto menores os escores, em valores absolutos de IPCA1, mais estável é o genótipo. Também foram usados os métodos de Annicchiarico (1992) (ANN); Lin e Binns (1988) modificado

por Carneiro (1998)³ (L-B/C) (método descrito em Cruz et al. 2004); modelos mistos — REML/BLUP, modelo 54 (Resende 2006), em que a medida da adaptabilidade e estabilidade simultâneas para cada genótipo foi obtida pela Média Harmônica da Performance Relativa dos Valores Genotípicos (MHPRVG) e a estabilidade dos genótipos pela Média Harmônica dos Valores Genotípicos através dos ambientes (MHVG). Nesse caso, o efeito de ambiente foi considerado como fixo enquanto que o efeito de genótipo foi considerado como sendo aleatório. A análise GGE (Yan et al. 2000) foi baseada na plotagem dos escores associados aos ambientes e genótipos. Quanto maior a projeção do vetor, no sentido perpendicular à reta de médias, menor é a estabilidade do genótipo. Foram utilizados os *softwares* Genes (Cruz 2013), Selegen (Resende 2006) e GGE Biplot (Yan 2001).

Os genótipos foram ordenados quanto à adaptabilidade e estabilidade, conforme o conceito e número de parâmetros de cada método estatístico, tendo sido estimados os coeficientes de correlação de Spearman (r_s) entre os postos de todos os pares das estatísticas de adaptabilidade, estabilidade e do RG (Steel e Torrie 1960). Para verificar a relação entre os métodos, foram estimadas as correlações de Spearman usando-se as médias dos postos dos parâmetros envolvidos com a média do RG. Para isso, na metodologia WR, os genótipos foram inicialmente ordenados pelo RG, em que o genótipo de maior valor recebeu o posto 1, e isso foi realizado até o g-ésimo genótipo. Posteriormente, os genótipos foram classificados quanto à estabilidade. Por fim, foi calculada a média dos postos por genótipo, sendo realizada uma nova ordenação, em que o genótipo de menor valor recebeu o posto 1, e isso foi realizado até o g-ésimo genótipo. No método ANN, foi calculada a média dos postos dos 3 parâmetros (I_i , $I_{i(f)}$ e $I_{i(d)}$). Posteriormente, uma nova ordenação foi efetuada, onde o genótipo com menor valor recebeu o posto 1, e isso foi realizado até o g-ésimo genótipo. De forma semelhante, foi obtido o ranqueamento de genótipos para o método L-B/C. No método E-R, foram atribuídas ordenações crescentes às estimativas genotípicas de cada um dos parâmetros ($\hat{\beta}_{11}$ e $\hat{\sigma}_{di}^2$) e calculada a média dos postos entre essas ordenações, acrescida da ordenação pelo RG; uma nova ordenação foi obtida, de forma semelhante ao descrito para os outros métodos. Esses procedimentos

³ Carneiro, P. C. S. (1998). Novas metodologias de análise da adaptabilidade e estabilidade de comportamento (PhD thesis). Viçosa: Universidade Federal de Viçosa.

estão de acordo com os utilizados por Roostaei et al. (2014) e Domingues et al. (2013). Para a expressão simultânea da adaptabilidade e estabilidade pela metodologia de modelos mistos, utilizou-se a classificação proveniente do parâmetro MHPRVG (Resende 2006). As ordenações dos genótipos pelos métodos AMMI e GGE foram realizadas a partir de arquivo de saída das análises no *software* GGE biplot, onde constam os valores das projeções dos genótipos nos eixos das ordenadas e abscissas, resultando em um ordenamento pela estabilidade e desempenho produtivo. Posteriormente, foi calculada a média dos postos, e uma nova ordenação foi gerada, de maneira similar ao descrito por Alwala et al. (2010).

Cada par de variáveis correlacionadas foi plotada em um gráfico de dispersão. A junção de todos os gráficos resultou nas figuras de correlação, onde as associações significativas ($p < 0,05$) foram destacadas. Para esse procedimento, foi utilizado o *software* Sigmaplot v.11.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A precipitação pluviométrica observada nos 2 anos de cultivo foi divergente para os 3 locais (Figura 1). Guarapuava,

Cascavel e Abelardo Luz tiveram precipitação média mensal em 2012 e 2013 de 111 e 157 mm; 97 e 143 mm; 75 e 190 mm; respectivamente. De acordo com De Vita et al. (2010), correlação de 0,82 ($p < 0,01$) ocorre entre o RG de trigo e a precipitação pluviométrica, indicando alta dependência desse caráter às variações ambientais. Em 2012, a precipitação média mensal foi 42% inferior à observada em 2013. Além disso, os locais contrastam consideravelmente para altitude (760 – 1.120 m), o que implica diferenças acentuadas de temperatura. Esses fatores contribuíram para variação ambiental e consequente ocorrência de IGA significativa ($p \leq 0,05$) (Tabela 1). Essa condição dificulta a seleção de genótipos superiores para todos os ambientes (Hagos e Abay 2013) e requer outros procedimentos estatísticos específicos para auxiliar no processo de seleção de genótipos.

