

Relações entre componentes de rendimento e características morfológicas de milho

Tadeu Vilela de Souza¹; Camila Marques Ribeiro¹; João Domingos Scaloni¹; Fernando Lisboa Guedes²

¹ Universidade Federal de Lavras, *Campus* Universitário, Caixa Postal 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG, Brasil. E-mails: tadeu_vil_souza@yahoo.com.br; camila.cbra2@gmail.com

² Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Caprinos e Ovinos Estrada Sobral/ Groaíras km 04 Zona Rural Caixa-postal 145 CEP 62010-970, Sobral, CE, Brasil. Emails: fbrguedes@yahoo.com.br

Resumo: O objetivo desse trabalho foi identificar por meio da análise de trilha, quais caracteres da planta de milho possuem maior contribuição para a sua produtividade de grãos, visando identificar os caracteres mais indicados à seleção indireta para a produtividade, pois este é um caráter complexo e resultante da expressão e associação de diferentes componentes. O experimento foi conduzido na fazenda experimental da Universidade Federal de Lavras, em Lavras. Foram escolhidas cinco linhagens de milho do Programa de Melhoramento da UFLA, obtidas pela autofecundação de híbridos existentes no mercado, obtendo-se 15 tratamentos genéticos. O delineamento utilizado foi o de blocos completos ao acaso com quatro repetições. Os seguintes caracteres foram avaliados: altura de planta (AP), altura de espiga (AE), diâmetro do colmo (DC), peso de 100 grãos (P100), peso total de grãos (PT), número de grãos por planta (NGP) e produção de grãos por planta (PROD). A análise de trilha mostrou que o peso de 100 grãos foi o componente primário que apresentou o maior efeito direto sobre a produção de grãos (PROD), sendo assim, o mais indicado para seleção indireta para a PROD. A mesma análise mostrou que a altura de espiga foi o componente secundário mais influente na variação da PROD.

Palavras chave: Análise de trilha, *Zea mays* L., Multicolinearidade.

Relationships between yield components and morphological characteristics of maize

Abstract: The objective of this study was to identify through path analysis, which plant traits of maize have greater contribution to the grain yield, to identify the most suitable character for indirect selection for yield, because this is a complex character and the resulting expression and association of different components. The experiment was conducted at the Experimental Farm of the Federal University of Lavras. Five strains of corn were selected from Breeding Program of UFLA, obtained by selfing of existing hybrids in the market, resulting in 15 genetic treatments. The experimental design was a randomized complete block design with four replications. The following characters were evaluated: plant height (AP), ear height (AE), stem diameter (DC), 100 kernels weight (P100), total kernels weight (PT), number of kernels per plant (NGP) and grain production per plant (PROD). The 100 kernels weight was the component that had the highest direct effect on grain yield, being thus, the most suitable for indirect selection for grain yield. The ear height was the secondary component most influential in the variation of Summary: The aim of this study was to identify through path analysis, which corn plant traits have greater contribution to its yield, to identify the characters more suitable to indirect selection for productivity, because this is a complex character and the resulting expression and association of different components. The experiment was conducted at the experimental farm of the Federal University of Lavras. Five strains of corn were chosen Improvement Program UFLA, obtained by selfing of existing hybrids on the market, resulting in 15 genetic treatments. The design was a randomized complete block design with four replications. The following traits were evaluated: plant height (PH), ear height (AE), stem diameter (DC), weight of 100 grains (P100), total grain weight (PT), number of grains per plant (NGP) and grain yield per plant (PROD). Path analysis showed that the 100-grain weight was the primary component that had the highest direct effect on grain production (PROD), so the most

suitable for indirect selection to PROD. The same analysis has shown that the ear height was the most influential on the variation of the secondary component PROD. PROD.

Key words: Path analysis, *Zea mays* L., Multicollinearity.

Introdução

Na cultura do milho, a produtividade de grãos é um caráter complexo resultante da expressão e associação de diferentes componentes, sendo, portanto, afetada por quase todos os demais caracteres da planta. Dessa forma, o rendimento de grãos é um caráter de baixa herdabilidade, pois a herança genética resultante é muito complexa devido a atuação de vários genes. Assim, nas fases iniciais de um programa de melhoramento, a utilização de seleção indireta de plantas mais produtivas, por resposta correlacionada de outros caracteres menos complexos, pode permitir maior eficiência e progresso na seleção (RIOS et al., 2012).

A análise da correlação entre caracteres de milho têm sido tema de estudo em diversos trabalhos objetivando encontrar caracteres que sejam mais relacionados com a produtividade de grãos. Entretanto, deve-se ressaltar que esse estudo de correlações não permite tirar conclusões sobre relações de causa e efeito, ou seja, a correlação é apenas uma medida de associação.

