

FELIPE BERMUDEZ PEREIRA

RELAÇÃO ENTRE CARACTERES DETERMINANTES DA EFICIÊNCIA NO
USO DE NITROGÊNIO E FÓSFORO EM MILHO

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Genética e
Melhoramento, para obtenção do título
de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011

FELIPE BERMUDEZ PEREIRA

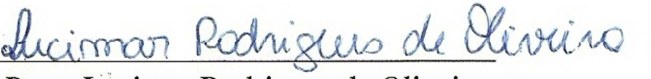
RELAÇÃO ENTRE CARACTERES DETERMINANTES DA EFICIÊNCIA NO
USO DE NITROGÊNIO E FÓSFORO EM MILHO

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Genética e
Melhoramento, para obtenção do título
de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 18 de julho de 2011.


Prof. José Marcelo Soriano Viana


Prof. José Eustáquio de Souza Carneiro


Pesq. Lucimar Rodrigues de Oliveira


Prof. Pedro Crescêncio Souza Carneiro
(Presidente da Banca)

“Em todo campo científico existem controvérsias, novas teorias são propostas, velhas ideias são modificadas ou rejeitadas. Nisso está grande parte do prazer e da emoção da ciência.”

- Douglas Futuyma –

*Aos meus pais, Manoel e Clarice, e aos meus
irmãos, André e Manoel Jr.*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

À Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (Epamig), Unidade Zona da Mata, pelo apoio técnico.

Ao Prof. Glauco Vieira Miranda, pela orientação e incentivo.

Aos Professores Pedro Crescêncio Souza Carneiro e João Carlos Cardoso Galvão pelo exemplo profissional, e pela amizade e orientação.

À Edna e à Rita, secretárias do programa de Pós-Graduação, sempre dispostas a ajudar.

A todos os professores que já tive em toda a minha vida acadêmica, por terem contribuído com a minha formação e crescimento.

À minha namorada Marisângela Rodrigues Santos, pela compreensão e carinho.

Aos amigos Felipe Leite Silva, Roberto Fritsche Neto e Liana Fritsche, Flávia Santos e Julio DoVale, pela agradável convivência, ensinamentos e momentos de descontração.

Ao colegas do Programa Milho, Paulo Coutinho, Rodrigo de Lima, Lucimar Oliveira e Éder Lanes, pela paciência e ensinamentos.

A todos aqui não mencionados que, de certa forma, contribuíram para a concretização deste trabalho.

ÍNDICE

RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	5
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	8
4. CONCLUSÕES.....	13
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14
ANEXOS.....	vii

RESUMO

PEREIRA, Felipe Bermudez, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2011. **Relação entre caracteres determinantes da eficiência no uso de nitrogênio e fósforo em milho.** Orientador: Glauco Vieira Miranda. Coorientadores: Pedro Crescêncio Souza Carneiro e João Carlos Cardoso Galvão.

A eficiência no uso de N (EUN) e P (EUP) em milho é importante, pois permite alcançar produtividades satisfatórias com menores custos e de modo sustentável. O uso de métodos de avaliação precoce ou de seleção indireta em plantas é também de grande interesse no melhoramento para estresses abióticos. Para isso, o conhecimento da relação entre caracteres é de grande valia, principalmente se os caracteres de interesse apresentam problemas de mensuração e identificação. Assim, o objetivo foi identificar a relação entre caracteres determinantes da eficiência no uso de nitrogênio e fósforo em milho. Para isso, foram avaliados 14 linhagens e 39 híbridos simples em dois experimentos, em baixa e alta disponibilidade de N e P, em delineamento inteiramente casualizado com duas repetições, em esquema fatorial simples. Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação, na Universidade Federal de Viçosa, durante o mês de outubro de 2010. As plantas foram colhidas no estádio V6. A partir do material coletado, os caracteres mensurados foram massa da parte aérea seca (MPS), área de raiz específica (ARE), comprimento de raiz lateral (CRLat), comprimento de raiz axial (CRAxi), bem como foram estimados os dois componentes da EU de N ou P (eficiência de utilização – EUt – e absorção - EAb). Os dados foram submetidos a análises de variância e trilha. Detectou-se diferenças significativas entre os genótipos para a maioria dos caracteres estudados, em alta e baixa disponibilidade, exceto para a EUt nos dois níveis dos nutrientes e ARE em baixo N (BN). Nas matrizes de correlação fenotípica, foi diagnosticada a presença de multicolinearidade, em nível moderado, entre os caracteres explicativos referentes ao alto N (AN). Os caracteres de raiz não apresentaram efeitos sobre as EU. Com isso, é possível concluir que a massa de parte aérea seca e a eficiência na absorção são os caracteres determinantes da eficiência no uso de nitrogênio em alta disponibilidade, sendo o primeiro de maior importância; A massa de parte aérea seca é o caractere determinante da eficiência no uso de nitrogênio em baixa disponibilidade desse nutriente e na eficiência no uso de fósforo em alta e baixa disponibilidade.