O efeito de ambiente foi responsável pela maior parte da soma de quadrados total (SQ) do RG (79,3%), após a subtração da SQ de blocos e do erro, corroborando outros estudos (De Vita et al. 2010; Hagos e Abay 2013; Roostaei et al. 2014). Os efeitos de genótipos (8,8%) e da IGA (13,0%) representaram uma menor porção da SQ (G + A + IGA). De Vita et al. (2010) relatam que a seleção para genótipos mais produtivos ao longo dos anos contribuiu para a melhoria da estabilidade fenotípica em genótipos modernos de

Tabela 1. Testes estatísticos para os efeitos de genótipos, ambientes e sua interação através de análise paramétrica (ANOVA) para 22 genótipos de trigo avaliados em 6 ambientes.

Análise por ambiente							
Ambiente	QM			CV (%)	Média (kg·ha ⁻¹)	Teste F	\hat{r}_{gg}
	Bloco	Genótipo	Erro				
A1	663.647,9	687.795,3	109.884,6	9,4	3.494,8	6,2**	0,91
A2	209.214,6	647.501,0	221.047,8	9,3	5.125,4	2,9**	0,81
A3	58.146,7	472.827,0	32.628,6	4,6	3.901,7	14,5**	0,96
A4	18.369,9	419.903,6	63.509,4	9,7	2.594,9	6,6**	0,92
A5	621.443,5	390.486,5	218.596,2	12,5	3.744,8	1,8*	0,67
A6	80.566,1	264.646,1	165.997,1	10,3	3.936,9	1,6 ^{ns}	0,61
GL	2	21	42				
Relação maior QMR/menor QMR = 6,77							
Análise conjunta							
	GL	QM	Teste F	% SQ	CV (%)	Média (kg·ha ⁻¹)	\hat{r}_{gg}
Blocos/ambiente	12	275.231,4					
G	21	1.165.200,4	3,4**	8,8 ¹			
A	5	44.013.812,1	159,9**	79,3	9,67	3.799,8	0,84
IGA	105	343.591,8	2,5**	13,0			
Erro	252	135.277,3					

¹Somas de quadrados (SQ) total, em percentagem, restantes após a remoção da soma de quadrados devido a blocos e ao erro; **, Significativo a 1 e 5% pelo teste F; ^{ns}Não significativo. QM= Quadrado médio; CV (%)= Coeficiente de variação; \hat{r}_{gg} = Acurácia seletiva de genótipo; A1= Guarapuava—2012; A2= Guarapuava—2013; A3= Cascavel—2012; A4= Cascavel—2013; A5= Abelardo Luz—2012; A6= Abelardo Luz—2013; GL= Graus de liberdade; G= Genótipo; A= Ambiente; IGA= Interação genótipo × ambiente.

Triticum durum L. Isso implica menor participação da IGA e consequente tendência de constância de desempenho entre os ambientes e anos de cultivo. Porém, por menor que seja, a IGA não pode ser desconsiderada (Condé et al. 2010). A presença de IGA observada neste estudo justifica a necessidade de se conduzirem ensaios nos 3 locais de testes. Também se obteve boa precisão experimental, confirmada pelo baixo coeficiente de variação (9,67%) e elevada acurácia seletiva de genótipo ($\hat{r}_{gg} = 0,84$). A magnitude da acurácia seletiva também demonstra que, nos ambientes de teste, os experimentos foram capazes de discriminar os genótipos, contribuindo para a maior soma de quadrados desse efeito.

O desempenho produtivo dos genótipos testados bem como o ranqueamento em relação aos métodos de avaliação

da estabilidade fenotípica são mostrados na Tabela 2. A partir dos dados presentes nessa tabela, foram computados os coeficientes de correlação de Spearman entre todos os pares de estatísticas. O estudo das correlações entre as estatísticas é de grande importância na definição de qual ou quais metodologias estatísticas deverão ser utilizadas na identificação de genótipos promissores (Scapim et al. 2010; Domingues et al. 2013). Coeficientes de correlação significativos e de elevada magnitude indicam similaridade na classificação dos genótipos. Observa-se que, das 66 associações apresentadas, ocorreu significância em 55% das vezes (Figura 2). O uso de estatísticas com alto grau de associação gera informações redundantes e não contribui para o processo de seleção. Por outro lado, o emprego de estatísticas que



Tabela 2. Ordenamento de 22 genótipos de trigo avaliados em 6 ambientes, constituídos de 3 locais (Guarapuava, Cascavel e Abelardo Luz), durante 2 anos de testes (2012 e 2013), quanto ao rendimento de grãos, e estatísticas de avaliação da adaptabilidade e estabilidade.

