

Relação causa e efeito de caracteres quantitativos sobre a capacidade de expansão do grão em milho-pipoca¹

Cause and effect of quantitative characteristics on grain expansion capacity in popcorn

Pablo Diego Silva Cabral², Antonio Teixeira do Amaral Júnior^{3*}, Ismael Lourenço de Jesus Freitas³, Rodrigo Moreira Ribeiro³ e Thiago Rodrigues da Conceição Silva³

RESUMO - O conhecimento do sentido e do grau de associação entre duas ou mais características pode contribuir para aumentar a eficiência na seleção de genótipos superiores. Objetivou-se com esse trabalho avaliar as correlações fenotípicas, genotípicas e ambientais, bem como os efeitos diretos e indiretos da análise de trilha para a seleção mais apropriada, via capacidade de expansão e seus componentes primários e secundários, em híbridos dialélicos de milho-pipoca. Para tanto, 90 híbridos dialélicos e a testemunha (IAC 112) foram semeados em safra e safrinha em Campos dos Goytacazes - RJ, de acordo com o delineamento em blocos casualizados. As características avaliadas foram: ciclo (CO); altura da planta (AP); altura da espiga (AE); diâmetro do colmo (DC); massa de cem grãos (M100); capacidade de expansão do grão (CE); produtividade de grãos (PG); prolificidade (PR); comprimento do grão (CG), largura do grão (LG) e espessura do grão (EG). Procederam-se as análises de correlação fenotípica (r_f), genotípica (r_g) e ambiental (r_a) e após, realizou-se o desdobramento dos coeficientes de correlação simples em efeitos diretos e indiretos sobre a variável principal CE, obtidos pela análise de trilha. Os resultados demonstraram uma alta correlação genotípica negativa e significativa entre CE e PG de -0,67, evidenciando a dificuldade de obtenção de híbridos com alta CE e PG, simultaneamente. A M100 e a PG são as variáveis com maior associação, porém contrária, com capacidade de expansão. O CG e LG têm influência direta negativa e EG positiva sobre a capacidade de expansão.

Palavras-chaves: Análise de trilha. Correlação. Híbridos dialélicos. *Zea mays* L..

ABSTRACT - Knowledge of the direction and degree of association between two or more characteristics may contribute to increase efficiency in the selection of superior genotypes. The aim of this study was to evaluate phenotypic, genotypic and environmental correlations, as well as the direct and indirect effects of path analysis, for the most suitable selection, using expansion capacity and its primary and secondary components, in diallel hybrids of popcorn. Accordingly, 90 diallel hybrids and a control (IAC 112) were planted both in and out of season in Campos dos Goytacazes, in the State of Rio de Janeiro, following a randomised block design. The characteristics under evaluation were: cycle (CO); plant height (AP); ear height (AE); stem diameter (DC); hundred grain weight (M100); grain expansion capacity (CE); Grain yield (PG); prolificacy (PR); grain length (CG), grain width (LG) and grain thickness (EG). Analysis of the phenotypic (r_f), genotypic (r_g) and environmental (r_a) correlations were carried out, followed by breakdown of the simple correlation coefficients obtained from path analysis into their direct and indirect effects on the main variable CE. The results showed a significant high negative genotypic correlation between the EC and PG of -0.67, demonstrating the difficulty of obtaining hybrids with both a high EC and PG. The variables M100 and PG have the greatest association with expansion capacity, albeit negative. Both the CG and LG have a direct negative influence, and the EG, a direct positive influence, on expansion capacity.

Key words: Path analysis. Correlation. Diallel hybrids. *Zea mays* L..

DOI: 10.5935/1806-6690.20160013

* Autor para correspondência

¹Recebido para publicação em 14/01/2014, aprovado em 16/09/2015

²Instituto Federal Goiano, Rio Verde-GO, Brasil, pablo.cabral@ifgoiano.edu.br

³Laboratório de Melhoramento Genético Vegetal, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Av. Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia-RJ, Brasil, 28.013-602, amaraljr@uenf.br, ismaelljf@yahoo.com.br, rodrigo.moreira85@yahoo.com.br, thiagrosfi@hotmail.com

INTRODUÇÃO

O conhecimento das correlações entre características de importância econômica é importante por fornecer informações que auxiliem no processo de seleção de genótipos superiores. Em milho-pipoca, as principais características de interesse agrônomo e comercial são a capacidade de expansão e a produtividade de grãos; porém, a correlação negativa entre as duas dificulta a obtenção de cultivar com ambas características favoráveis (AMARAL JUNIOR *et al.*, 2010; CARPENTIERI-PÍPOLO *et al.*, 2002; DAROS *et al.*, 2004; FREITAS JÚNIOR *et al.*, 2009; SCAPIM *et al.*, 2012).

Nesse sentido, Hallauer, Carena e Miranda Filho (2010) relataram a importância dos coeficientes de correlação simples, uma vez que, com esses, pode-se quantificar o grau de associação genético e não-genético entre dois ou mais caracteres. Cruz, Regazzi e Carneiro (2012) afirmaram que essas associações podem possibilitar ganhos indiretos por seleção em caracteres correlacionados, principalmente em seleção truncada em caracteres de baixa herdabilidade, aumentando assim a eficiência na seleção.

Carpentieri-Pípulo *et al.* (2002) avaliaram as correlações fenotípicas, genotípicas e ambientais entre caracteres quantitativos em nove genótipos de milho-pipoca e observaram que a variável capacidade de expansão, expressou correlações genotípicas e fenotípicas positivas com tamanho da pipoca e com o número de grãos por volume; e, negativas com a produtividade de grãos. Esses mesmos autores relataram ainda a possibilidade de seleção indireta de peso total da espiga para ganhos em produtividade.