ABSTRACT

PEREIRA, Felipe Bermudez, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2011. **Relationship between characters determinants of efficiency in the use of nitrogen and phosphorus in maize.** Adviser: Glauco Vieira Miranda. Co-advisers: Pedro Crescêncio Souza Carneiro and João Carlos Cardoso Galvão.

The efficiency in the use of N (EUN) and P (EUP) in maize is important because it allows achieving satisfactory yields with lower costs and in a sustainable way. The use of early evaluation methods and indirect selection in plants is also of great interest in the improvement for abiotic stresses. For this, it is very valuable to have the knowledge of the relationship between characters, especially if the characters of interest show problems of measurement and identification. Thus the objective was to identify the relationship between determinant characters of the efficiency in the use of nitrogen and phosphorus in maize. For this, 14 inbred lines and 39 hybrids were evaluated in two simple experiments, in high and low availability of N and P in a completely randomized design with two replications in a simple factorial design. The experiments were conducted in a greenhouse at the Federal University of Viçosa, during the month of October 2010. The plants were harvested in the V6 stage. From the material that was collected, the measured characters were dry shoot mass (MPS), specific root area (ARE), lateral root length (CRLat), axial root length (CRAxi), as well as the two components of the EU N or P were estimated (utilization efficiency - EUt - and absorbing - EAb). The data was subjected to analysis of variance and path. Significant differences between the genotypes were detected for most of the traits studied in high and low availability, except for the EUt in both nutrient levels and ARE in low N (BN). In the phenotypic correlation matrices, the presence of multicollinearity was diagnosed, at a moderate level, between the characters for the high explanatory N (AN). The characters of the root showed no effects on the EU. Thus, it is possible to conclude that the dry mass of shoots and the efficiency in the absorption are the determinant characters of efficiency in the use of nitrogen of high availability, the first one being the most important. The dry mass shoot of the character is the determinant character of the efficiency in the use of nitrogen in low availability of this nutrient and in the efficiency in the use of phosphorus in high and low availability.

1. INTRODUÇÃO

A produção de milho, considerando apenas as áreas aptas ao cultivo, não será suficiente para atender a demanda mundial desse cereal nas próximas décadas (Bazinger *et al.*, 2004). Nesse sentido, algumas alternativas podem ser adotadas no Brasil para aumentar a produção, como por exemplo: exploração da cultura na entressafra; utilização de cultivares de maior produtividade ou, ainda, a expansão do plantio nas terras do cerrado.

O bioma cerrado é o segundo maior em extensão geográfica no Brasil, apresenta acentuada sazonalidade e interferência antrópica (Sano *et al.*, 2007) e é, também, uma das maiores áreas cultivadas do mundo (Siqueira Neto *et al.*, 2009). Entretanto, além da baixa disponibilidade de água no período de seca, essas regiões possuem limitação à produção agrícola devido à baixa fertilidade do solo, especialmente em nitrogênio (N) e fósforo (P). Adicionalmente, a alta capacidade de retenção do P pelos solos intemperizados e o baixo investimento com adubação nitrogenada pelos pequenos produtores são fatores limitantes na obtenção de altas produtividades nessas áreas.