G	RG (kg·ha ⁻¹)	Ranque	ω_i	I_i	$I_{i(f)}$	$I_{i(d)}$	$\hat{\sigma}_{di}^2$	P_i	$P_{i(f)}$	$P_{i(d)}$	MHVG	IPCA1	GGE
G1		20	14	20	18	20	12	18	13	20	21	6	8
G2	4.245 a	1	21	15	9	3	17	1	9	1	1	21	21
G3	3.767 b	12	15	13	11	13	14	13	19	7	12	18	18
G4	3.606 b	18	17	19	21	18	18	19	22	14	17	16	17
G5	3.599 b	19	16	18	22	15	16	15	18	13	18	15	13
G6	3.721 b	13	13	16	20	11	15	12	11	10	13	8	1
G7	3.453 b	21	1	14	17	12	8	21	21	19	20	11	11
G8	3.627 b	16	8	12	10	17	3	14	15	15	15	10	10
G9	3.921 a	10	6	5	8	7	2	9	10	9	9	1	3
G10	3.200 c	22	19	22	15	22	21	22	16	22	22	22	22
G11	3.857 a	11	18	17	5	19	20	10	5	17	11	17	15
G12	3.636 b	14	9	11	16	9	6	16	20	12	14	4	7
G13	4.015 a	6	4	4	1	8	9	6	6	6	6	2	4
G14	4.088 a	2	22	10	19	5	19	2	1	5	5	12	16
G15	3.981 a	8	10	7	3	16	13	7	2	11	10	13	12
G16	3.630 b	15	20	21	14	21	22	20	12	21	19	20	20
G17	3.939 a	9	11	6	13	1	4	11	14	4	7	14	14
G18	4.036 a	4	7	3	2	6	1	5	4	8	4	9	9
G19	3.985 a	7	12	8	4	14	11	8	3	16	8	19	19
G20	3.617 b	17	5	9	12	10	5	17	17	18	16	5	5
G21	3.559 b	5	2	2	7	4	10	3	7	3	3	3	2
G22	4.245 a	3	3	1	6	2	7	4	8	2	2	7	6

¹Médias não ligadas pela mesma letra diferem pelo teste de Scott-Knott ($p = 0,05$). G = Genótipo; RG = Rendimento de grãos; Parâmetros avaliadores de adaptabilidade e estabilidade: ω_i = Ecovalência (Wricke 1965); I_i , $I_{i(f)}$ e $I_{i(d)}$ = Annicchiarico (1992) a $\alpha = 0,05$; $\hat{\sigma}_{di}^2$ = Eberhart e Russell (1966); P_i , $P_{i(f)}$ e $P_{i(d)}$ = Lin e Binns (1988) modificado por Carneiro (1998); MHVG = Estabilidade por modelos mistos (REML/BLUP); IPCA1 = Primeiro componente principal da análise AMMI1; GGE = Estabilidade pela análise GGE biplot; i , (f) e (d) = Comportamento frente a ambientes gerais, favoráveis e desfavoráveis, respectivamente.