Os coeficientes de correlação, apesar de serem de grande utilidade na quantificação da magnitude e direção das influências dos fatores na determinação de caracteres complexos, não dão a exata importância relativa dos efeitos diretos e indiretos destes fatores. Para tanto, estudos sobre o desdobramento do coeficiente de correlação são feitos pela análise de trilha (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012).

A análise de trilha consiste na quantificação dos efeitos diretos e indiretos das variáveis explicativas sobre uma variável básica, cujas estimativas são obtidas por meio de equações de regressão, em que as variáveis são previamente padronizadas (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012). Segundo Li (1956), o coeficiente de trilha é um método que analisa um sistema de múltiplas variáveis, relacionadas de modo linear e inclui todos os fatores básicos (causas) e suas variáveis resultantes (efeitos).

Rangel *et al.* (2011), avaliando a associação entre a capacidade de expansão e características agrônomicas

em populações de milho-pipoca sob seleção recorrente, observaram que a massa de 100 grãos foi a característica com maior associação com a capacidade de expansão, porém negativa. Esses mesmos autores relataram a possibilidade de resposta correlacionada em capacidade de expansão e produtividade de grãos, desde que se selecionem, dentre as populações mais produtivas, as com menores tamanhos de grãos.

O objetivo do presente trabalho foi o de avaliar as correlações fenotípicas, genotípicas e ambientais, bem como a análise de trilha da capacidade de expansão e seus componentes primários e secundários em híbridos dialélicos de milho-pipoca.

MATERIAL E MÉTODOS

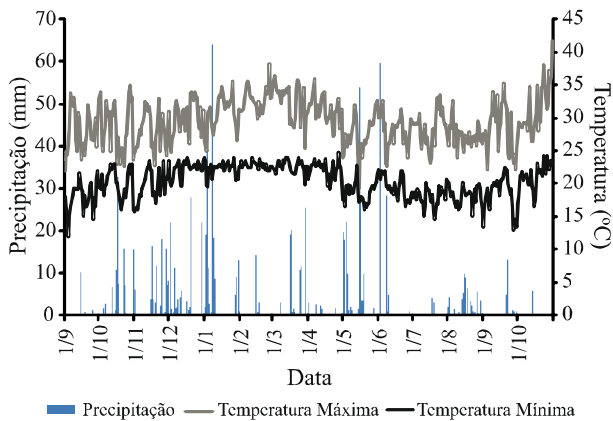
Dois experimentos foram instalados em duas épocas no Colégio Estadual Agrícola Antônio Sarlo, em Campos dos Goytacazes, região Norte do Estado do Rio de Janeiro, situado a 21° 45' de latitude sul, 41° 20' W de longitude e a 11 m de altitude. A primeira época foi no período da safra (outubro a fevereiro) e a segunda foi na safrinha (fevereiro a junho).

Os experimentos foram instalados seguindo o delineamento em blocos casualizados com 91 tratamentos e quatro repetições. Sendo os tratamentos constituídos por 90 híbridos simples de milho, provenientes de um dialelo completo com os recíprocos entre dez linhagens, e a testemunha IAC 112.

Cada unidade experimental foi composta por duas linhas de três metros de comprimento, sendo o espaçamento entre linhas de 0,90 m e entre plantas de 0,20 m. A semeadura foi realizada a 0,05 m de profundidade, com três sementes por cova. Aos 15 dias após o plantio, realizou-se o desbaste, deixando-se apenas uma planta por cova. Todos os tratamentos culturais foram realizados de acordo com Vittorazzi *et al.* (2013), e a umidade do solo foi mantida próximo a capacidade de campo, por meio do sistema de irrigação por aspersão em linha, constituído de aspersores em metal de 1 1/2', vazão de 16 L min⁻¹, com raio de 12 metros, colocados na direção longitudinal (leste-oeste) a 2,5 metros de altura, com turno de rega de 1 hora por dia. Os dados meteorológicos foram coletados na estação meteorológica de observação de superfície automática do INMET em Campos dos Goytacazes-RJ, situada a 21° 71' latitude sul e 41° 34' W de longitude (Figura 1).

As características avaliadas foram: Ciclo (CO): dias da semeadura a colheita; Altura da planta (AP): medida em metros, do nível do solo a inserção da folha bandeira em dez plantas competitivas; Altura da espiga (AE):

Figura 1 - Temperatura máxima e mínima diária e precipitação pluviométrica diária do período compreendido entre 01 de setembro de 2011 a 31 de outubro de 2012



medida em metros, do nível do solo a inserção da espiga superior em dez plantas competitivas; Diâmetro do colmo (DC): medido no terço inferior da planta com o auxílio de paquímetro digital, dado em milímetros; Massa de cem grãos (M100): obtida em balança analítica com precisão de três casas decimais; Capacidade de expansão (CE): aferida a massa de 30 g de grãos e levada ao microondas, em pote plástico especial, para pipocamento na potência de 1000 W, por um minuto e quarenta e cinco segundos e o volume da pipoca foi medida em proveta de 2000 mL, sendo o quociente do volume pipocado por 30 (massa de grão) forneceu a CE em mL g⁻¹; Produtividade de grãos (PG): determinada pela massa total de grãos da parcela (ou área útil) e transformada para kg ha⁻¹; Prolificidade (PR): número médio de espiga por planta, avaliado em dez plantas competitivas; Comprimento (CG), largura (LG) e espessura do grão (EG): medidos com o auxílio de um paquímetro digital.