O N é um dos elementos minerais requeridos em maiores quantidades pelas plantas (Clay *et al.*, 2006), por ser constituinte de aminoácidos, amidas, proteínas, ácidos nucleicos, nucleotídeos, coenzimas etc. Sua deficiência resulta em clorose gradual das folhas mais velhas e redução do crescimento e desenvolvimento da planta (Taiz e Zeiger, 2009). Parte do nitrogênio adicionado ao solo é perdida por volatilização, desnitrificação ou lixiviação. Com isso, a eficiência da adubação nitrogenada no milho não ultrapassa os 50% (Gallais e Hirel, 2004; Hirel *et al.*, 2007; Deuner *et al.*, 2008), o que faz com que haja aumento significativo nos custos de produção. Dessas perdas, também resultam problemas de poluição, principalmente, em agriculturas com alto nível tecnológico que chegam a aplicar mais de 300 kg ha⁻¹ de N no solo (Cantarella e Duarte, 2004).

A deficiência do P também limita a produtividade do milho. Isso se deve à sua importância na armazenagem e transporte de energia e por ser componente de ácidos nucleicos, nucleotídeos, fosfolipídeos etc. Sua deficiência resulta em crescimento reduzido de plantas jovens e coloração de tonalidade arroxeada, devido à antocianina, nas nervuras centrais das folhas (Taiz e Zeiger, 2009), além da má formação, maturação

tardia e desuniformidade de espigas (Lucena *et al.*, 2000). Embora a quantidade de P requerida pelo milho seja bem menor do que a de N, a quantidade de adubação fosfatada normalmente recomendada é alta, em razão da baixa eficiência de aproveitamento desse nutriente pela cultura (em torno de 30 %). Isso decorre da alta capacidade de fixação do P adicionado ao solo, através de mecanismos de adsorção e precipitação, reduzindo sua disponibilidade às plantas. Outro fator que deve ser levado em conta é a demanda de P pela cultura. Plantas de intenso desenvolvimento e de ciclo curto como o milho, em relação a plantas perenes, requerem maior concentração de P em solução e reposição mais rápida do P-adsorvido (Coelho *et al.*, 2010). Além disso, a produção de fertilizantes fosfatados depende de recursos minerais não renováveis, com estimativas de que reservas passíveis de exploração a custo inferior a 40 dólares a tonelada deverão se esgotar ainda neste século (Murrel e Fixen, 2006).

Para alcançar altas produtividades, há necessidade do aumento do nível tecnológico empregado e do uso de insumos, principalmente corretivos e fertilizantes. Isso implica na elevação dos custos de produção e, conseqüentemente, dificulta a adoção por parte dos pequenos e médios produtores. Ademais, a maioria dos cultivares comerciais de milho foi obtida sob condições ótimas de disponibilidade de nutrientes, ou seja, foram selecionados para condições ideais de cultivo (Cecarelli, 1996). Assim, a eficiência no uso de N (EUN) e P (EUP) em milho é importante, porque permite alcançar produtividades satisfatórias, com menores custos e de modo sustentável (Algren *et al.*, 2008). A identificação de genótipos com maior EUN ou EUP possibilitaria que fossem recomendados como cultivares ao agricultor ou ainda, poderiam ser utilizados como genitores em programas de melhoramento. Existem várias definições e metodologias para estimar a eficiência nutricional de um genótipo. No entanto, parecem mais plausíveis as adotadas recentemente, em que a eficiência no uso nutricional (EU) é a habilidade de um determinado genótipo produzir biomassa ou grãos sob certa suplementação nutricional (Moll *et al.*, 1982). A EU é composta pela eficiência de absorção (EAb) e eficiência de utilização (EUt). A EAb é definida como a habilidade de determinado genótipo em absorver certo nutriente do solo, enquanto que a EUt refere-se à capacidade desse genótipo de produzir biomassa ou grãos usando o nutriente que foi absorvido. Dessa forma, maiores EU podem ser alcançadas pelo aumento da EAb e EUt (Moll *et al.*, 1982).

Em diversos trabalhos observaram-se diferenças significativas entre os genótipos de milho para a EUN e EUP, em alta e baixa disponibilidade desses nutrientes (DoVale, 2011; Fitsche-Neto, 2011; DeLima 2010; Brito, 2009; Souza *et al.*, 2009). Isso indica a existência de variabilidade genética, que possibilita a seleção e ganhos dentro de cada nível de disponibilidade de nutrientes. Portanto, o melhoramento de plantas para condições de estresse nutricional deve ser realizado em ambiente específico e não em função do comportamento médio, pois os genes são expressos diferencialmente em função da disponibilidade nutricional (Souza *et al.*, 2009).