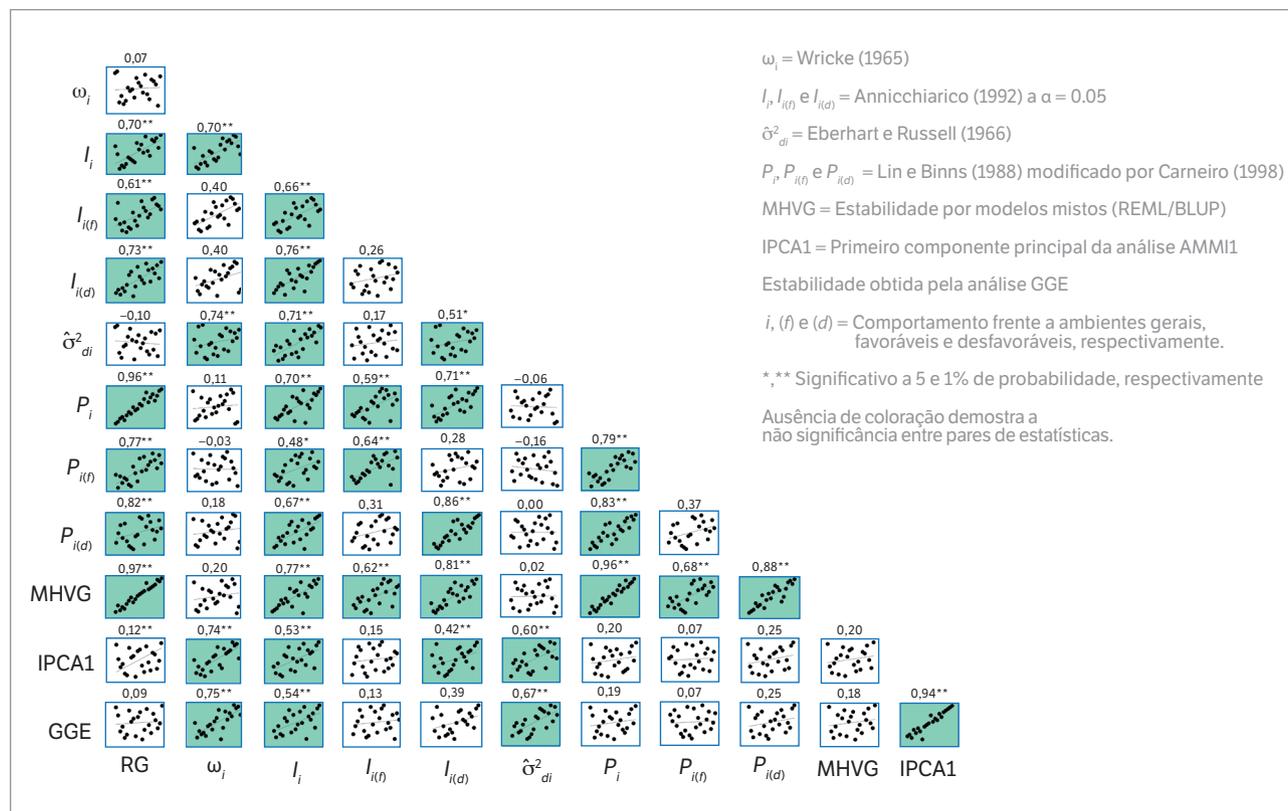


Figura 2. Coeficientes de correlação de Spearman entre os postos de 22 genótipos de trigo obtidos para o rendimento de grãos (RG) e as estatísticas de estabilidade.

se complementam, quando usadas conjuntamente, pode aumentar a confiança na classificação e seleção de cultivares. Ocorreu associação significativa entre o RG e as estatísticas provenientes da metodologia ANN, L-B/C e estabilidade por modelos mistos (MHVG). Isso indica que essas metodologias permitem identificar genótipos estáveis e, ao mesmo tempo, mais produtivos. Em contrapartida, RG não foi associado a ω_i ; $\hat{\sigma}_{di}^2$; IPCA1 e a estabilidade pela análise GGE biplot. Isso indica que genótipos estáveis não são necessariamente mais produtivos, fato também reportado por Franceschi et al. (2010). Metodologias que mensuram desempenho genotípico, integrando RG e estabilidade, são fortemente associadas ao RG, assim como relatado por Flores et al. (1998).

O conceito estático de estabilidade refere-se à constância de desempenho do genótipo através dos ambientes, não respondendo aos estímulos ambientais, ao passo que o conceito dinâmico refere-se à resposta em RG do genótipo paralela à média dos genótipos testados em cada ambiente (Annicchiarico 2002). Observando-se a Figura 2, é possível estabelecer 2 grupos de estatísticas de avaliação da estabilidade. No grupo 1, encontram-se as estatísticas ANN, L-B/C e

MHVG. Por estarem associadas ao RG, essas estatísticas estão relacionadas ao conceito dinâmico de estabilidade. Por outro lado, no grupo 2, estão as estatísticas ω_i ; $\hat{\sigma}_{di}^2$, IPCA1 e GGE biplot. Estas, por sua vez, foram relacionadas ao conceito estático de estabilidade. Entretanto, alguns parâmetros se associaram entre os 2 grupos, de forma contrária ao relato de Mohammadi et al. (2010). É importante destacar a ocorrência de associação da estatística I_i do método ANN com todas as demais estatísticas, com magnitude variando de $r_s = 0,48^*$ a $r_s = 0,77^{**}$.

Foi observada associação entre a estatística ω_i do método WR com IPCA1 ($r_s = 0,74^{**}$) e com os desvios de regressão de E-R ($r_s = 0,74^{**}$). Tadege et al. (2014) relataram associação de $0,98^{**}$ entre o método de WR e desvios de regressão de E-R. Associação entre esses 3 métodos é reportada por Mohammadi et al. (2010), com alta repetibilidade entre grupos de ensaios. Esse cenário ocorreu pois esses parâmetros são indicativos de estabilidade, independentemente do rendimento médio. Genótipos que demonstram esse tipo de estabilidade não necessariamente respondem à melhoria do ambiente, o que não é preferível do ponto de vista agrônomo. Da mesma

forma, a análise AMMI1 promoveu resultados semelhantes aos do método E-R na identificação de genótipos estáveis ($r_s = 0,60^{**}$), corroborando Mendes de Paula et al. (2014).

