

Precisão experimental de ensaios de trigo em regiões homogêneas de adaptação

Giovani Benin⁽¹⁾, Lindolfo Storck⁽¹⁾, Volmir Sérgio Marchioro⁽²⁾, Francisco de Assis Franco⁽²⁾ e Ivan Schuster⁽²⁾

⁽¹⁾Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rodovia PR 469, Km 01, CEP 85501-970 Pato Branco, PR. E-mail: benin@utfpr.edu.br, lindolfstorck@gmail.com ⁽²⁾Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola, BR 467, Km 98, CEP 85813-450 Cascavel, PR. E-mail: volmir@coodetec.com.br, franco@coodetec.com.br, ivan@coodetec.com.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar a adequação de estatísticas de precisão experimental em conjuntos de ensaios de competição de genótipos de trigo (*Triticum aestivum*), realizados em regiões homogêneas de adaptação. As estatísticas herdabilidade, coeficiente de determinação, valor do teste F para genótipo, índice de diferenciação de Fasoulas, acurácia seletiva e coeficiente de repetibilidade foram calculadas a partir de resultados de produtividade de grãos de trigo de 572 ensaios de competição com 25 genótipos, em quatro regiões homogêneas de adaptação, nas safras de 2007 a 2011. Foram estimadas as correlações lineares entre as estatísticas e realizada a análise de trilha. As estatísticas foram agrupadas pelo método hierárquico de Ward. As médias das estatísticas de cada região de adaptação foram comparadas pelo teste t “bootstrap”. As estatísticas acurácia seletiva, coeficiente de determinação, coeficiente de herdabilidade e coeficiente de repetibilidade apresentam relação algébrica e são adequadas para avaliar a precisão experimental de ensaios de competição de trigo em diferentes regiões de adaptação. As regiões utilizadas para avaliação do valor de cultivo e uso do trigo diferem quanto à acurácia seletiva e ao coeficiente de repetibilidade.

Termos para indexação: *Triticum aestivum*, controle de qualidade, planejamento experimental, repetibilidade, seleção e recomendação de cultivares.

Experimental precision of wheat trials in homogeneous adaptation regions

Abstract – The objective of this work was to evaluate the adequacy of measures of the experimental precision degree in trial sets of genotype competition in wheat (*Triticum aestivum*), carried out in homogeneous adaptation regions. The statistics heritability, coefficient of determination, F-test value for genotype, Fasoulas differentiation index, selective accuracy, and repeatability coefficient were calculated from results of wheat grain yield obtained in 572 competition trials with 25 genotypes, in four homogeneous adaptation regions in the crop years from 2007 to 2011. Linear correlations among the statistics were estimated and path analysis was performed. Statistics were grouped using Ward’s hierarchical method. Statistical means from each adaptation region were compared by the t bootstrap test. The statistics selective accuracy, coefficient of determination, coefficient of heritability, and repeatability coefficient are algebraically related and are suitable to evaluate the experimental accuracy of wheat competition trials in different adaptation regions. The regions used for the evaluation of values for cultivation and use of wheat differ in selective accuracy and repeatability coefficient.

Index terms: *Triticum aestivum*, quality control, experimental planning, repeatability, cultivar selection and recommendation.

Introdução

O cultivo de trigo no Brasil é dividido em três regiões tritícolas: Centro, Centro-Sul e Sul do país. Essa divisão leva em consideração características climáticas, cultivares disponíveis e sistemas de produção. Os testes para avaliação de linhagens e recomendação de cultivares são realizados em regiões homogêneas de adaptação, denominadas regiões de valor de cultivo e uso (VCU), delimitadas em: região úmida, fria e alta (VCU 1); região úmida, moderadamente quente e

baixa (VCU 2); região moderadamente seca, quente e baixa (VCU 3); e região seca e quente (VCU 4) (Brasil, 2008).

A interação genótipo x ambiente, que determina diferenças no potencial de rendimento de trigo entre regiões de VCU, é decorrente da adaptação diferencial dos genótipos a variações edafoclimáticas, locais, épocas de semeadura e anos de avaliação (Caierão et al., 2006; Cargnin et al., 2006; Franceschi et al., 2010; Silva et al., 2011; Benin et al., 2012). Erros na identificação da superioridade de um genótipo, em

ensaios de VCU, resultantes da precisão experimental insuficiente dos ensaios ou do uso de medidas de precisão inadequadas, repercutem na produtividade da espécie cultivada, uma vez que os resultados destes ensaios são usados para a inscrição de novas cultivares no Registro Nacional de Cultivares, no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (RNC-Mapa). Os órgãos de assistência técnica também usam estes resultados para a recomendação de cultivares.

O coeficiente de variação (CV) é utilizado para atestar a confiabilidade dos ensaios de VCU, no registro de cultivares junto ao RNC-Mapa. Na cultura do trigo, o CV dos ensaios deve ser inferior ou igual a 20%. Além disso, os ensaios devem ser conduzidos no delineamento de blocos ao acaso, com três ou mais repetições, e devem ser executados em um ou dois locais por região, em cada estado, durante dois ou três anos (Brasil, 2008). O CV está associado à média e à variância residual, e é uma estatística adequada para a classificação da precisão de experimentos com média semelhante (Cargnelutti Filho & Storck, 2007). No entanto, descartar ensaios apenas por terem CV muito alto é um procedimento desaconselhável (Storck et al., 2010), uma vez que esta medida de precisão apresenta propriedades limitadas, que dependem da média e dos outros fatores que interferem nela, como caráter avaliado, região de cultivo e manejo.