Para a variável produtividade de grãos, realizou-se a correção de estande pelo método da covariância do estande ideal, conforme descrito por Schmildt, Krause e Cruz (2006), sendo considerado o estande ideal de 30 plantas.

Para as análises estatísticas, procedeu-se as análises de correlação fenotípica (r_f), genotípica (r_g) e ambiental (r_a) e análise regressão linear.

Para as correlações foram utilizados as seguintes expressões:

$$r_f = \frac{Covf(x, y)}{\sqrt{\sigma_{fx}^2 \sigma_{fy}^2}}; r_g = \frac{Covg(x, y)}{\sqrt{\sigma_{gx}^2 \sigma_{gy}^2}}; r_a = \frac{Cova(x, y)}{\sqrt{\sigma_{ax}^2 \sigma_{ay}^2}}$$

Em que: = Cov f(x,y), Cov g(x,y) e Cov a(x,y) = respectivamente, covariâncias fenotípicas, genotípicas e de ambiente entre as características x e y;

σ_{fx}^2 , σ_{gx}^2 , σ_{ax}^2 = respectivamente, variância fenotípica, genotípica e de ambiente da característica x; e

σ_{fy}^2 , σ_{gy}^2 , σ_{ay}^2 = respectivamente, variância fenotípica, genotípica e de ambiente da característica y.

Para a regressão foi utilizado a expressão: $Y_i = b_0 + b_1 x_i + \varepsilon_i$

Em que: Y_i é a i-ésima observação da variável dependente,

x_j é a j-ésima observação da variável independente,

b_0 é um intercepto no eixo x,

b_1 é o coeficiente de inclinação da reta; e

ε_i é um resíduo para a i-ésima observação.

As significâncias do coeficiente de correlação genotípica e o b_1 da regressão foram avaliadas pelo teste “t” e para as correlações fenotípica e ambientais utilizaram-se o *bootstrap* com 5000 simulações, de acordo com Ferreira *et al.* (2008).

Para verificar a colinearidade entre as características foi realizado o teste de multicolinearidade, de acordo com Montgomery e Peck citado por Cruz, Regazzi, Carneiro (2012). Em seguida, realizou-se o desdobramento dos coeficientes de correlação simples em efeitos diretos e indiretos, dados pela análise de trilha. Para realização de todas as análises utilizou-se os recursos computacionais do programa Genes (CRUZ, 2013).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estimativas de correlação fenotípica (r_f), genotípica (r_g) e ambiental (r_a) são apresentadas na Tabela 1. Assim, dentre os 55 pares de combinações para as onze características avaliadas, 41 apresentaram r_g significativas a 1 ou 5% de probabilidade, sendo que 27 foram positivas. Correlações genotípicas positivas indicam que a seleção objetivando ganho em uma característica provocará o mesmo efeito na outra.

Dentre as 41 r_g significativas, 12 expressaram magnitude superior às r_f e r_a (Tabela 1), demonstrando que a associação linear entre esses pares de características é mais influenciada pelos componentes genéticos do que os ambientais. Por outro lado, 27 r_g significativas foram menores que a respectiva r_a, o que mostra maior influência ambiental na determinação da associação linear entre essas características. O ambiente torna-se causa de correlações quando duas características são influenciadas pelas mesmas variações de condições ambientais; em que valores negativos dessa correlação, evidenciam que o

Tabela 1 - Correlações fenotípica (r_f), genotípica (r_g) e ambiental (r_a) entre as onze características agrônômicas de híbridos dialélicos de milho-pipoca