O método de modelos mistos (MHVG) evidenciou associação com o RG e com os 3 parâmetros de ANN e L-B/C. Essa metodologia é vantajosa por apresentar os resultados na mesma escala de medição do caráter avaliado (Rodvalho et al. 2015) e pode ser utilizada eficientemente para a estimação de adaptabilidade e estabilidade em dados desbalanceados, característicos de ensaios multiambiente de trigo. Também as 3 metodologias foram associadas entre si ($r_s \geq 0,62^{**}$), gerando informações redundantes, o que corrobora Condé et al. (2010). Em cana-de-açúcar, Mendes de Paula et al. (2014) observaram concordância entre as metodologias ANN, L-B e modelos mistos, relatando preferência por esta última. Resultado semelhante é reportado por Silva e Duarte (2006), que sugerem a possibilidade de utilização de um desses métodos combinado com E-R, visando agregar informação. De fato, a possibilidade de se trabalhar com dados desbalanceados é importante, principalmente para ensaios de VCU, nos quais nem todos os genótipos são semeados em todos os locais de avaliação, implicando em desbalanceamento acentuado.

A estatística P_i de L-B/C e MHVG foi altamente associada ao RG, assim como relatado em outros estudos (Pourdad 2011). O índice P_i também é reportado por Mohammadi et al. (2010) como um dos melhores métodos para o ranqueamento de genótipos em ensaios com presença de IGA, pois está associado ao RG e relacionado ao conceito dinâmico de estabilidade. Sabaghnia et al. (2006) também reforçam a preferência por métodos não paramétricos, argumentando a facilidade no uso e interpretação.

A presença de associação significativa e de elevada magnitude entre as estatísticas da estabilidade indica ordenamento similar dos genótipos. Consequentemente, apenas uma das estatísticas pode ser suficiente para selecionar genótipos estáveis em programas de melhoramento (Sabaghnia et al. 2006). Contudo, embora possa ocorrer associação de elevada magnitude, é essencial observar os melhores genótipos em cada método, pois estes podem não ser os mesmos. Por exemplo, apesar de existir associação ($r_s = 0,96^{**}$) entre e MHVG (Figura 2), essas estatísticas não compartilham o mesmo segundo posto do genótipo mais estável (Tabela 2). A existência de associação entre métodos não garante a concordância geral entre eles em relação aos melhores genótipos (Silva e Duarte 2006). Isso confirma a necessidade

da utilização de mais de uma ferramenta na avaliação da adaptabilidade e estabilidade.

Análises de estabilidade e adaptabilidade com apelo gráfico tornaram-se, recentemente, populares no melhoramento de plantas (Figura 3). A análise *which-won-where* (Figura 3a) é uma característica única do GGE biplot, em que o

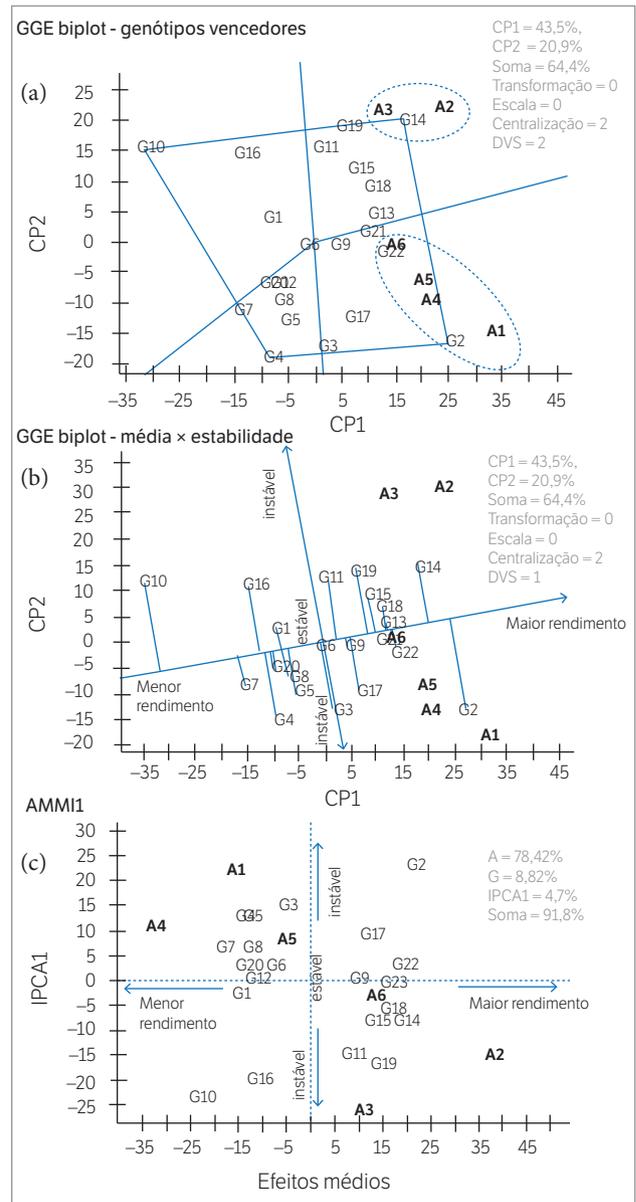


Figura 3. Gráficos biplot representando os escores de genótipos e ambientes da análise GGE quanto à identificação de genótipos vencedores (a) e adaptabilidade e estabilidade (b). Biplot AMMI1 com os escores do primeiro componente principal (IPCA) e o desempenho médio dos genótipos e ambientes (c). G1 a G22 são os códigos referentes aos genótipos e A1 a A6 são os códigos referentes aos ambientes. PC1 e PC2 = primeiro e segundo componentes principais, respectivamente.