Estudos teóricos referentes à acurácia seletiva (AS) e ao valor do teste F para genótipo (Fc), como medidas de precisão experimental (Resende, 2002; Resende & Duarte, 2007), representam avanço na metodologia da qualificação experimental.

As estatísticas AS e Fc, associadas a outras medidas de precisão, aplicadas a grupos de ensaios de milho (Cargnelutti Filho & Storck, 2007, 2009), feijão e soja (Cargnelutti Filho et al., 2009), arroz (Cargnelutti Filho et al., 2012b), e a colheitas anuais e total de cana-de-açúcar (Cargnelutti Filho et al., 2012a) são parâmetros mais adequados à identificação e à seleção de genótipos superiores. Nessas culturas, as estatísticas acurácia seletiva, herdabilidade, coeficiente de determinação e valor do teste F para genótipo são mais adequadas do que o coeficiente de variação e a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey, em percentagem da média, para se avaliar a precisão experimental em ensaios de competição de genótipos. Se isso ocorrer também na cultura do trigo, a norma vigente para o registro de cultivares (Brasil, 2008) pode

estar comprometendo a eficiência com que ensaios são descartados e cultivares são selecionadas.

A precisão experimental, medida pelo coeficiente de variação e pela diferença mínima significativa, foi estudada por Lúcio et al. (1999) em 522 ensaios de competição de genótipos de trigo, executados de 1987 a 1995 no Estado do Rio Grande do Sul. Os autores concluíram que a diversidade de manejos empregados nos ensaios de competição de cultivares prejudica o controle de qualidade experimental. Portanto, a aplicação de planejamentos experimentais específicos por região de adaptação pode ser mais eficiente.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a adequação das estatísticas de precisão experimental em conjuntos de ensaios de competição de genótipos de trigo, realizados em regiões homogêneas de adaptação.

Material e Métodos

Foram usados os dados de produtividade de grãos de trigo (*Triticum aestivum* L.) de 572 ensaios de competição, realizados com 25 genótipos, em 31 locais (os genótipos variaram), nas safras agrícolas de 2007 a 2011, em quatro regiões de valor de cultivo e uso (VCU 1, 2, 3 e 4) (Tabela 1). A rede de ensaio é pertencente ao programa de melhoramento de trigo da Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola (Coodetec), Cascavel, Paraná.

Os ensaios foram conduzidos em delineamento de blocos ao acaso, com três repetições. Cada parcela foi constituída de seis linhas de 5 m de comprimento, com espaçamento entre linhas de 0,20 m, perfazendo área de 6 m². Os tratos culturais foram realizados de acordo com as recomendações técnicas para a cultura (Reunião da Comissão Sul-Brasileira de Pesquisa de Trigo, 2007). Após a colheita, avaliou-se a massa de grãos da parcela e, posteriormente, estimou-se a produtividade de grãos (kg ha⁻¹), corrigida para 13% de umidade.

Inicialmente, foram realizadas as análises de variância para cada um dos ensaios e registradas as seguintes estatísticas: quadrado médio de bloco (QMb), quadrado médio de genótipo (QMg), quadrado médio do erro (QMe), valor do teste F para genótipo ($F_c = QMg/QMe$), média geral do ensaio (\bar{m}), coeficiente de variação [$CV = 100(QMe)^{0.5}/\bar{m}$] e herdabilidade média conforme Cruz (2006): $h^2 = (QMg - QMe)/QMg$.

Em seguida, estimou-se, para cada ensaio, a diferença mínima significativa (DMS) entre as médias de genótipos, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, expresso em porcentagem da média, por meio da expressão: $DMS = 100 q_{\alpha(n; GLe)} (QMe/J)^{0.5}/\hat{m}$, em que: $q_{\alpha(n; GLe)}$ é o valor crítico para o uso do teste de Tukey; n é o número de genótipos; e GLe é o número de graus de liberdade do erro. Determinaram-se, ainda, os valores das estatísticas coeficiente de determinação (R^2), calculada pela expressão $R^2 = QMg/(QMg+QMe)$, e a amplitude das médias (Am) estimada pela diferença entre as médias dos genótipos com maior e menor produtividades. O índice de diferenciação de Fasoulas (IDF) foi estimado pela expressão $IDF = 200 \sum_{i=1}^n m_i/[n(n-1)]$, em que n é o número total de genótipos e m_i é o número de médias que o i -ésimo genótipo supera estatisticamente, após a aplicação do teste de Tukey. Esse índice fornece o percentual de diferenças significativas entre as médias dos genótipos que o teste de comparação múltipla consegue detectar. Também foi estimada a acurácia seletiva (AS) (Resende & Duarte, 2007), por meio das expressões: $AS = (1-1/Fc)^{0.5}$, para $Fc \geq 1$; e $AS = 0$, para $Fc < 1$, em que Fc é o valor do teste F para genótipo.

Para estimar o coeficiente de repetibilidade ($\hat{\rho}$) em cada ensaio, pelo método da análise de variância, as avaliações em cada bloco foram consideradas como medições realizadas no mesmo indivíduo (genótipo).

Tabela 1. Número de ensaios avaliados por região de adaptação de cultivo de trigo (*Triticum aestivum*) e respectivos municípios, no período de 2007 a 2011⁽¹⁾.