Pela importância de se conhecer as relações de causa e efeito, Wright (1921) desenvolveu a análise de trilha ("*path analysis*"), a qual desdobra as correlações, entre cada par de variáveis de um conjunto, em efeitos diretos e indiretos. Dessa forma, é possível quantificar a influência direta de uma variável sobre a outra, independente das demais, no contexto de causa e efeito.

Segundo Ribeiro (2012), existe uma hierarquia na influência dos caracteres do milho na sua produtividade. O número de grãos por planta (NGP) e o peso de 100 grãos (P100) são os caracteres que estão diretamente associados à produtividade de grãos. Esses caracteres são denominados componentes primários da produção. Lopes et al. (2007) afirmam que o peso de grãos é um dos componentes determinantes do rendimento de grãos de milho, que apresenta

relações complexas com várias características morfológicas da espiga.

Utilizando análise de trilha, Carvalho et al. (2001) estudando híbridos de milho, concluíram que os caracteres que mais contribuíram para a produção por planta foram o número de espigas por planta e o peso do grão. Mohammadi et al. (2003) observaram que o peso do grão e o número de grãos por espiga foram os componentes mais importantes na predição do rendimento de grãos. Outros autores como Ivanovic e Rosic (1985), Ottaviano e Camussi (1981), Balbinot Jr et al. (2005), também estudaram os efeitos diretos e indiretos entre a produtividade do milho e seus componentes primários, ou seja, a relação entre componentes de rendimento e produtividade. Porém, observa-se que não são consideradas as relações entre as características secundárias (caracteres morfológicos) e as características primárias da planta.

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo utilizar a análise de trilha para identificar os caracteres primários e secundários da planta do milho que mais contribuem para a sua produtividade de grãos, para determinar a importância relativa de cada um deles na determinação dessa produtividade.

Material e métodos

O experimento foi conduzido na fazenda experimental da Universidade Federal de Lavras, em Lavras, a 951 m de altitude, nas coordenadas 44° 58' longitude Oeste e 21° 12' latitude Sul. Foram escolhidas cinco linhagens de milho (*Zea mays* L.) do programa de melhoramento da UFLA, obtidas pela autofecundação de híbridos existentes no mercado. O critério da escolha das mesmas foi o tamanho dos grãos, sendo três de grãos grandes e duas de grãos pequenos. Foram realizados cruzamentos entre as linhagens no

esquema de dialelo completo gerando 15 híbridos simples, totalizando assim, 15 genótipos avaliados. Os cruzamentos foram realizados seguindo um esquema de dialelo completo na safra de 2009/2010. O delineamento utilizado foi o de blocos completos ao acaso com quatro repetições. As parcelas eram constituídas de duas linhas de 2,0 m de comprimento, com espaçamento entre linhas de 0,6 m e quatro plantas por metro linear.

As operações de manejo recomendadas para a cultura foram realizadas a fim de proporcionar as melhores condições para o desenvolvimento das plantas. A adubação no momento da semeadura foi efetuada com o equivalente a 350 kg/ha da formulação (N , P_2O_5 , K_2O), 200 kg/ha de sulfato de amônio no estágio fenológico V_3 e 130 kg/ha de ureia no estágio fenológico V_6 . Os demais tratos culturais foram os recomendados para a cultura na região.

No final do período do florescimento masculino, foram realizadas medições de cinco plantas competitivas no interior da parcela para altura de planta (AP), em metros, considerando a distância do solo ao ponto de inserção da folha bandeira, altura de espiga (AE), em metros, considerando a distância do nível do solo até inserção da espiga superior formada no colmo e o diâmetro do colmo (DC), em centímetros, do primeiro entrenó do colmo acima do solo, utilizando-se um paquímetro digital. Esses são caracteres morfológicos que podem se refletir no potencial produtivo do milho, Rufino et al. (2012).

No momento da colheita, foram colhidas individualmente as espigas de cinco plantas na parcela para a obtenção da produtividade de grãos por planta (PROD). De cada planta, após a trilha das espigas, foram obtidos o peso de 100 grãos (P100), peso total de grãos da espiga (PT) e o número de grãos por planta (NGP), o qual foi estimado por regra de três a partir dos dados do P100 e PROD. Maiores detalhes sobre o experimento e a coleta de dados podem ser vistos em Ribeiro (2012).

A utilização da análise de trilha depende do conjunto de caracteres estudados, sendo indispensável à elaboração de um diagrama de causa e efeito, que exhibe graficamente o padrão

de hipótese das relações de causa e efeito entre um conjunto de variáveis.