de IGA significativa (Alwala et al. 2010). Na análise gráfica de média *versus* estabilidade, pela metodologia GGE biplot (Figura 3b), é possível identificar a magnitude da estabilidade de cada genótipo através do comprimento do vetor perpendicular à seta de única extremidade (Yan e Tinker 2006). Quanto menor esse vetor, mais estável é o comportamento do genótipo. Na análise AMMI1, o eixo das abscissas representa o efeito médio de G e A, enquanto que o eixo das ordenadas infere sobre a estabilidade (escores IPCA1) (Figura 3c). Os resultados mostram que o eixo do primeiro componente principal da interação (IPCA1) explicou mais de 90% da variabilidade dos dados, justificando a escolha do modelo AMMI1.

Quando os métodos estatísticos aplicados não apresentam associação com RG, a seleção de genótipos deve provir da avaliação conjunta dos parâmetros de estabilidade com o desempenho produtivo de cada genótipo. Frente a isso, a Figura 4 ilustra os coeficientes de correlação de Spearman entre 7 metodologias de estudo da IGA; porém, nesse caso, foi obtido um único ranqueamento entre cada método, integrando o efeito do RG. Todos os métodos foram associados entre si, porém com magnitudes de correlação variando de $r_s = 0,50^*$ a $r_s = 0,96^{**}$. Nota-se elevada associação entre o método AMMI e GGE biplot ($r_s = 0,94^{**}$), o que indica relativa redundância de informações em relação ao ordenamento de genótipos pela estabilidade e RG, corroborando Roostaei et al. (2014). A utilização única da análise GGE biplot é questionada, sendo indicada a utilização de modelos mistos (Yang et al. 2009).

Coefficiente de correlação de $r_s = 0,96^{**}$ foi obtido da associação entre MHPRVG e L-B/C. Mendes de Paula et al. (2014) relatam associação elevada entre esses métodos, bem como entre MHPRVG e ANN, ressaltando que o MHPRVG é adequado

para a seleção visando à semeadura em ambientes com diferentes padrões de IGA. Resultados semelhantes são reportados por Rodovalho et al. (2015), que relatam a forte associação entre essas 3 metodologias e salientam a vantagem do método MHPRVG por apresentar resultados na unidade de medida do caráter. Assim, a indicação do método baseado em modelos mistos é justificada, principalmente pelo embasamento em modelos estatísticos que permitem maior acurácia na previsão de valores genotípicos.

Agrônomos e melhoristas normalmente preferem genótipos de alto potencial produtivo, que respondam a ambientes favoráveis e à melhoria do ambiente pela utilização de insumos. Nesse sentido, a identificação de genótipos que atendam a esse conceito é importante. Das metodologias testadas, E-R fornece estimativas da capacidade de resposta dos genótipos à melhoria ambiental por meio dos coeficientes de regressão, podendo ser utilizada em complementariedade a outros métodos. Por não evidenciar associação com o rendimento de grãos (Alwala et al. 2010), é altamente recomendado o seu uso de forma simultânea a outro método. Silva e Duarte (2006) indicam o uso combinado de E-R com AMMI, visando complementariedade de informações. Entretanto, Alwala et al. (2010) relatam a superioridade da análise GGE biplot sobre E-R. Além disso, quando um número elevado de genótipos é analisado, métodos de fácil interpretação como GGE biplot simplificam o processo de seleção.

Muitas vezes, a ocorrência de IGA do tipo complexa conduz a incertezas na seleção de um genótipo; nesse caso, técnicas gráficas de inferência sobre adaptabilidade e estabilidade podem fornecer informações precisas e de fácil entendimento. A identificação de genótipos estáveis e altamente produtivos