Regiões de VCU ⁽²⁾	Nº de ensaios	Municípios
1	124	Campos Novos, Castro, Cruz Alta, Guarapuava, Lagoa Vermelha, Não-Me-Toque e Vacaria
2	215	Abelardo Luz, Cachoeira do Sul, Campo Mourão, Cascavel, Itaberá, Santa Rosa, Santo Augusto, São Luiz Gonzaga e Taquarivaí
3	188	Arapongas, Assis, Dourados, Goioere, Maracaju, Palmital, Palotina, Ponta Porã, Rolândia e Umuarama
4	45	Catalão, Cristalina, Luziânia, Paracatu e São Gotardo
Geral	572	Os 31 municípios relacionados acima

⁽¹⁾Dados do programa de melhoramento de trigo da Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola (Coodetec), Cascavel, PA. ⁽²⁾Regiões de valor de cultivo de uso, regiões homogêneas de adaptação delimitadas em: VCU 1, região úmida, fria e alta; VCU 2, região úmida, moderadamente quente e baixa; VCU 3, região moderadamente seca, quente e baixa; e VCU 4, região seca e quente (Brasil, 2008).

Assim, o coeficiente de repetibilidade foi estimado por meio da expressão: $\hat{\rho} = Vg/(Vg+Ve)$, em que $Vg = (QMg - QMe)/J$ e $Ve = QMe$ (Cruz & Regazzi, 1997).

Em relação às 13 estatísticas obtidas (QMb, QMg, QMe, Fc, \hat{m} , CV, h^2 , DMS, R^2 , Am, IDF, AS e $\hat{\rho}$) para cada um dos 572 ensaios, foram calculados os valores mínimo e máximo, as medidas de tendência central (média e mediana) e a medida de dispersão (CV), tendo-se realizado o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (Sprent & Smeeton, 2007).

Foi realizada análise de correlação linear de Pearson entre as 13 estatísticas, e sua significância foi verificada por meio do teste t de Student, a 5% de probabilidade. A seguir, realizou-se o diagnóstico de multicolinearidade (Cruz & Carneiro, 2003; Cruz, 2006) e a análise de trilha das variáveis principais, candidatas a medidas de precisão experimental dos ensaios (CV, DMS, h^2 , R^2 , Fc, IDF, AS e $\hat{\rho}$) em função das variáveis explicativas (QMb, QMg, QMe, \hat{m} e Am).

Determinou-se a matriz de distância euclidiana média padronizada entre as estatísticas QMb, QMg, QMe, Fc, \hat{m} , CV, h^2 , DMS, R^2 , Am, IDF, AS e $\hat{\rho}$. Essa matriz de distâncias foi utilizada como medida de dissimilaridade para a análise de agrupamento das 13 estatísticas, pelo método hierárquico de Ward (Cruz & Carneiro, 2003; Cruz, 2006). Utilizaram-se os limites das classes de precisão experimental (Resende & Duarte, 2007; Cargnelutti Filho & Storck, 2009) para calcular as frequências simples e relativas dos ensaios, em cada classe e região de adaptação.

As médias obtidas em cada região de adaptação, para as estatísticas \hat{m} , AS, CV, DMS e $\hat{\rho}$, foram comparadas pelo teste t “bootstrap” com 5.000 simulações, a 5% de probabilidade, no aplicativo BioEstat 5.0 (Ayres et al., 2007). As demais análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa Genes (Cruz, 2006).

Resultados e Discussão

Os genótipos diferiram quanto à produtividade de grãos em 92% dos ensaios na região 1, 93% na região 2, 97% na região 3, e 84% na região 4, o que indica que houve discriminação de genótipos (Tabela 2). Em estudos semelhantes com a cultura do milho (Cargnelutti Filho & Storck, 2007; Cargnelutti Filho et al., 2010) e da soja (Storck et al., 2009), os genótipos diferiram quanto à produtividade de grãos em 92, 89 e

80% dos ensaios, respectivamente. O efeito significativo de genótipos não qualifica, necessariamente, os ensaios como precisos. De maneira análoga, a ausência de efeito significativo entre os genótipos não qualifica os ensaios como de baixa precisão, conforme constatações com as culturas de milho (Cargnelutti Filho & Storck, 2007), feijão e soja (Cargnelutti Filho et al., 2009), e arroz (Cargnelutti Filho et al., 2012b). Além da significância do teste F para genótipos, é importante classificar os experimentos por meio de outras medidas de precisão experimental.

Em 36% dos ensaios, houve heterogeneidade entre os blocos, o que indica que, de forma geral, o uso de bloco não deve ser ignorado. No entanto, há casos em que o bloqueamento não é necessário (áreas homogêneas), ou em que os blocos não estão na mesma direção da variação da homogeneidade, na área experimental.

As estimativas de variabilidade existentes ($11,7\% \leq CV \leq 155,8\%$) para as 13 estatísticas, obtidas em cada um dos 572 ensaios, são importantes e conferem maior abrangência às inferências realizadas nos estudos das correlações entre as estatísticas, por incluir cenários extremos (Tabela 2). Entre essas estatísticas, apenas os dados da repetibilidade se ajustaram à distribuição normal ($p > 0,05$), de acordo com o teste de Kolmogorov-Smirnov. Embora a maioria das estatísticas não tenha se ajustado à distribuição

Tabela 2. Estatísticas dos dados de produtividade de grãos de trigo (*Triticum aestivum*) em 572 ensaios de competição de genótipos.