A escolha do diagrama foi feita com a combinação de dois critérios: o conhecimento *a priori* das relações entre as variáveis em estudos (ou hipótese considerada de causa e efeito nessas variáveis) e o método da correlação parcial (GOLDSMITH, 1977). Primeiro, foram estabelecidas, seguindo um conhecimento prévio dos caracteres, as hipóteses de relações de causa e efeito entre as variáveis e foi feita a construção gráfica do diagrama causal para possibilitar um melhor entendimento das equações que darão origem aos coeficientes de trilha. Após essa pré-definição do diagrama, foi aplicado o método da correlação parcial nas variáveis envolvidas no modelo com o objetivo de verificar a consistência dessa formulação de causas e efeitos. De acordo com esse critério, se a diferença entre r_{ij} (correlação linear simples entre as variáveis X_i e X_j) e $r_{ij.k}$ (correlação parcial linear entre X_i e X_j , controlando para X_k) é alta, então pode ser aceito que X_k participa da trilha causal entre X_i e X_j (GOLDSMITH, 1977). Essa diferença é escrita da seguinte forma:

$$|r_{ij} - r_{ij.k}| = \Delta_{ij} \quad (1)$$

A significância estatística de 1 pode ser avaliada pela transformação de Fisher (1932) dada por:

$$z = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+r}{1-r} \right) \quad (2)$$

que é aproximadamente normal com média

igual a $\mu(z) = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{1+r}{1-r} \right] + \frac{r}{2n-1}$ e com

variância igual a $\sigma(z) = \frac{1}{\sqrt{(n-3)}}$, sendo que n

é o número de observações independentes.

Segundo Vasconcelos et al. (1998), a equação 2 permite a classificação dos Δ_{ij} , de acordo com intervalos de desvio padrão. Na prática, se $\Delta_{ij} < \sigma$, implica que X_k não

influencia a relação entre X_i e X_j , enquanto que se $\Delta_{ij} < 2\sigma$ implica que X_k é uma parte importante dessa relação.

No diagrama (Figura 1), as setas unidirecionais indicam os efeitos diretos de cada variável explicativa (independente) sobre uma variável básica (dependente), enquanto as bidirecionais representam a interdependência das variáveis explicativas (KLINE, 2011).

Os parâmetros dos modelos estabelecidos utilizando o diagrama foram estimados pelo método dos mínimos quadrados ordinários quando não foi constatada a multicolinearidade entre as variáveis independentes. Mas, sendo a análise de trilha uma forma de regressão múltipla, com base em matrizes de correlação, a presença de multicolinearidade entre as variáveis independentes ocasiona problemas nas estimativas dos coeficientes de trilha, impossibilitando a utilização dos estimadores de mínimos quadrados ordinários. Nessa situação, diversos autores como Toebe e Cargnelutti Filho (2013), Espósito (2010), Oliveira et al. (2010) e Rios et al. (2012) utilizaram a regressão em crista, proposta por Hoerl e Kennard (1970), para a estimação dos coeficientes de trilha e obtiveram resultados satisfatórios. Dessa forma, na existência de multicolinearidade utilizou-se esta metodologia e os coeficientes de trilha foram obtidos pela solução da equação $(X'X + cI)\beta^* = X'Y$, em que $X'X$ é a matriz de correlações entre as variáveis independentes do modelo de regressão; c é uma pequena quantidade adicionada aos elementos da diagonal da matriz $X'X$; I é a matriz identidade; β^* é o vetor dos estimadores dos coeficientes de trilha; e $X'Y$ é a matriz de correlações entre a variável dependente com cada variável independente do modelo de regressão.

O grau de multicolinearidade da matriz singular $X'X$ foi estabelecido com base no seu número de condição (NC), definido em Montgomery et al. (2012) como sendo a razão entre o maior e o menor autovalor não nulo da matriz $X'X$. Se $NC < 100$, a multicolinearidade é tida como fraca e não constituiu problema sério

na análise. Se $100 \leq NC < 1000$, a multicolinearidade é considerada de moderada a forte, e se o $NC \geq 1000$ é indicativo de multicolinearidade severa.

Depois de estimados os parâmetros, alguns pressupostos iniciais sobre os resíduos gerados devem ser atendidos para verificar a adequabilidade do modelo. Dessa forma, foi feita a análise dos resíduos, e as pressuposições iniciais (normalidade, independência, homocedasticidade dos resíduos) foram testadas e avaliadas por testes de hipóteses. E a detecção de existência de pontos influentes foi feita por análise gráfica através da distância de cook. Todos esses testes estão implementados no software R (R Development Core Team, 2013).

As estimativas das correlações foram obtidas usando o estimador da correlação linear de Pearson (STEEL et al., 1997), considerando como valores nas variáveis a média de cada tratamento dos experimentos. Por fim, foram feitas todas as inferências possíveis analisando os efeitos diretos e indiretos das variáveis explicativas sobre a variável básica.

Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando funções desenvolvidas no software R (R Development Core Team, 2013) e outras funções disponíveis nas bibliotecas *agricolae*, *MASS*, *ppcor* e *car* desse mesmo software.