Características		AP	AE	DC	M100	CE	PG	PR	CG	LG	EG
CO	r_f	-0,16 ^{ns}	-0,20 ^{ns}	0,15 ^{ns}	-0,23 ⁺	0,48 ⁺⁺	-0,32 ⁺⁺	0,28 ⁺⁺	-0,30 ⁺⁺	-0,34 ⁺⁺	0,12 ^{ns}
	r_g	-0,12 ^{ns}	-0,18 ^{ns}	0,26 [*]	-0,34 [*]	0,54 ^{**}	-0,31 ^{**}	0,44 ^{**}	-0,33 ^{**}	-0,45 ^{**}	0,15 ^{ns}
	r_a	-0,43 ⁺⁺	-0,38 ⁺⁺	-0,25 ⁺	-0,37 ⁺⁺	0,59 ⁺⁺	-0,34 ⁺⁺	-0,12 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,02 ^{ns}
AP	r_f		0,91 ⁺⁺	0,50 ⁺⁺	0,47 ⁺⁺	-0,22 ⁺	0,56 ⁺⁺	0,38 ⁺⁺	0,44 ⁺⁺	0,17 ^{ns}	-0,09 ^{ns}
	r_g		0,89 ^{**}	0,57 ^{**}	0,51 ^{**}	-0,30 [*]	0,60 ^{**}	0,44 ^{**}	0,49 ^{**}	0,24 ^{**}	-0,12 ^{ns}
	r_a		0,99 ⁺⁺	0,73 ⁺⁺	0,59 ⁺⁺	-0,34 ⁺	0,68 ⁺⁺	0,29 ⁺	0,55 ⁺⁺	0,04 ^{ns}	0,03 ^{ns}
AE	r_f			0,51 ⁺⁺	0,43 ⁺⁺	-0,26 ⁺⁺	0,57 ⁺⁺	0,23 ⁺	0,52 ⁺⁺	0,21 ⁺	-0,23 ⁺
	r_g			0,59 ^{**}	0,46 ^{**}	-0,34 ^{**}	0,61 ^{**}	0,38 [*]	0,56 ^{**}	0,30 ^{**}	-0,31 ^{**}
	r_a			0,75 ⁺⁺	0,52 ⁺⁺	-0,38 ⁺	0,68 ⁺⁺	0,54 ⁺⁺	0,63 ⁺⁺	0,37 ^{ns}	-0,37 ^{ns}
DC	r_f				0,31 ⁺⁺	-0,07 ^{ns}	0,34 ⁺⁺	0,33 ⁺⁺	0,35 ⁺⁺	0,25 ⁺	0,02 ^{ns}
	r_g				0,39 ^{**}	-0,06 ^{ns}	0,40 ^{**}	0,34 ^{**}	0,47 ^{**}	0,35 ^{**}	0,02 ^{ns}
	r_a				0,08 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,31 ⁺	0,04 ^{ns}	0,49 ⁺⁺	0,01 ^{ns}
M100	r_f					-0,53 ⁺⁺	0,84 ⁺⁺	0,09 ^{ns}	0,74 ⁺⁺	0,56 ⁺⁺	0,16 ^{ns}
	r_g					-0,58 ^{**}	0,84 ^{**}	0,13 ^{ns}	0,75 ^{**}	0,57 ^{**}	0,17 ^{ns}
	r_a					-0,64 ⁺⁺	0,92 ⁺⁺	-0,02 ^{ns}	0,82 ⁺⁺	0,70 ⁺⁺	0,14 ^{ns}
CE	r_f						-0,60 ⁺⁺	0,06 ^{ns}	-0,57 ⁺⁺	-0,51 ⁺⁺	0,26 ⁺
	r_g						-0,67 ^{**}	0,08 ^{ns}	-0,63 ^{**}	-0,59 ^{**}	0,31 ^{**}
	r_a						-0,74 ⁺⁺	0,03 ^{ns}	-0,72 ⁺⁺	-0,76 ⁺⁺	0,37 ⁺
PG	r_f							0,07 ^{ns}	0,83 ⁺⁺	0,47 ⁺⁺	-0,13 ^{ns}
	r_g							0,06 ^{ns}	0,83 ^{**}	0,51 ^{**}	-0,16 ^{ns}
	r_a							0,13 ^{ns}	0,91 ⁺⁺	0,67 ⁺⁺	-0,04 ^{ns}
PR	r_f								-0,05 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	0,18 ^{ns}
	r_g								-0,10 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	0,26 [*]
	r_a								0,06 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,06 ^{ns}
CG	r_f									0,51 ⁺⁺	-0,33 ⁺⁺
	r_g									0,56 ^{**}	-0,40 ^{**}
	r_a									0,72 ⁺⁺	-0,08 ^{ns}
LG	r_f										-0,04 ^{ns}
	r_g										-0,03 ^{ns}
	r_a										-0,07 ^{ns}

CO = ciclo, AP = altura de planta; AE = altura da espiga; DC = diâmetro do colmo; M100 = massa de cem grãos; CE = capacidade de expansão; PG = produtividade de grãos; PR = prolificidade; CG = comprimento do grão; LG = largura do grão; EG = espessura do grão; *, ** e ns = significativo a 5 e a 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste t. +, ++ = significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo método de *bootstrap* com 5000 simulações

ambiente favoreceu uma característica em detrimento da outra, e valores positivos, que ambas foram beneficiadas ou prejudicadas pelas mesmas causas de variações ambientais (FALCONER, 1981).

Cruz, Regazzi e Carneiro (2012) e Hallauer, Carena e Miranda Filho (2010) ressaltam a importância de se distinguir e quantificar o grau de associação genética

e ambiental entre as características avaliadas, uma vez que as causas genéticas de correlação possuem natureza herdável e podem auxiliar na orientação de programas de melhoramento.

A maior estimativa de r_f foi observada entre altura de planta (AP) e altura de espiga (AE), de 0,91 e a menor de -0,60 entre capacidade de expansão (CE) e

produtividade de grãos (PG) (Tabela 1), sendo ambas estimativas significativas pelo teste “t”. Dentre as estimativas de r_g , a maior foi de 0,89 entre AP e AE e a menor foi observada entre CE e PG, de -0,67. E para r_a a maior estimativa ocorreu entre AP e AE de 0,99 e a menor, entre CE e largura do grão (LG) de -0,63.

Para a característica CE houve r_i e r_g significativas e positivas para com ciclo (CO) e espessura do grão (EG) e negativa para com AP, AE, massa de cem grãos (M100), PG, comprimento (CG) e largura do grão (LG) (Tabela 1). Entre CE e CO, a r_g foi de 0,54, indicando que o incremento no ciclo pode levar a ganhos em CE. A correlação genotípica entre CE e EG foi de 0,31. Resultados semelhantes foram observados por Broccoli e Burak (2004), que relataram ocorrência de correlação fenotípica significativa entre o volume de pipoca e a espessura do grão, de magnitude 0,46. Essa correlação pode estar diretamente ligada com a forma do grão, em que grãos mais arredondados tendem a ter uma maior CE, corroborando com Lyerly (1942), que destacou a influência da forma do grão de milho-pipoca sobre a capacidade de expansão.

As correlações genotípicas (r_g) negativas entre CE e AP e AE foram de -0,30 e -0,34, respectivamente (Tabela 1), demonstrando que a diminuição de AP e AE pode incrementar a CE. Esses resultados podem ser explicados pela maior tendência de plantas maiores e com espigas mais altas ao tombamento e ao quebramento do colmo, podendo assim expor as espigas e os grãos às intempéries ambientais que pode resultar em danificação do pericarpo. Hosney, Zeleznak e Adelrahman (1983) relataram que qualquer dano ao pericarpo do grão de milho-pipoca provoca diminuição acentuada na sua capacidade de expansão.