Estatística ⁽¹⁾	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	CV (%)	Valor p ⁽²⁾
QMb	0,00115	8,21248	0,57834	0,26204	155,8	0,000
QMg	0,09369	3,84647	0,78815	0,64294	68,1	0,000
QMe	0,01242	0,96854	0,16940	0,12888	77,1	0,000
\hat{m}	1,469	6,362	3,517	3,390	25,3	0,001
Am	0,642	5,085	1,955	1,826	35,3	0,000
CV (%)	4,5	25,3	11,4	10,8	30,9	0,005
DMS	14,4	80,3	36,0	34,3	30,9	0,006
h^2	0,013	0,990	0,742	0,782	23,0	0,000
R^2	50,3	99,0	80,7	82,1	11,7	0,011
Fc	1,01	96,38	6,02	4,58	98,2	0,000
IDF	0,0	70,3	10,0	7,0	99,8	0,000
AS	0,116	0,995	0,853	0,884	13,9	0,000
$\hat{\rho}$	0,004	0,970	0,530	0,545	36,1	0,329

⁽¹⁾QMb, quadrado médio de bloco; QMg, quadrado médio de genótipo; QMe, quadrado médio do erro; \hat{m} , média geral do ensaio; Am, amplitude das médias; CV, coeficiente de variação; DMS, diferença mínima significativa pelo teste de Tukey, em percentagem da média; h^2 , herdabilidade; R^2 , coeficiente de determinação; Fc, valor do teste F para genótipo; IDF, índice de diferenciação de Fasoulas; AS, acurácia seletiva; $\hat{\rho}$, coeficiente de repetibilidade. ⁽²⁾Valor p do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov.

normal, o elevado número de ensaios (572), aliado à variabilidade das estatísticas (CV e amplitude) entre os ensaios, qualifica esse conjunto de dados para o estudo proposto. Mesmo porque, para o caráter produtividade de grãos, a hipótese da distribuição normal dos erros não foi rejeitada em 88% dos 572 ensaios. Apenas 1,4% dos 572 ensaios tiveram CV maior do que 20%, valor máximo tolerado para que o ensaio possa ser aproveitado para a inscrição de cultivares no RNC.

Quanto à produtividade de grãos, o número de condição da matriz de correlação entre as estatísticas oscilou entre 35 (h^2 , R^2 e AS em função de QMb, QMg, QMe, \hat{m} e Am) e 42 (DMS em função de QMb, QMg, QMe, \hat{m} e Am) (Tabela 3). Portanto, a matriz de correlações foi classificada como de colinearidade baixa, o que permite a realização adequada da análise de trilha (Cruz & Carneiro, 2003; Cruz, 2006). Com isso, os resultados das análises de trilha (Tabela 3), das variáveis principais (CV, DMS, h^2 , R^2 , Fc, IDF, AS e $\hat{\rho}$) em função das variáveis explicativas (QMb, QMg, QMe, \hat{m} e Am), foram estimados de forma adequada.

Foram observadas quatro situações distintas com a análise de trilha. Na primeira, a variável explicativa QMb esteve correlacionada às variáveis principais h^2 , R^2 , Fc, IDF, AS e $\hat{\rho}$ ($p < 0,05$); porém, a magnitude destas correlações foi irrelevante, e a significância obtida foi resultante do grande número de ensaios (570 graus de liberdade). Na segunda, as variáveis principais h^2 , R^2 , Fc, IDF, AS e $\hat{\rho}$ estiveram correlacionadas com as variáveis explicativas QMg e Am; o QMg e a Am tiveram efeito direto, semelhantes em magnitude e sinal, sobre este grupo de variáveis principais; os efeitos indiretos de QMe e Am foram de sinais opostos e se anularam; e os efeitos indiretos de QMg (estatística de significado equivalente à Am) e QMe se anulam. Assim, o QMg, a Am e o QMe foram considerados como variáveis que explicam a variação existente nas estatísticas candidatas a medidas de precisão (h^2 , R^2 , Fc, IDF, AS e $\hat{\rho}$). Na terceira situação, o QMe correlacionou-se com todas as variáveis principais, positivamente com CV e DMS e negativamente com h^2 , R^2 , Fc, IDF, AS e $\hat{\rho}$. Neste caso, QMe teve efeito direto, semelhante em magnitude e sinal, e efeito indireto (via \hat{m}) sobre CV e DMS. Na quarta situação, \hat{m} correlacionou-se negativamente com CV e DMS, com efeito direto do QMe, semelhante em magnitude e sinal, e efeito indireto, de sinal positivo.

Estes resultados mostram que as estatísticas h^2 , R^2 , F_c , IDF, AS e $\hat{\rho}$ estão relacionados diretamente com QMe, QMg e Am e não estão relacionados com \hat{m} e QMb.

De modo geral, os resultados da análise de trilha foram concordantes com os obtidos com a cultura de feijão e soja (Cargnelutti Filho et al., 2009), milho (Cargnelutti Filho & Storck, 2007, 2009), arroz irrigado (Cargnelutti Filho et al., 2012b) e cana-de-açúcar (Cargnelutti Filho et al., 2012a). Os resultados do

presente trabalho fornecem subsídios e são indicativos da necessidade de modificação do critério ($CV < 20\%$) que trata da precisão do ensaio para registro de cultivares de trigo junto ao RNC.