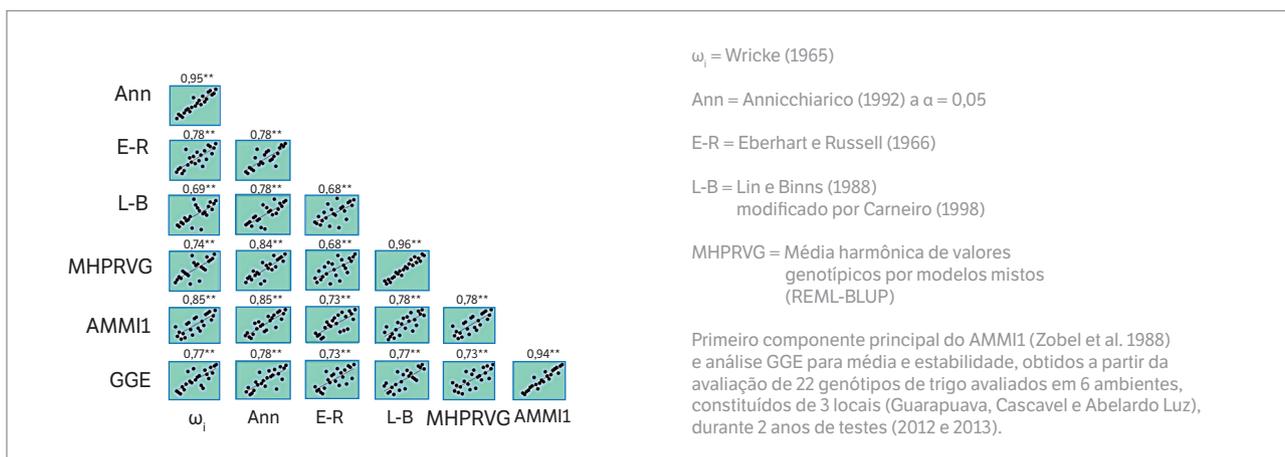


Figura 4. Coeficientes de correlação de Spearman entre os postos médios das metodologias de interpretação da interação genótipo x ambiente, com foco no rendimento e estabilidade.

entre ambientes variados permanece um desafio constante para melhoristas de diversas culturas ao redor do mundo. Também são essenciais os estudos sobre IGA e suas bases, com foco na seleção de parentais estáveis, bem como na determinação de ambientes onde é possível intensificar a pressão de seleção.

CONCLUSÃO

A seleção de genótipos de trigo, em relação à produtividade de grãos, depende do método de análise de adaptabilidade

e estabilidade empregado e também do conjunto de dados (amostra de genótipos e ambientes).

As metodologias de Annicchiarico (1992), Lin e Binns (1988) modificado por Carneiro (1998) e estabilidade estimada pela média harmônica dos valores genotípicos usando-se modelos mistos permitem identificar genótipos estáveis e, ao mesmo tempo, mais produtivos.

Os ranqueamentos de genótipos em relação à estabilidade e adaptabilidade por AMMI e GGE biplot mostraram tendência de redundância entre as metodologias ($r_s = 0,94^{**}$).

REFERÊNCIAS

- Alwala, S., Kwolek, T., McPherson, M., Pellow, J. e Meyer, D. (2010). A comprehensive comparison between Eberhart and Russell joint regression and GGE biplot analyses to identify stable and high yielding maize hybrids. *Field Crops Research*, 119, 225-230. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.010>.
- Annicchiarico, P. (1992). Cultivar adaptation and recommendation from alfalfa trials in Northern Italy. *Journal of Genetics and Breeding*, 46, 269-278.
- Annicchiarico, P. (2002). Genotype × environment interaction: challenges and opportunities for plant breeding and cultivar recommendation. *FAO Plant Production and Protection (Paper No. 174)*. Rome: FAO.
- Condé, A. B. T., Coelho, M. A. O., Yamanaka, C. H. e Corte, H. R. (2010). Adaptabilidade e estabilidade de genótipos de trigo sob cultivo de sequeiro em Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia*, 40, 45-52. <http://dx.doi.org/10.5216/pat.v40i1.5618>.
- Cruz, C. D. (2013). GENES – a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. *Acta Scientiarum*, 35, 271-276. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v35i3.21251>.
- Cruz, C. D., Regazzi, A. J. e Carneiro, P. C. S. (2004). Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. v. 1. 3. ed. Viçosa: Editora da UFV.
- De Vita, P., Mastrangelo, A. M., Matteu, L., Mazzucotelli, E., Virzi, N., Palumbo, M., Lo Storto, M., Rizza, F. e Cattivelli, L. (2010). Genetic improvement effects on yield stability in durum wheat genotypes grown in Italy. *Field Crops Research*, 119, 68-77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2010.06.016>.
- Domingues, L. S., Ribeiro, N. D., Minetto, C., Souza, J. F. e Antunes, I. F. (2013) Metodologias de análise de adaptabilidade e de estabilidade para a identificação de linhagens de feijão promissoras para o cultivo no Rio Grande do Sul. *Semina: Ciências Agrárias*, 34, 1065-1076. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n3p1065>.
- Eberhart, S. A. e Russell, W. A. (1966). Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, 6, 36-40. <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x>.
- Flores, F., Moreno, M. T. e Cubero, J. I. (1998). A comparison of univariate and multivariate methods to analyze G×E interaction. *Field Crops Research*, 56, 271-286. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00095-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00095-6).
- Franceschi, L. D., Benin, G., Marchioro, V. S., Martin, T. N., Silva, R. R. e Silva, C. L. D. (2010). Methods for analysis of adaptability and stability of wheat cultivars for Paraná State, Brazil. *Bragantia*, 69, 797-805. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052010000400004>.
- Hagos, H. G. e Abay, F. (2013). AMMI and GGE biplot analysis of bread wheat genotypes in the northern part of Ethiopia. *Journal of Plant Breeding and Genetics*, 1, 12-18.
- Lin, C. S. e Binns, M. R. (1988). A superiority measure of cultivar performance for cultivar × location data. *Canadian Journal of Plant Science*, 68, 193-198. <http://dx.doi.org/10.4141/cjps88-018>.
- Mendes de Paula, T. O., Marinho, C. D., Souza, V., Barbosa, M. H. P., Peternelli, L. A., Kimbeng, C. A. e Zhou, M. M. (2014) Relationships between methods of variety adaptability and stability in sugarcane. *Genetics and Molecular Research*, 13, 4216-4225. <http://dx.doi.org/10.4238/2014.June.9.7>.