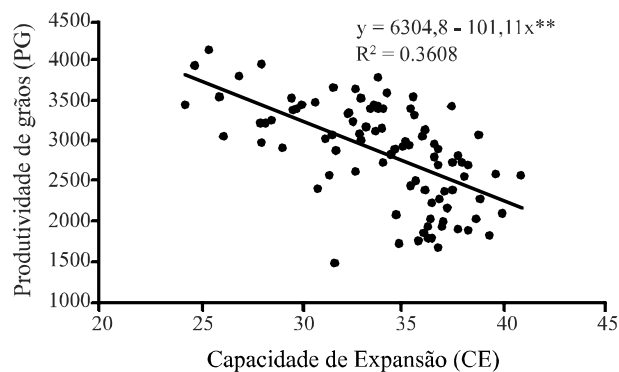
A CE expressou correlações negativa com PR e positiva com DC, porém, ambas não significativas (Tabela 1). Cruz, Regazzi e Carneiro (2012) relatam que um coeficiente de correlação de magnitude próxima ou igual a zero não implica na falta de relação entre duas variáveis, mas na ausência de relação linear entre essas variáveis.

Entre as características de maior interesse em um programa de melhoramento de milho-pipoca, CE e PG, observou-se r_g negativa de -0,67. Carpentieri-Pípolo *et al.* (2002), estudando as correlações entre caracteres quantitativos em milho-pipoca, relataram estimativa de r_g de -0,265 entre CE e PG. Vale ressaltar que PG obteve correlação positiva com CG e LG e negativa com EG, porém, para essa última, não significativa. Esses resultados demonstram a importância do formato do grão e sua influência sobre CE e PG, tal como apontado por Broccoli e Burak (2004). Para minimizar o efeito dessa correlação na seleção de genótipos superiores para ambas características, sugere-se a transformação dessas em volume de pipoca (m^3) por hectare ($VP\ ha^{-1}$).

Diferentemente do observado no presente estudo, onde se obteve uma estimativa de -0,67 de r_g entre as variáveis CE e PG, Daros *et al.* (2004); Freitas Júnior (2008) e Rangel *et al.* (2011) não encontraram correlação genotípica significativa entre as variáveis capacidade de expansão e produtividade de grão em milho-pipoca. Vale ressaltar que esses autores estimaram a correlação na mesma população de milho-pipoca sob seleção recorrente (UNB-2U), porém, em ciclo distintos. Nesse método de melhoramento a intensidade de seleção é muito alta para ambas as características, podendo ter ocorrido, ao longo dos ciclos, uma quebra de correlação entre essas características.

A correlação negativa entre CE e PG também foi observada pela regressão linear (Figura 2), concordando com a análise de correlação (Tabela 1). Pode-se observar que o coeficiente angular foi significativo a 1% de probabilidade pelo teste “t”. Na equação da reta, nota-se que quando há um acréscimo de 1 mL g^{-1} em CE, ocorre uma redução média de 101,11 kg ha^{-1} em PG. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,3608, o que significa que 36,08% da variação em PG é explicado por CE.

Figura 2 - Regressão linear entre a capacidade de expansão (CE) e produtividade de grãos (PG) em híbridos de milho-pipoca



A M100, o CG e a LG expressaram correlação genotípica negativa com CE, de -0,58, -0,63 e -0,59, respectivamente (Tabela 1). Essas características estão diretamente ligadas à forma do grão, sendo que os grãos mais arredondados e menores tendem a uma maior CE. Resultados que corroboram com Lyerly (1942), o qual concluiu que grãos arredondados têm maior CE do que os grãos alongados. Rangel *et al.* (2011) relataram a possibilidade de seleção truncada de grãos menores para a obtenção de populações com alta CE e PG.

Antes de proceder a análise de trilha, realizou-se a análise de multicolinearidade entre as variáveis (CRUZ, REGAZZI, CARNEIRO, 2012); o valor de 70,79 obtido para número de condições, permite classificá-la como fraca, não causando danos à estatística de análise de trilha. Segundo Coimbra *et al.* (2005), na presença de multicolinearidade de moderada a severa, as variâncias associadas aos coeficientes de trilha podem atingir valores demasiadamente elevados, assumindo assim valores absurdos ou sem nenhuma coerência com o fenômeno biológico estudado.

Avaliando os efeitos diretos dos componentes primários sobre a variável principal (CE), nota-se que a maior magnitude foi de M100 seguido por CO, e as menores foram de AP e PG, respectivamente (Tabela 2). Porém, M100 e PG tiveram sentido contrário (negativo), evidenciando que o aumento nessas características pode influenciar negativamente a CE. Por outro lado, as características CO e EG obtiveram sentido favorável (positivo), indicando que o aumento nessas pode resultar em ganhos em CE. Resultados esses que demonstram concordância com as correlações genotípicas e fenotípicas, demonstradas na Tabela 1.

O maior efeito total sobre CE foi de PG com -0,601 (Tabela 2), porém, nota-se que desses, -0,307 foi de forma indireta via M100. O segundo maior efeito total foi observado por M100 de -0,529, onde o PG contribuiu de forma indireta com -0,216. Isso ratifica a importância (negativa) dessas características sobre a CE e a dificuldade de obtenção de cultivar com alta CE e PG, que já foram relatados por Daros *et al.* (2004); Freitas Júnior *et al.* (2006); Freitas Júnior *et al.* (2009);

Pajic *et al.* (2008); Scapim *et al.* (2006); Santos *et al.* (2007); Vieira *et al.* (2009a) e Vieira *et al.* (2009b).