Ao se utilizar o método de Ward, com ponto de corte na faixa de 53% da distância euclidiana média padronizada, houve a formação de quatro grupos de estatísticas, com comportamento similar dentro dos grupos e distinto entre os grupos. O primeiro grupo foi

Tabela 3. Estimativas dos coeficientes de correlação de Pearson e respectivas estimativas dos efeitos diretos e indiretos de variáveis explicativas sobre as variáveis principais em 572 ensaios de competição de genótipos de trigo (*Triticum aestivum*).

Efeito	Variável principal ⁽¹⁾							
	CV	DMS	h^2	R^2	F_c	IDF	AS	$\hat{\rho}$
Quadrado médio de blocos (QMb)								
Direto	0,04	0,04	-0,01	-0,02	-0,05	-0,06	0,00	-0,03
Indireto via QMg	-0,00	-0,00	0,02	0,03	0,04	0,04	0,02	0,03
Indireto via QMe	0,17	0,17	-0,15	-0,14	-0,10	-0,11	-0,14	-0,14
Indireto via \hat{m}	-0,21	-0,20	0,00	-0,01	-0,02	-0,02	0,00	-0,01
Indireto via Am	0,00	0,00	0,03	0,03	0,01	0,02	0,03	0,03
Total (valor de r)	0,01	0,01	-0,10*	-0,12*	-0,11*	-0,14*	-0,09*	-0,13*
Quadrado médio de genótipos (QMg)								
Direto	-0,02	-0,02	0,35	0,41	0,51	0,59	0,31	0,44
Indireto via QMb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Indireto via QMe	0,35	0,35	-0,30	-0,31	-0,20	-0,24	-0,30	-0,30
Indireto via \hat{m}	-0,27	-0,27	-0,01	-0,01	-0,02	-0,03	0,00	-0,01
Indireto via Am	0,05	0,05	0,33	0,33	0,15	0,19	0,32	0,33
Total (valor de r)	0,12*	0,12*	0,37*	0,43*	0,44*	0,50*	0,33*	0,46*
Quadrado médio do erro (QMe)								
Direto	0,92	0,93	-0,79	-0,80	-0,52	-0,64	-0,77	-0,80
Indireto via QMb	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00
Indireto via QMc	-0,01	-0,01	0,13	0,15	0,20	0,22	0,11	0,17
Indireto via \hat{m}	-0,30	-0,30	0,01	-0,01	-0,03	-0,03	0,00	-0,01
Indireto via Am	0,02	0,02	0,13	0,13	0,06	0,08	0,13	0,13
Total (valor de r)	0,64*	0,64*	-0,53*	-0,53*	-0,30*	-0,38*	-0,53*	-0,51*
Média geral do ensaio (\hat{m})								
Direto	-0,73	-0,73	-0,02	-0,03	-0,07	-0,08	0,00	-0,04
Indireto via QMb	0,01	0,01	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	-0,01
Indireto via QMc	-0,01	-0,01	0,12	0,15	0,18	0,21	0,11	0,16
Indireto via QMe	0,38	0,38	-0,33	-0,33	-0,21	-0,26	-0,32	-0,33
Indireto via Am	0,02	0,02	0,14	0,14	0,07	0,08	0,13	0,14
Total (valor de r)	-0,32*	-0,32*	-0,08*	-0,08*	-0,05	-0,06	-0,07*	-0,07*
Amplitude das médias (Am)								
Direto	0,05	0,05	0,36	0,36	0,16	0,21	0,35	0,36
Indireto via QMb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Indireto via QMg	-0,01	-0,02	0,32	0,38	0,47	0,54	0,28	0,41
Indireto via QMe	0,35	0,35	-0,30	-0,30	-0,20	-0,24	-0,29	-0,30
Indireto via \hat{m}	-0,29	-0,29	0,00	-0,01	-0,03	-0,03	0,00	-0,01
Total (valor de r)	0,09*	0,09*	0,38*	0,43*	0,41*	0,47*	0,34*	0,45*
R^2	0,84	0,84	0,70	0,76	0,46	0,65	0,63	0,78
Número de condição	41	42	35	35	36	37	35	36

⁽¹⁾CV, coeficiente de variação; DMS; diferença mínima significativa pelo teste de Tukey, a 5% probabilidade, em percentagem da média; h^2 , herdabilidade; R^2 , coeficiente de determinação; F_c , valor do teste F para genótipo; IDF, índice de diferenciação de Fasoulas; AS, acurácia seletiva; $\hat{\rho}$, coeficiente de repetibilidade. *Significativo pelo teste t, a 5% de probabilidade, com 570 graus de liberdade.

constituído pelas estatísticas CV e DMS; o segundo, por QMe, QMb e \hat{m} ; o terceiro, pelas estatísticas candidatas a medidas de precisão (h^2 , R^2 , AS e $\hat{\rho}$), de comportamento semelhante ao obtido na análise de trilha; e o quarto grupo, pelas estatísticas QMg, Am, Fc e IDF. Há discordância na formação dos grupos obtida com ensaios de soja, feijão (Cargnelutti Filho et al., 2009) e milho (Cargnelutti Filho & Storck, 2009). Entretanto, as estatísticas candidatas à medida de precisão experimental adequadas (h^2 , R^2 , AS e $\hat{\rho}$) e inadequadas (CV e DMS) estiveram sempre nos mesmos grupos. Ou seja, independentemente da espécie cultivada (trigo, milho, soja, feijão, arroz irrigado e cana-de-açúcar), as estatísticas h^2 , R^2 , AS e $\hat{\rho}$ podem ser utilizadas como parâmetros indicativos da qualidade dos ensaios de competição e devem substituir o CV, usado como norma para o registro de cultivares.