Resultados e discussão

Foi considerada uma análise de trilha em cadeia (Figura 1). Foi tomada como variável dependente a produção de grãos (PROD), como variáveis primárias o peso total de grãos (PT), peso de 100 grãos (P100) e número de grãos por planta (NGP) e como variáveis secundárias a altura da planta (AP), altura de espiga (AE) e diâmetro do colmo (DC). Na Tabela 1, estão os valores das correlações entre cada par de variáveis em estudo. Percebe-se que as variáveis primárias apresentaram fortes correlações positivas e estatisticamente significativas com a variável básica PROD. Esse resultado era esperado uma vez que os componentes primários

são aqueles diretamente relacionados com a produção de grãos (LENG, 1954). Altas correlações também foram encontradas entre as variáveis primárias indicando a possível existência de multicolinearidade entre essas variáveis. As variáveis secundárias apresentaram correlações moderadas com a variável básica, e algumas correlações não significativas entre elas, indicando a não existência de multicolinearidade.

Para verificar a consistência da formulação

desse diagrama aplicou-se o método da correlação parcial (Tabela 2), em que foi possível verificar que todas as variáveis que compõem o primeiro diagrama causal desempenham uma parte importante nessa relação.

Primeiramente, estudou-se a relação entre as variáveis primárias e a variável básica, diagrama da Figura 2.

Figura 1 - Diagrama causal em cadeia, no qual a produção de grãos (PROD) é a variável básica, o peso de 100 grãos (P100), peso total de grãos (PT), e número de grãos por planta (NGP) são as variáveis primárias, e a altura da planta (AP), altura de espiga (AE) e diâmetro do colmo (DC) são as variáveis secundárias.

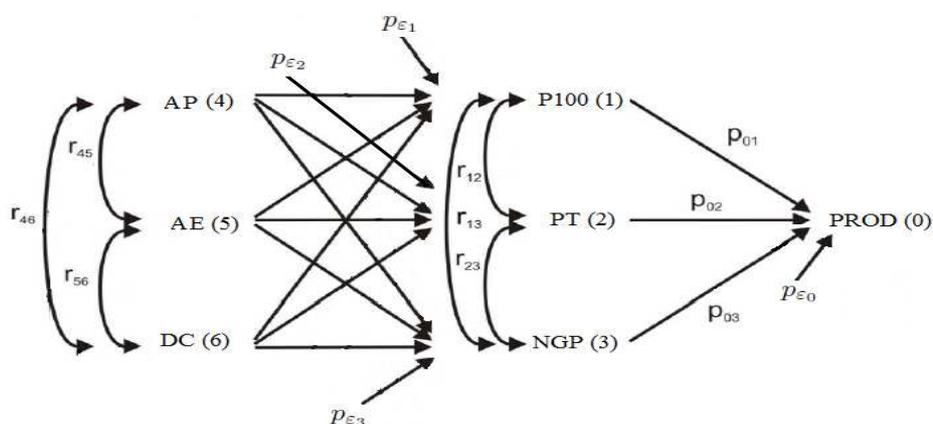
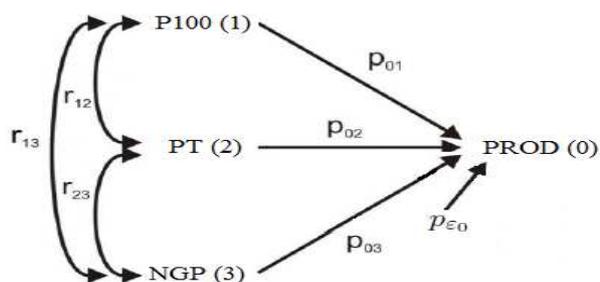


Tabela 1 - Correlações simples entre as variáveis peso de 100 grãos (P100), peso total de grãos da espiga (PT), número de grãos por planta (NGP), altura da planta (AP), altura de espiga (AE), diâmetro do colmo (DC) e produtividade de grão por planta (PROD).

	P100	PT	NGP	AP	AE	DC	PROD
P100	1						
PT	0,918*	1					
NGP	0,722**	0,932**	1				
AP	0,601*	0,631*	0,555*	1			
AE	0,564*	0,520*	0,433	0,340	1		
DC	-0,409	-0,543*	-0,618*	-0,315	-0,127	1	
PROD	0,922**	0,945**	0,831**	0,582*	0,608*	-0,584*	1

Significativo pelo teste de t , * valor- $p < 0,05$ e ** valor- $p < 0,01$.

Figura 2 - Primeiro diagrama causal da análise de trilha em cadeia**Tabela 2** - Resultado do método da correlação parcial entre a variável produtividade de grãos por planta (PROD) e as variáveis explicativas peso de 100 grãos (P100), peso total de grãos da espiga (PT) e número de grãos por planta, para o primeiro modelo (Figura 2).