Dentre as características que expressaram efeito total favorável sobre CE, ou seja, CO e EG, o CO obteve a maior magnitude, com 0,475 (Tabela 2). Para EG, o efeito direto foi de 0,264 e o total de 0,263. Esses resultados sugerem que é possível obter ganhos em CE com a seleção indireta em CO e EG. Segundo Cruz, Regazzi e Carneiro (2012), a seleção simultânea de caracteres com ênfase nos efeitos diretos cujas magnitudes são altas, pode resultar em ganhos na variável principal.

A característica AP obteve efeito direto sobre CE favorável, porém, de baixa magnitude. Ainda para AP, observou-se que o efeito total dessa característica foi negativo, indicando influência indireta de outras características. Tais resultados sugerem que a seleção indireta por essa característica não será eficiente em promover ganhos pelas respostas correlacionadas, mesmo com o efeito direto sendo favorável sobre CE.

Para as variáveis primárias CO e EG não foram observados efeitos diretos e indiretos das variáveis secundárias de magnitude alta, que pudesse superar o respectivo efeito residual (Tabela 3); indicando que essas variáveis secundárias não são os principais componentes das variações observadas nas variáveis primárias, sendo a seleção indireta ineficaz nesses casos. Rangel *et al.* (2011), por meio de análise de trilha da capacidade de expansão e seus componentes em milho-pipoca, relataram que os componentes secundários não foram as principais causas das variações nas variáveis primárias.

Tabela 2 - Estimativas dos efeitos diretos e indiretos das variáveis primárias sobre a capacidade de expansão, obtidos por análise de trilha em milho-pipoca

Efeito	Variáveis Primárias				
	CO	AP	M100	PG	EG
Direto sobre CE	0,306	0,169	-0,365	-0,257	0,264
Indireto via CO		-0,048	-0,069	-0,096	0,038
Indireto via AP	-0,027		0,079	0,095	-0,015
Indireto via M100	0,083	-0,171		-0,307	-0,058
Indireto via PG	0,081	-0,145	-0,216		0,034
Indireto via ES	0,033	-0,023	0,042	-0,035	
Total	0,475	-0,219	-0,529	-0,601	0,263
R ² = 0,524					
Efeito residual = 0,689					

CO = ciclo, AP = altura de planta; M100 = massa de cem grãos; PG = produtividade de grãos; EG = espessura do grão

Tabela 3 - Estimativas dos efeitos diretos e indiretos das variáveis secundárias sobre as primárias, obtidos por análise de trilha em milho-pipoca

Variáveis Secundárias	Efeitos	Variáveis Primárias				
		CO	AP	M100	PG	EG
AE	Direto	-0,320	0,865	0,048	0,190	-0,192
	Indireto via DC	0,178	0,000	-0,018	-0,026	0,072
	Indireto via PR	0,048	0,041	0,030	0,019	0,038
	Indireto via CS	-0,047	0,001	0,316	0,368	-0,183
	Indireto via LS	-0,062	0,001	0,053	0,018	0,032
	Total	-0,203	0,907	0,429	0,569	-0,232
DC	Direto	0,349	0,001	-0,036	-0,051	0,141
	Indireto via AE	-0,163	0,440	0,024	0,097	-0,098
	Indireto via PR	0,070	0,059	0,043	0,028	0,056
	Indireto via CS	-0,032	0,001	0,210	0,244	-0,122
	Indireto via LS	-0,074	0,001	0,063	0,022	0,038
	Total	0,151	0,501	0,305	0,340	0,016
PR	Direto	0,213	0,180	0,132	0,084	0,170
	Indireto via AE	-0,072	0,195	0,011	0,043	-0,043
	Indireto via DC	0,114	0,000	-0,012	-0,017	0,046
	Indireto via CS	0,005	0,000	-0,032	-0,037	0,018
	Indireto via LS	0,016	0,000	-0,014	-0,005	-0,008
	Total	0,276	0,375	0,086	0,069	0,183
CG	Direto	-0,091	0,002	0,607	0,705	-0,351
	Indireto via AE	-0,167	0,451	0,025	0,099	-0,100
	Indireto via DC	0,121	0,000	-0,012	-0,018	0,049
	Indireto via PR	-0,011	-0,009	-0,007	-0,004	-0,009
	Indireto via LS	-0,153	0,001	0,132	0,045	0,080
	Total	-0,301	0,445	0,744	0,828	-0,331
LG	Direto	-0,298	0,002	0,256	0,088	0,155
	Indireto via AE	-0,066	0,179	0,010	0,039	-0,040
	Indireto via DC	0,087	0,000	-0,009	-0,013	0,035
	Indireto via PR	-0,011	-0,010	-0,007	-0,005	-0,009
	Indireto via CS	-0,047	0,001	0,312	0,363	-0,181
	Total	-0,335	0,173	0,562	0,474	-0,040
R ²		0,303	0,853	0,616	0,722	0,188
Efeito Residual		0,834	0,382	0,619	0,526	0,901

CO = ciclo; AP = altura de planta; M100 = massa de cem grãos; PG = produtividade de grãos; EG = espessura do grão; AE = altura da espiga superior; DC = diâmetro do colmo; PR = prolificidade; CG = comprimento do grão; LG = largura do grão

As variáveis secundárias AE, DC e CG detiveram efeito total sobre AP de 0,907, 0,501 e 0,445, respectivamente, superando o efeito residual (0,382), demonstrado na Tabela 3. Porém, os efeitos diretos de DC e CG são quase nulos, sendo o efeito

indireto via AE sobre essas características o principal componente para a formação do efeito total de DC e CG sobre AP. Esses resultados demonstram que a seleção indireta em AE é viável para se obter ganhos em AP.