Com base nas relações algébricas entre as estatísticas AS e h^2 , R^2 e Fc, Cargnelutti Filho & Storck (2009) adaptaram os limites de classes de precisão experimental para as estatísticas h^2 , R^2 e Fc em função das classes de AS estabelecidas em Resende & Duarte (2007). Ao se utilizar as expressões para estimar h^2 e $\hat{\rho}$ e ao se substituir h^2 por AS^2 , pode-se, também, estabelecer os limites de classe de precisão experimental a partir do coeficiente de repetibilidade ($\hat{\rho}$). Neste caso, a relação entre $\hat{\rho}$ e AS é dada por: $\hat{\rho} = 1/[1 + J(1 - AS^2)/AS^2]$. Os limites de precisão, por meio da estatística $\hat{\rho}$, para $J=3$ e $J=4$ repetições, estão incluídos na Tabela 4. A partir da estimativa de $\hat{\rho}$, é possível estimar o valor de J (repetições) para uma dada AS pré-estabelecida, ou seja: $J = AS^2(1 - \hat{\rho})/(1 - AS^2)$. Para $\hat{\rho}=0,53$ (média de todos os ensaios) e $AS=0,90$, obtém-se

$J=2,8$; e para $AS=0,95$, $J=6,2$. Neste conjunto de dados, para $J=3$ repetições e $\hat{\rho}=0,53$, obtém-se $AS = \{1/[1 - (1 - \hat{\rho})/J]\}^{0,5} = 0,88$, valor médio próximo da média dos ensaios ($AS=0,853$, Tabela 5).

Ensaio com AS próximo a 90% têm alta precisão experimental (Resende & Duarte, 2007). Ao se considerar que, para o registro de cultivares de trigo junto ao RNC, os ensaios devem estar dispostos no delineamento de blocos ao acaso com três ou mais repetições, a opção de usar o número mínimo de repetições (três repetições), neste caso, não é suficiente para que se obtenha precisão de magnitude recomendada ($AS > 0,90$), em qualquer das regiões de adaptação.

No presente trabalho, a precisão experimental medida pela AS foi considerada alta ou muito alta em 91,6% dos ensaios, segundo critério estabelecido por Resende & Duarte (2007) (Tabela 4). Nas regiões de VCU 1, 2, 3 e 4, observou-se que 90, 89, 96 e 84% dos ensaios foram classificados como de precisão muito alta ou alta. Na região de VCU 4, 15,5% dos ensaios foram classificados como de precisão moderada ou baixa. Isso é indicativo de que o controle de técnicas experimentais (uso de blocos em orientação adequada, aumento do tamanho de parcelas e do número de repetições, uniformidade da irrigação e controle fitossanitário preventivo) deve ser mais apurado na região de VCU 4. Precisoões baixas, de magnitudes semelhantes, foram observadas em 2,8% dos ensaios de feijão, 10,2% dos ensaios de soja (Cargnelutti Filho et al., 2009), 2,3% dos ensaios de arroz irrigado por alagamento (Cargnelutti Filho et al., 2012b) e 4,9% dos ensaios com milho (Cargnelutti Filho & Storck, 2009).

Tabela 4. Frequências simples e relativa nas classes de precisão experimental de ensaios de competição de genótipos de trigo (*Triticum aestivum*), por região de adaptação de cultivo, em relação à produtividade de grãos.

Parâmetro	Classes de precisão experimental por AS e por $\hat{\rho}$							
	Muito alta		Alta		Moderada		Baixa	
Acurácia seletiva	AS>0,90		0,70<AS≤0,90		0,50<AS≤0,70		AS≤0,50	
Repetibilidade (J=3)	$\hat{\rho}>0,587$		0,242< $\hat{\rho}$ ≤0,587		0,100< $\hat{\rho}$ ≤0,242		$\hat{\rho}$ ≤0,100	
Repetibilidade (J=4)	$\hat{\rho}>0,516$		0,194< $\hat{\rho}$ ≤0,516		0,077< $\hat{\rho}$ ≤0,194		$\hat{\rho}$ ≤0,077	
Frequência (%)	Simples	Relativa	Simples	Relativa	Simples	Relativa	Simples	Relativa
VCU 1	58	46,8	54	43,5	7	5,6	5	4,0
VCU 2	81	37,7	112	52,1	14	6,5	8	3,7
VCU 3	86	45,7	95	50,5	7	3,7	0	0,0
VCU 4	12	26,7	26	57,8	5	11,1	2	4,4
Geral	239	41,4	285	50,2	33	5,8	15	2,6

AS, acurácia seletiva; $\hat{\rho}$, coeficiente de repetibilidade; J, número de repetições. VCU, regiões de valor de cultivo de uso, delimitadas em: VCU 1, região úmida, fria e alta; VCU 2, região úmida, moderadamente quente e baixa; VCU 3, região moderadamente seca, quente e baixa; e VCU 4, região seca e quente.