Cor. Parcial	$\Delta_{0,i} (i=1,2,3)$	Resultados
$r_{01.23}$	0,826	$> 2\sigma$
$r_{02.13}$	0,716	$> 2\sigma$
$r_{03.12}$	0,907	$> 2\sigma$

$\sigma = 0,288$

Avaliando a multicolinearidade entre as variáveis explicativas desse diagrama por meio do número de condição obteve-se ($NC = 813$), ou seja, existe a presença de uma multicolinearidade de grau moderado a severo. Dessa forma, como não foi interessante retirar uma variável dessa relação para tentar se evitar a multicolinearidade foi utilizada a regressão em crista para a estimação dos coeficientes do modelo. O valor adequado referente à constante c foi determinado, neste ensaio, pelo exame do traço da crista (HOERL; KENNARD, 1970). O traço da crista foi obtido plotando as estimativas dos parâmetros (coeficientes de trilha) em função dos valores de c no intervalo de $0 < c < 1$ (Figura 3). O menor valor de c capaz de estabilizar a maioria dos estimadores dos coeficientes de trilha foi empregado.

Adotando-se o valor $c = 0,4$, foi possível verificar uma diminuição da soma de quadrado dos resíduos, em relação ao modelo com os coeficientes estimados pelo método dos mínimos

quadrados ordinários. Depois de estimar os coeficientes, foi feita a análise dos resíduos, em que a independência foi confirmada pelo teste de Durbin Watson (valor $-p > 0,05$); a normalidade pôde ser verificada usando o teste de normalidade Shapiro-Wilk (valor $-p > 0,05$); e também se verificou a homocedasticidade pelo teste de Breusch-Pagan (valor $-p > 0,05$). Pela distância de *cook* foi verificada a não existência de pontos influentes. Os coeficientes de trilha, diretos e indiretos, das variáveis explicativas sobre produção encontram-se na Tabela 3.

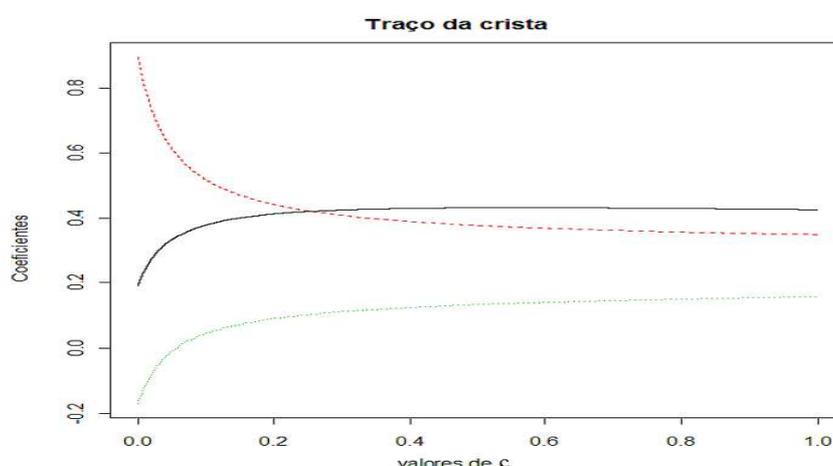
Pode-se verificar pelo coeficiente de determinação ($R_{0,123}^2$) que estas variáveis explicaram 89,1% da variação da produção de grãos. As variáveis P100 e PT apresentaram efeitos diretos semelhantes, 0,446 e 0,404 respectivamente, e maiores que o efeito residual sobre a variável básica PROD sendo, dessa forma, as principais determinantes sobre a produção de grãos. Foram também essas

variáveis as que apresentaram as maiores correlações com PROD, indicando que são realmente as mais relacionadas com PROD.

Segundo Ribeiro (2012), o número de grãos por planta (NGP) e o peso de 100 grãos (P100) são os que estão mais diretamente associados à produtividade de grãos. Essa constatação corrobora com Lopes et al. (2007), que obtiveram resultados semelhantes, em que espigas com maior P100 tiveram efeito direto sobre o aumento da produtividade de grãos.

O efeito indireto de P100 via PT e o efeito indireto de PT via P100 sobre PROD também foram altos e maiores do que o efeito residual, reforçando a importância dessas duas variáveis em relação a variação da produção de grãos. O que está de acordo com Ottaviano e Camussi (1981), que em seu trabalho, utilizando análise de trilha, verificaram que existe um elevado efeito de componentes de rendimento sobre a produtividade de grãos em milho.

Figura 3 - Gráfico do traço da crista, que representa a variação no valor dos coeficientes da regressão com diversos valores de c .