A característica secundária CG obteve efeito direto e total de alta magnitude sobre M100 e PG e que superaram os respectivos efeitos residuais (Tabela 3). A variável AE expressou efeito total sobre PG de 0,569, mas ao analisar o efeito indireto via CG sobre PG, nota-se que esse é a maior parte do efeito total de AE sobre PG. Assim, pode se inferir que CG participa das variações de M100 e PG e que se pode realizar seleção indireta em CG para ganhos em M100 e PG.

Estão contidas na Tabela 4 as estimativas dos efeitos diretos e indiretos das variáveis secundárias sobre a CE obtidos por análise de trilha. Dentre as variáveis secundárias as que obtiveram maior efeito total em CE foram: CG, LG e AE. Porém, AE obteve efeito direto de magnitude baixa (-0,064) e na composição do seu efeito direto sobre CE, observou-se grande contribuição das variáveis primárias M100 (-0,156), AP (0,153) e PG (-0,146).

Os maiores efeitos diretos sobre CE foram de CG, LG e DC, com -0,449, -0,325 e 0,215, respectivamente

(Tabela 4). Por outro lado, DC obteve efeito total sobre CE negativo e de baixa magnitude, indicando que a seleção indireta por DC para ganho em CE não é viável.

CG e LG revelaram efeitos total e diretos de alta magnitude sobre CE, indicando uma relação de causa e efeito. Observou-se ainda, uma grande contribuição das características primárias M100 e PG na composição dos efeitos diretos e totais de CG e LG sobre CE. Esses resultados corroboram com os contidos na Tabela 2, em que os maiores efeitos diretos e totais sobre CE foram de M100 e PG. Resultados similares foram obtidos por Rangel *et al.* (2011), que concluíram que o M100 foi variável com a maior associação (contrária) com a capacidade de expansão.

Contudo, ficou evidente que as variáveis primárias M100 e PG têm alta relação (contrária) sobre CE, e que as características secundárias CG e LG influenciam, de forma contrária, a CE. Isso ratifica a dificuldade em se obter cultivares de milho-pipoca com alta capacidade de expansão e produtividade de grãos, simultaneamente.

Tabela 4 - Estimativas dos efeitos diretos e indiretos das variáveis secundárias sobre a capacidade de expansão, obtidos por análise de trilha em milho-pipoca

Variáveis Secundárias	Efeito	Variáveis Primárias					ER	Total
		CO	AP	M100	PG	EG		
AE	Direto	-0,098	0,146	-0,017	-0,049	-0,051	0,004	-0,064
	Indireto via DC	0,054	0,000	0,007	0,007	0,019	0,023	0,109
	Indireto via PR	0,015	0,007	-0,011	-0,005	0,010	-0,024	-0,008
	Indireto via CS	-0,015	0,000	-0,115	-0,095	-0,048	0,038	-0,234
	Indireto via LS	-0,019	0,000	-0,019	-0,005	0,008	-0,033	-0,067
	Total	-0,062	0,153	-0,156	-0,146	-0,061	0,008	-0,265
DC	Direto	0,107	0,000	0,013	0,013	0,037	0,044	0,215
	Indireto via AE	-0,050	0,074	-0,009	-0,025	-0,026	0,002	-0,033
	Indireto via PR	0,021	0,010	-0,016	-0,007	0,015	-0,035	-0,012
	Indireto via CS	-0,010	0,000	-0,077	-0,063	-0,032	0,025	-0,156
	Indireto via LS	-0,023	0,000	-0,023	-0,006	0,010	-0,040	-0,081
	Total	0,046	0,084	-0,111	-0,087	0,004	-0,002	-0,066
PR	Direto	0,065	0,030	-0,048	-0,022	0,045	-0,106	-0,036
	Indireto via AE	-0,022	0,033	-0,004	-0,011	-0,011	0,001	-0,015
	Indireto via PR	0,035	0,000	0,004	0,004	0,012	0,015	0,070
	Indireto via CS	0,002	0,000	0,012	0,010	0,005	-0,004	0,024
	Indireto via LS	0,005	0,000	0,005	0,001	-0,002	0,009	0,017
	Total	0,084	0,063	-0,031	-0,018	0,048	-0,086	0,061

Continuação da Tabela 4

CG	Direto	-0,028	0,000	-0,221	-0,181	-0,093	0,073	-0,449
	Indireto via AE	-0,051	0,076	-0,009	-0,026	-0,026	0,002	-0,034
	Indireto via PR	0,037	0,000	0,005	0,005	0,013	0,015	0,074
	Indireto via CS	-0,003	-0,002	0,003	0,001	-0,002	0,006	0,002
	Indireto via LS	-0,047	0,000	-0,048	-0,012	0,021	-0,082	-0,167
	Total	-0,092	0,075	-0,271	-0,213	-0,087	0,014	-0,574
LG	Direto	-0,091	0,000	-0,094	-0,023	0,041	-0,160	-0,325
	Indireto via AE	-0,020	0,030	-0,004	-0,010	-0,011	0,001	-0,013
	Indireto via PR	0,026	0,000	0,003	0,003	0,009	0,011	0,053
	Indireto via CS	-0,004	-0,002	0,003	0,001	-0,002	0,006	0,002
	Indireto via LS	-0,014	0,000	-0,114	-0,093	-0,048	0,038	-0,231
	Total	-0,102	0,029	-0,205	-0,122	-0,011	-0,104	-0,515