Lúcio et al. (1999) mostraram que, em 50% dos 522 ensaios de trigo avaliados pelos autores, o CV esteve entre os limites de 10 e 16%, com precisão média, e que 5% dos ensaios tiveram CV maior do que 21% (classificado como muito alto ou com precisão muito baixa). No presente trabalho, 5% dos ensaios (percentil 0,95) tiveram CV maior do que 17,6%. Portanto, a qualidade dos ensaios, quanto ao CV, melhorou de 1999 para cá. Contudo, este resultado pode ter sido parcialmente decorrente do aumento no potencial produtivo dos genótipos (média dos ensaios) obtido no período. Ao avaliar sete cultivares de trigo, extensivamente cultivadas na região Sul do Brasil entre 1940 e 1992, Rodrigues et al. (2007) observaram ganho genético na produtividade de 44,9 kg ha⁻¹ por ano.

Dez ensaios (1,7%) apresentaram CV>20%. Em sete destes ensaios, no entanto constatou-se diferença significativa ($p<0,05$) entre os genótipos, com AS>0,66. Por outro lado, dos 15 ensaios (2,6%) com AS<0,50, apenas três (0,5%) seriam descartados por apresentarem CV>20%. Portanto, não há coerência entre as estatísticas CV e AS.

A precisão experimental, medida pela estatística AS, diferiu entre as regiões de adaptação do trigo (Tabela 5). As maiores AS foram observadas para as regiões de VCU 3 (AS=0,873) e 1 (AS=0,860), e as menores, para as regiões 4 (AS=0,809) e 2 (AS=0,841). Ensaios com baixa AS indicam que os genótipos têm grandes desvios absolutos entre os valores

genotípicos verdadeiros e aqueles estimados a partir das informações do experimento. Em consequência, não há segurança nas inferências realizadas, em razão da grande probabilidade dos ensaios nos plantios comerciais não reproduzirem as médias fenotípicas. Também foram observadas diferenças entre as regiões de adaptação quanto à produtividade de grãos, ao CV, à DMS e ao \hat{p} . As médias de produtividade não estiveram correlacionadas com os valores de AS. Portanto, as diferenças de produtividade entre as regiões independem da AS.

Diferenças no \hat{p} implicam diferenças no número de repetições necessárias para uma mesma acurácia seletiva. Ensaios que apresentam menores \hat{p} requerem maior número de medições (repetições) para predizer o valor real de determinado caráter (Cruz & Regazzi, 1997). A variabilidade das estimativas de \hat{p} referente aos 572 ensaios (Tabela 2) resulta em variabilidade no número de repetições necessárias para um mesmo valor de AS. Isso indica que há necessidade de aplicação de planejamentos experimentais específicos por ensaio e por região de adaptação. Ao se considerar os resultados obtidos no presente trabalho e em trabalhos com outras culturas (milho, soja, feijão, arroz e cana-de-açúcar), é premente que medidas adequadas de avaliação da precisão experimental sejam utilizadas para a correta discriminação de cultivares mais produtivas.

Conclusões

1. As estatísticas acurácia seletiva, coeficiente de determinação, coeficiente de herdabilidade e coeficiente de repetibilidade são adequadas para avaliar a precisão experimental em ensaios de competição de genótipos de trigo, em diferentes regiões de adaptação.

2. As regiões de adaptação diferem quanto à precisão experimental, o que demanda planejamentos experimentais específicos.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de produtividade em pesquisa; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela bolsa do Programa de Professor Visitante Nacional Sênior (Edital 6/2012); e à equipe de experimentação da Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola (Coodetec), pela disponibilização dos dados.

Tabela 5. Número de ensaios (NE) de competição de genótipos de trigo (*Triticum aestivum*) por região de adaptação de cultivo, médias da produtividade de grãos, acurácia seletiva (AS), coeficiente de variação (CV), diferença mínima significativa (DMS) entre genótipos, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, expresso em percentagem da média, e coeficiente de repetibilidade (\hat{p}), no período de 2007 a 2011⁽¹⁾.

Região ⁽²⁾	NE	Produtividade (kg ha ⁻¹)	AS	CV	DMS	\hat{p}
VCU 1	124	3.738b	0,860ab	11,5a	36,6a	0,563a
VCU 2	215	3.405c	0,841bc	11,8a	37,4a	0,509b
VCU 3	188	3.169d	0,873a	10,5b	33,5b	0,548a
VCU 4	45	4.891a	0,809c	12,0a	38,2a	0,466b
Geral	572	3.517	0,853	11,3	36,0	0,530

⁽¹⁾Médias seguidas por letras iguais não diferem pelo teste t "bootstrap" com 5.000 simulações, a 5% de probabilidade. ⁽²⁾Regiões de valor de cultivo de uso, regiões homogêneas de adaptação delimitadas em: VCU 1, região úmida, fria e alta; VCU 2, região úmida, moderadamente quente e baixa; VCU 3, região moderadamente seca, quente e baixa; e VCU 4, região seca e quente.