A variável NGP apresentou uma razoável correlação positiva com a variável básica, porém seu efeito direto não foi considerável. Dessa forma, verifica-se que essa correlação ocorreu por influência de P100 e PT, pois os efeitos indiretos via essas duas variáveis foram altos.

Existe também grande interesse em verificar os efeitos dos componentes considerados como secundários sobre os primários (RODRIGUES et al., 2010). Dessa forma, foi analisada a segunda parte do diagrama causal em cadeia (Figura 4), que é composta por três modelos, em que as variáveis primárias são consideradas como variáveis dependentes. Pelo método da correlação parcial (Tabela 4), percebe-se que as

variáveis que compõem os três modelos não justificam os relacionamentos propostos em cada um desses modelos, ou seja, as variáveis secundárias muito possivelmente não explicam a variação de cada uma das variáveis primárias. Dessa forma, com objetivo comprobatório, os três modelos foram ajustados, e foram estimados os seus efeitos diretos e indiretos.

A multicolinearidade entre as variáveis independentes foi testada pelo número de condição, sendo encontrada uma multicolinearidade fraca ($NC = 3$). Assim os coeficientes de cada modelo que compõem esse diagrama foram estimados pelo método dos mínimos quadrados ordinários.

Tabela 3 - Estimativa dos efeitos diretos e indiretos das variáveis primárias sobre a variável básica produção de grãos (PROD).

Variáveis Primárias	Vias de associação	Estimador	Estimativa
P100	Efeito direto sobre PROD	\hat{p}_{01}	0,446
	Efeito indireto via PT	$\hat{p}_{02}r_{12}$	0,367
	Efeito indireto via NGP	$\hat{p}_{03}r_{13}$	0,110
	Total	r_{01}	0,920
PT	Efeito direto sobre PROD	\hat{p}_{02}	0,404
	Efeito indireto via P100	$\hat{p}_{01}r_{12}$	0,408
	Efeito indireto via NGP	$\hat{p}_{03}r_{23}$	0,128
	Total	r_{02}	0,940
NGP	Efeito direto sobre PROD	\hat{p}_{03}	0,128
	Efeito indireto via P100	$\hat{p}_{01}r_{13}$	0,327
	Efeito indireto via PT	$\hat{p}_{02}r_{23}$	0,375
	Total	r_{03}	0,830
$R^2_{0,123}$			0,891
Efeito residual (\hat{p}_ε)			0,329

Figura 4 - Segundo diagrama causal da análise de trilha em cadeia, em que as variáveis altura da planta (AP), altura de espiga (AE) e diâmetro do colmo são explicativas, e o peso de 100 grãos (P100), peso total de grãos da espiga (PT) e o número de grãos por planta (NGP) são variáveis resposta.

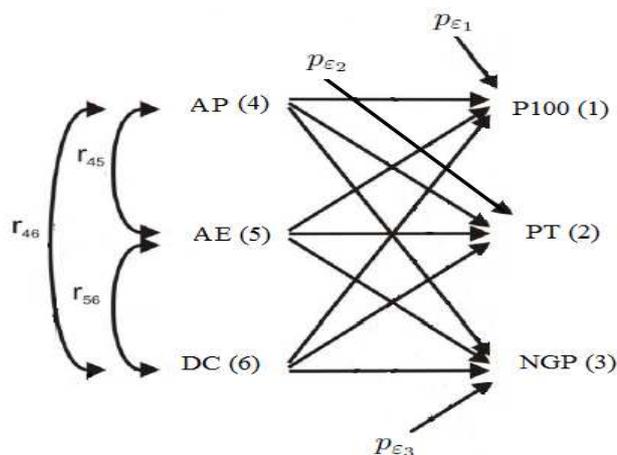


Tabela 4 - Resultados do método da correlação parcial considerando os três modelos, em que as variáveis P100, PT e NGP são variáveis dependentes, e as variáveis AP, AE e DC são variáveis explicativas.

Var. dependente	Cor. Parcial	$\Delta_{1,i} (i = 4, 5, 6)$	Resultados
P100	$r_{14,56} = 0,467$	0,132	$< 2\sigma$
	$r_{15,46} = 0,494$	0,065	$< 2\sigma$
	$r_{16,45} = -0,318$	0,091	$< 2\sigma$
$\Delta_{2,i} (i = 4, 5, 6)$			
PT	$r_{24,56} = 0,507$	0,122	$< 2\sigma$
	$r_{25,46} = 0,462$	0,057	$< 2\sigma$
	$r_{26,45} = -0,504$	0,035	$< 2\sigma$
$\Delta_{3,i} (i = 4, 5, 6)$			
NGP	$r_{34,56} = 0,400$	0,149	$< 2\sigma$
	$r_{35,46} = 0,363$	0,066	$< 2\sigma$
	$r_{36,45} = -0,584$	0,025	$< 2\sigma$
$\sigma = 0,288$			

A análise dos resíduos dos três modelos ajustados, considerando cada uma das variáveis P100, PT e NGP como dependente, foi realizada e todos os pressupostos da análise de resíduos (normalidade, independência e homocedasticidade) foram satisfatórios (valor $-p > 0,05$), e também foi verificada a não existência de pontos influentes.