CO = ciclo, AP = altura de planta; M100 = massa de cem grãos; PG = produtividade de grãos; EG = espessura do grão; AE = altura da espiga superior; DC = diâmetro do colmo; PR = prolificidade; CG = comprimento do grão; LG = largura do grão. ER = Efeito Residual

CONCLUSÕES

1. Há dificuldades em se obter cultivares de milho-pipoca que associem elevada capacidade de expansão e produtividade de grãos;
2. A massa de 100 grãos e a produtividade de grãos de milho-pipoca são as variáveis com maior associação, porém contrária, para com capacidade de expansão do grão;
3. O comprimento e largura do grão de milho-pipoca têm influência direta negativa e a espessura do grão positiva sobre a capacidade de expansão.

REFERÊNCIAS

- AMARAL JUNIOR, A. T. *et al.* Improvement of a popcorn population using selection indexes from a fourth cycle of recurrent selection program carried out in two different environments. **Genetics and Molecular Research**, v. 9, n. 1, p. 340-370, 2010.
- BROCCOLI, A. M.; BURAK, R. Effect of genotype x environment interactions in popcorn maize yield and grain quality. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 2, n. 1, p. 85-91, 2004.
- CARPENTIERI-PÍPOLO, V. *et al.* Correlações entre caracteres quantitativos em milho pipoca. **Horticultura Brasileira**, v. 20, n. 4, p. 551-554, 2002.
- COIMBRA, J. L. M. *et al.* Consequências da multicolinearidade sobre a análise de trilha em canola. **Ciência Rural**, v. 35, n. 2, p. 347-352, 2005.
- CRUZ, C. D. GENES: a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 35, n. 3, p. 271-276, 2013.
- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 4. ed. Viçosa: Editora UFV, 2012. 514p.
- DAROS, M. *et al.* Correlations among agronomic traits in two recurrent selection cycles in popcorn. **Ciência Rural**, v. 34, n. 5, p. 1389-1394, 2004.
- FALCONER, D. S. **Introduction to quantitative genetics**. 3 ed. New York: Longman, 1981. 489 p.
- FERREIRA, A. *et al.* Utilização de *bootstrap* não-paramétrico para avaliação de correlações fenotípicas, genotípicas e ambientais. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 30, n. 5, p. 647-663, 2008.
- FREITAS JÚNIOR, S. P. *et al.* Capacidade combinatória em milho-pipoca por meio de dialelo circulante. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 11, p. 1599-1607, 2006.
- FREITAS JÚNIOR, S. P. *et al.* Predição de ganhos genéticos na população de milho-pipoca UNB-2U sob seleção recorrente utilizando-se diferentes índices de seleção. **Semina**, v. 30, n. 4, p. 803-814, 2009.
- FREITAS JÚNIOR, S. P. **Seleção recorrente entre famílias de irmãos completos em geração avançada da população UNB-2U de milho pipoca**. 2008. 96 f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Centro de Ciências e Tecnologias Agrárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2008.
- HALLAUER, A. R.; CARENA, M. J.; MIRANDA FILHO, J. B. **Quantitative genetics in maize breeding**. New York: Springer, 2010. 580 p.

- HOSENEY, R.C.; ZELEZNAK, K.; ADELRAHMAN, A. Mechanism of popcorn popping. **Journal Cereal Science**, v.1, n. 1, p.43-52, 1983.
- LI, C. C. The concept of path coefficient and its impact on population genetics. **Biometrics**, v. 12, n. 2, p. 190-210, 1956.
- LYERLY, P.J. Some genetic and morphological characters affecting the popping expansion of popcorn. **Journal American Society of Agronomy**, v. 34, n. 2, p. 986-995, 1942.
- PAJIC, Z. *et al.* Popping volume and grain yield in diallel set of popcorn inbred lines. **Genetika**, v. 40, n. 3, p. 249 -260, 2008.
- RANGEL, R. M. *et al.* Análise biométrica de ganhos por seleção em população de milho-pipoca de quinto ciclo de seleção recorrente. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 2, p. 473-481, 2011.
- SANTOS, F. S. *et al.* Predição de ganhos genéticos por índices de seleção na população de milho-pipoca UNB-2U sob seleção recorrente. **Bragantia**, v. 66, n. 4, p. 389-396, 2007.
- SCAPIM, C. A. *et al.* Componentes genéticos de medidas e depressão por endogamia em populações de milho-pipoca. **Ciência Rural**, v. 36, n. 1, p. 36-41, 2006.
- SCAPIM, C. A. *et al.* Correlations between the stability and adaptability statistics of popcorn cultivars. **Euphytica**, v. 1174, n. 2, p. 209-218, 2012.
- SCHMILDT, E. R.; KRAUSE, W.; CRUZ, C. D. Melhoria na eficiência dos experimentos de indicação de cultivares de milho. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, n. 1, p. 72-80, 2006.
- VIEIRA, R. A. *et al.* Agronomic performance of new popcorn hybrids in Northwestern Paraná State, Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n.1, p. 29-36, 2009b.
- VIEIRA, R. A. *et al.* Heterotic parametrization for economically important traits in popcorn. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 3, p. 411-419, 2009a.
- VITTORAZZI, C. *et al.* Selecting pre-cultivars of popcorn maize based on nonparametric indices. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 2, p. 356-362, 2013.