- Mohamed N. E. M. (2013). Genotype by environment interactions for grain yield in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 5, 150-157. <http://dx.doi.org/10.5897/JPBCS2013.0390>.
- Mohammadi, R., Abdulahi, A., Haghparast, R. e Armion, M. (2007). Interpreting genotype x environment interactions for durum wheat grain yields using nonparametric methods. *Euphytica*, 157, 239-251. <http://dx.doi.org/10.1007/s10681-007-9417-3>.
- Mohammadi, R., Roostaei, M., Ansari, Y., Aghaee, M. e Amri, A. (2010). Relationships of phenotypic stability measures for genotypes of three cereal crops. *Canadian Journal of Plant Science*, 90, 819-830. <http://dx.doi.org/10.4141/cjps2011-133>.
- Munaro, L. B., Benin, G., Marchioro, V. S., Franco, F. A., Silva, R. R., Silva, C. L. e Beche, E. (2014). Brazilian spring wheat homogeneous adaptation regions can be dissected in major megaenvironments. *Crop Science*, 54, 1374-1383. <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2013.06.0365>.
- Pourdard, S. S. (2011). Repeatability and relationships among parametric and non-parametric yield stability measures in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes. *Crop Breeding Journal*, 1, 109-118.
- Resende, M. D. V. (2006). O software SELEGEN REML/BLUP. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte. (Embrapa Gado de Corte Documentos).
- Resende, M. D. V. e Duarte, J. B. (2007). Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 37, 182-194.
- Rodvalho, M. A., Coan, M. M. D., Scapim, C. A., Pinto, R. J. B. e Contreras-Soto, R. I. (2015). Comparison of HMRPGV, Lin and Binn's, and Annichiarico's methods for maize hybrid selection for high and stable yield. *Maydica*, 60.1 - M 10.
- Roostaei, M., Mohammadi, R. e Amri, A. (2014). Rank correlation among different statistical models in ranking of winter wheat genotypes. *The Crop Journal*, 2, 154-163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cj.2014.02.002>.
- Sabaghnia, N., Dehghani, H. e Sabaghpour, S. H. (2006). Nonparametric methods for interpreting genotype x environment interaction of lentil genotypes. *Crop Science*, 46, 1100-1106. <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2005.06-0122>.
- Scapim, C. A., Pacheco, C. A. P., Amaral Júnior, A. T., Vieira, R. A., Pinto, R. J. B. e Conrado, T. V. (2010). Correlations between the stability and adaptability statistics of popcorn cultivars. *Euphytica*, 174, 209-218. <http://dx.doi.org/10.1007/s10681-010-0118-y>.
- Silva, W. C. J. e Duarte, J. B. (2006). Métodos estatísticos para estudo de adaptabilidade e estabilidade fenotípica em soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41, 23-30. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2006000100004>.
- Steel, R. G. D. e Torrie, J. H. (1960). *Principles and Procedures of Statistics*. New York: McGraw-Hill.
- Tadege, M. B., Utta, H. Z. e Aga, A. A. (2014). Association of statistical methods used to explore genotype x environment interaction (GEL) and cultivar stability. *African Journal of Agricultural Research*, 9, 2231-2237. <http://dx.doi.org/10.5897/AJAR2013.8366>.
- Wricke, G. (1965). Zur Berechnung der Ökivalenz bei Sommerweizen und Hafer. *Zeitschrift für Pflanzenzüchtung*, 52, 127-138.
- Yan, W. (2001). GGE biplot - a windows application for graphical analysis of multienvironmental trial data and other types of two-way data. *Agronomy Journal*, 93, 1111-1118. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2001.9351111x>.
- Yan, W., Hunt, L. A., Sheng, Q. e Szlavnic, Z. (2000). Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Science*, 40, 597-605. <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2000.403597x>.
- Yan, W. e Tinker, N. A. (2006). Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. *Canadian Journal of Plant Science*, 86, 623-645. <http://dx.doi.org/10.4141/P05-169>.
- Yang, R. C., Crossa, J., Cornelius, P. L. e Burgueño, J. (2009). Biplot analysis of genotype x environment interaction: proceed with caution. *Crop Science*, 49, 1564-1576. <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2008.11.0665>.
- Zobel, R. W., Wright, M. J. e Gauch, H. G. (1988). Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal*, 80, 388-393. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1988.00021962008000030002x>.