As estimativas dos efeitos diretos e indiretos das variáveis secundárias sobre as variáveis primárias se encontram na Tabela 5. Percebe-se, pelo coeficiente de determinação de cada modelo que as variáveis secundárias não explicaram de maneira satisfatória a variação de cada variável primária, confirmando que o teste da correlação parcial foi pertinente. Ainda, percebe-se que todas as estimativas foram menores que o efeito residual, ou seja, os efeitos diretos e indiretos das variáveis secundárias sobre as primárias não foram interessantes. Quando se analisou os efeitos diretos e indiretos dos componentes secundários sobre a variável principal (Tabela 6), verificou-se que as variáveis

secundárias AP e AE apresentaram maiores efeitos diretos que a variável DC sobre a produção de grãos, e valores aproximadamente iguais. E todas as variáveis apresentaram efeitos indiretos baixos sobre a produção de grãos.

A variável AE foi a que apresentou a maior correlação com PROD, podendo ser considerada a mais determinante na variação da produção de grãos. Churata e Ayala-Osuna (1996) também encontraram um resultado semelhante, em que a altura de espiga foi uma das variáveis explicativas mais fortemente relacionada com a produção, com um efeito direto de 0,39. Bello et al. (2009) concluíram que, dentre outras características, a altura de espiga é um parâmetro agrônomo importante que deve ser considerado como critério de seleção indireta para híbridos de alto rendimento de grãos.

Esses resultados, quando comparados com outros trabalhos citados no texto tornam-se conclusivos, pois há uma semelhança entre os mesmos.

Tabela 5 - Efeitos diretos e indiretos das variáveis secundárias, altura da planta (AP), altura de espiga (AE) e diâmetro do colmo (DC) sobre as variáveis primárias peso de 100 grãos (P100), peso total de grãos da espiga (PT) e número de grãos por planta (NGP).

Variáveis Secundárias	Vias de associação	Variáveis primárias		
		P100	PT	NGP
AP	Efeito direto sobre	0,390	0,397	0,316
	Efeito indireto via AE	0,134	0,114	0,088
	Efeito indireto via DC	0,076	0,118	0,155
	Total	0,600	0,630	0,550
AE	Efeito direto sobre	0,396	0,336	0,259
	Efeito indireto via AP	0,132	0,136	0,108
	Efeito indireto via DC	0,040	0,048	0,063
	Total	0,560	0,520	0,430
DC	Efeito direto sobre	-0,233	-0,369	-0,484
	Efeito indireto via AP	-0,124	-0,127	-0,101
	Efeito indireto via AE	-0,051	-0,044	-0,033
	Total	-0,400	-0,540	-0,061
R^2		0,552	0,626	0,589
Efeito residual (\hat{p}_ε)		0,660	0,610	0,640

Tabela 6 - Efeitos diretos e indiretos das variáveis secundárias altura da planta (AP), altura de espiga (AE) e diâmetro do colmo (DC) sobre a variável básica produtividade de grãos por planta (PROD).

Variáveis Secundárias	Vias de associação	Variáveis primárias			Total dos Efeitos
		P100	PT	NGP	
AP	Efeito direto sobre	0,174	0,160	0,040	0,375
	Efeito indireto via AE	0,060	0,046	0,011	0,117
	Efeito indireto via DC	0,032	0,047	0,020	0,099
	r_{04}				0,594
AE	Efeito direto sobre	0,176	0,145	0,054	0,375
	Efeito indireto via AP	0,070	0,064	0,023	0,157
	Efeito indireto via DC	0,023	0,029	0,008	0,060
	r_{05}				0,591
DC	Efeito direto sobre	-0,114	-0,150	-0,081	-0,345
	Efeito indireto via AP	-0,064	-0,070	-0,022	-0,156
	Efeito indireto via AE	-0,032	-0,037	-0,004	-0,073
	r_{06}				-0,570

Conclusão

A análise de trilha, ao utilizar o desdobramento em efeitos diretos e indiretos das correlações entre a produtividade e caracteres avaliados em plantas, pode ser uma metodologia estatística importante no melhoramento genético para identificar os caracteres primários e secundários que mais contribuem para a produtividade. A aplicação dessa metodologia em dados de cinco linhagens de milho híbrido levou a conclusão que o peso de 100 grãos foi o componente de rendimento que apresentou o maior efeito direto sobre a produção de grãos (PROD), sendo assim, o mais indicado para seleção indireta para a PROD. A característica morfológica altura de espiga (AE) foi a mais influente na variação da PROD sendo, portanto, o componente secundário de maior relevância na seleção indireta para a PROD.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG pela bolsa concedida ao primeiro autor.