Referências

- AYRES, M.; AYRES JUNIOR, M.; AYRES, D.L.; SANTOS, A. de A.S. dos. **BioEstat**: aplicações estatísticas nas áreas das ciências biomédicas. Belém: Sociedade Civil Mamirauá, 2007. 324p.
- BENIN, G.; PINNOW, C.; SILVA, C.L. da; PAGLIOSA, E.S.; BECHE, E.; BORNHOFEN, E.; MUNARO, L.B.; SILVA, R.R. Análises biplot na avaliação de cultivares de trigo em diferentes níveis de manejo. **Bragantia**, v.71, p.28-36, 2012. DOI: 10.1590/S0006-87052012000100005.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução normativa nº 58, de 19 de novembro de 2008. Valor de cultivo e uso de trigo. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, 25 nov. 2008. Seção 1.
- CAIERÃO, E.; SILVA, M.S. e; SCHEEREN, P.L.; DEL DUCA, L. de J.A.; NASCIMENTO JUNIOR, A. do; PIRES, J.L. Análise da adaptabilidade e da estabilidade de genótipos de trigo como ferramenta auxiliar na recomendação de novas cultivares. **Ciência Rural**, v.36, p.1112-1117, 2006. DOI: 10.1590/S0103-84782006000400011.
- CARGNELUTTI FILHO, A.; BRAGA JUNIOR, R.L. do C.; LÚCIO, A.D. Medidas de precisão experimental e número de repetições e ensaios de genótipos de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, p.1413-1421, 2012a. DOI: 10.1590/S0100-204X2012001000001.
- CARGNELUTTI FILHO, A.; MARCHESAN, E.; SILVA, L.S. da; TOEBE, M. Medidas de precisão experimental e número de repetições em ensaios de genótipos de arroz irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, p.336-343, 2012b. DOI: 10.1590/S0100-204X2012001000001.
- CARGNELUTTI FILHO, A.; STORCK, L. Estatísticas de avaliação da precisão experimental em ensaios de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.17-24, 2007. DOI: 10.1590/S0100-204X2007000100003.
- CARGNELUTTI FILHO, A.; STORCK, L. Medidas do grau de precisão experimental em ensaios de competição de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.111-117, 2009. DOI: 10.1590/S0100-204X2009000200001.
- CARGNELUTTI FILHO, A.; STORCK, L.; GUADAGNIN, J.P. Número de repetições para a comparação de cultivares de milho. **Ciência Rural**, v.40, p.1023-1030, 2010. DOI: 10.1590/S0103-84782010005000073.
- CARGNELUTTI FILHO, A.; STORCK, L.; RIBEIRO, N.D. Medidas da precisão experimental em ensaios com genótipos de feijão e de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.1225-1231, 2009. DOI: 10.1590/S0100-204X2009001000003.
- CARGNIN, A.; SOUZA, M.A. de; CARNEIRO, P.C.S.; SOFIATTI, V. Interação entre genótipos e ambientes e implicações em ganhos com seleção em trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.987-997, 2006. DOI: 10.1590/S0100-204X2006000600014.
- CRUZ, C.D. **Programa Genes**: estatística experimental e matrizes. Viçosa: UFV, 2006. 285p.
- CRUZ, C.D.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: UFV, 2003. v.2, 585p.
- CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 2.ed. Viçosa: UFV, 1997. 390p.
- FRANCESCHI, L. de; BENIN, G.; MARCHIORO, V.S.; MARTIN, T.N.; SILVA, R.R.; SILVA, C.L. da. Métodos para análise de adaptabilidade e estabilidade em cultivares de trigo no Estado do Paraná. **Bragantia**, v.69, p.797-805, 2010. DOI: 10.1590/S0006-87052010000400004.
- LÚCIO, A.D.; STORCK, L.; BANZATTO, D.A. Classificação dos experimentos de competição de cultivares quanto a sua precisão. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v.5, p.99-103, 1999.
- RESENDE, M.D.V. de. **Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perenes**. 21.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2002. 975p.
- RESENDE, M.D.V. de; DUARTE, J.B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.37, p.182-194, 2007.
- REUNIÃO DA COMISSÃO SUL-BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE, 38., 2006, Passo Fundo. **Informações técnicas para a safra 2007**: trigo e triticales. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2007. 114p.
- RODRIGUES, O.; LHAMBY, J.C.B.; DIDONET, A.D.; MARCHESE, J.A. Fifty years of wheat breeding in Southern Brazil: yield improvement and associated changes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.817-825, 2007. DOI: 10.1590/S0100-204X2007000600008.
- SILVA, R.R.; BENIN, G.; SILVA, G.O. da; MARCHIORO, V.S.; ALMEIDA, J.L. de; MATEI, G. Adaptabilidade e estabilidade de cultivares de trigo em diferentes épocas de semeadura, no Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.1439-1447, 2011. DOI: 10.1590/S0100-204X2011001100004.
- SPRENT, P.; SMEETON, N.C. **Applied nonparametric statistical methods**. 4th ed. Boca Raton: Chapman and Hall, 2007. 530p.
- STORCK, L.; CARGNELUTTI FILHO, A.; LÚCIO, A.D.; LOPES, S.J. Método de Papadakis e número de repetições em experimentos de soja. **Ciência Rural**, v.39, p.977-982, 2009. DOI: 10.1590/S0103-84782009005000027.
- STORCK, L.; CARGNELUTTI FILHO, A.; LÚCIO, A.D.; MISSIO, E.L.; RUBIN, S. de A.L. Avaliação da precisão experimental em ensaios de competição de cultivares de soja. **Ciência e Agrotecnologia**, v.34, p.572-578, 2010. DOI: 10.1590/S1413-70542010000300007.

Recebido em 6 de dezembro de 2012 e aprovado em 5 de março de 2013