Referências

- BALBINOT JR, A. A. et al. Contribuição de componentes de rendimento na produtividade de grãos em variedades de polinização aberta de milho. **Revista Brasileira de Agrociência**. Pelotas, v. 11, n. 2, p. 161-166, 2005.
- BELLO, O. B. et al. Correlation and path coefficient analysis of yield and agronomic characters among open pollinated maize varieties and their F_1 hybrids in a diallel cross. **African Journal of Biotechnology**, v. 9, n. 18, p. 2633-2639, 2010.
- CARVALHO, C. G. P. et al. Path analysis under multicollinearity in S0 x S0 maize hybrids. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.1, n.3, p.263-270, 2001.
- CHURATA, B. G. M.; AYALA-OZUNA, J. T. Correlações genotípica, fenotípica e de ambiente e análise de trilha em caracteres avaliados no composto de milho (*Zea mays*) arquitetura. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 43, n. 249, p. 628-636, 1996.
- ESPÓSITO, D. C. **Análise de trilha em dados de produção e tecnológicos de cana-de-açúcar**. 2010. 102 p. Dissertação (Mestrado em Estatística Aplicada e Biometria) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.
- FISHER, R. A. **Statistical methods for research workers**. . 4^{ed} ed. London: Oliver e Boyd, 1932. 307 p.
- GOLDSMITH, J. R. Paths of association in epidemiological analysis: application of a procedure to health effects of environmental exposures. **International Journal of Epidemiology**, Oxford, v. 6, n. 4, p. 391-399, 1977.
- HOERL, A. E.; KENNARD, R. W. Ridge regression: applications to nonorthogonal problems. **Technometrics**, Washington, v. 12, n. 1, p. 69-82, 1970.
- IVANOVIC, M.; ROSIC, K. Path coefficient analysis for three stalk traits and grain yield in maize (*Zea mays* L.). **Maydica**, Bergamo, v. 30, p. 233-239, 1985.
- KLINE, R. B. **Principles and practice of structural equation modeling**. 3^{ed} ed. New York: The Guilford Press, 2011. 427 p.
- LENG, E. R. Effects of heterosis on the major components of grain yield in corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 46, n. 11, p. 502-506, 1954.
- LOPES, S. J. et al. Relações de causa e efeito em espigas de milho relacionadas aos tipos de híbridos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 6, p. 1536-1542, 2007.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINNING, G.G. **Introduction to linear regression analysis**. 5nd ed. New York: John Wiley, 2012. 672 p.

MOHAMMADI, S.A.; PRASANNA, B.M.; SINGH, N.N.. Sequential path model for determining interrelationship among grain yield related characters in maize. **Crop Science**, Madison, v.43, n.5, p.690-1697, 2003.

OLIVEIRA, E. D. et al. Correlações genéticas e análise de trilha para número de frutos comerciais por planta em mamoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 8, p. 855-862, ago. 2010.

OTTAVIANO, E.; CAMUSSI, A. Phenotypic and genetic relationships between yield components in maize. **Euphytica**, Milano, v. 30, n. 3, p. 601-609, 1981.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2013. Disponível em: <http://www.r-project.org>. Acesso em: 10 out. 2013.

RIBEIRO, C. B. **Caracteres que explicam a heterose na produtividade de grãos de milho**. 2012. 64 p. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

RIOS, S. A. et al. Análise de trilha para carotenoides em milho. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 59, n. 3, p. 368-373, 2012.

RODRIGUES, G. B et al. Análise de trilha de componentes de produção primários e secundários em tomateiro do grupo Salada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 2, p. 155-162, 2010.

RUFINO, C. A. et al. Desempenho de genótipos de milho submetidos ao déficit hídrico no estágio vegetativo. **Magistra**, Cruz das Almas-BA, v. 24, n. 3, p. 217-225, 2012.

STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. H.; DICKEY, D. A. **Principles and procedures of statistics: a biometrical approach**. 3rd ed. New York: McGraw Hill Book, 1997. 666 p.

TOEBE, M.; CARGNELUTTI FILHO, A. Não normalidade multivariada e multicolinearidade na análise de trilha em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 5, p. 466-477, 2013.

VASCONCELOS, A. G. G.; ALMEIDA, M. V. A.; NOBRE, F. F. The path analysis approach for the multivariate analysis of infant mortality data. **Annals of Epidemiology**, New York, v. 8, n. 4, p. 262-271, 1998.

WRIGHT, S. Correlation and causation. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 20, n. 7, p. 557-585, 1921.

Recebido em: 26/11/2013
Aceito em: 16/04/2014