Entre os caracteres avaliados em condições de estresse abiótico, a massa de parte aérea seca (MPS) é um indicador de produtividade. Isso ocorre devido ao índice de colheita (IC), que se constitui na fração dos grãos produzidos em relação à massa da planta seca (Bignotto *et al.*, 2000). Em se tratando de milho esses valores estão estagnados há décadas, os quais encontram-se próximos de 0,60 (Raun *et al.*, 1989). Logo, valores adicionais na massa da planta podem implicar em aumento de produtividade, o que pode ser empregado em programas de melhoramento (Donald & Hamblin, 1976).

Sabe-se também que um sistema radicular eficiente é aquele que aperfeiçoa a relação entre a quantidade de recursos adquiridos e empregados para sua obtenção e manutenção (Miller *et al.*, 1999). Nesse sentido, diversos trabalhos com milho buscam relacioná-lo com os componentes da eficiência nutricional (Bonifas e Lindquist, 2009; Liu *et al.*, 2009; Zhu *et al.*, 2006). No que diz respeito ao milho, espera-se que as plantas respondam à deficiência nutricional aumentando o comprimento total de raízes, tanto axiais quanto laterais, mas com redução no número de raízes axiais (Eghball e Maranville, 1993; Chun *et al.*, 2005). Desse modo, estudos sobre a morfologia da raiz e a sua plasticidade frente às modificações no ambiente podem ser relevantes para o entendimento da eficiência nutricional das plantas.

Outro caractere de interesse no melhoramento para condição de estresse nutricional é a área de raiz específica (ARE). Ela é definida como a relação entre a área superficial das raízes e sua massa. Genótipos com maior ARE indicam maior área superficial para cada unidade de carbono investido em raízes. Como a absorção depende principalmente da ARE, esse pode ser um indicador de genótipos com maior EAb e, conseqüentemente, maior EU de nutrientes (Taiz e Zeiger, 2009).

Em relação ao estágio de avaliação e seleção, sabe-se que o potencial de produção do milho é definido precocemente, por ocasião da emissão da quarta à sexta folha. O referido estágio é denominado como diferenciação floral, o qual coincide com o término da fase de diferenciação das folhas. Portanto, nessa etapa já é definida a área foliar (Fischer e Palmer, 1984) e o número potencial de grãos que a planta deverá apresentar (Coelho *et al.*, 2010).

O uso de métodos de avaliação precoce ou de seleção indireta em plantas é também de grande interesse no melhoramento para estresses abióticos, pois acelera o processo de seleção, descartando de imediato os genótipos menos promissores, concentrando, assim, os recursos nos potencialmente superiores (Machado *et al.*, 2004). Por exemplo, Miranda *et al.* (2005) descartaram, no florescimento, linhagens de milho com baixa eficiência no uso de N por meio da utilização de clorofilômetro. Em outro estudo, Oliveira (2009) estimou, em baixa disponibilidade de N, os ganhos na EUN por meio da atividade da glutamina sintetase, em linhagens de milho tropical. Para isso, o conhecimento da relação entre caracteres é de grande valia, principalmente se os caracteres de interesse apresentam baixa herdabilidade e, ou tenham problemas de mensuração e identificação (Cruz *et al.*, 2004).

As estimativas de correlações são medidas de associação linear e não permitem tirar conclusões sobre a relação de causa e efeito entre caracteres. Em razão disso, procede-se a análise de trilha, que consiste no estudo dos efeitos diretos e indiretos de caracteres sobre uma variável básica (Wright, 1921). Para ser realizada, é necessário que a matriz de correlações entre os caracteres explicativos esteja bem condicionada. Problemas de multicolinearidade tornam difícil avaliar a influência de caracteres explicativos sobre a resposta no caractere principal, e ignorar seus efeitos pode provocar resultados *viesados*. A diagnose, e o grau da multicolinearidade na matriz de correlação são estabelecidos com base no número de condição (NC), que é a relação entre o maior e o menor autovalor da matriz. Se $NC \leq 100$, a multicolinearidade é denominada fraca e não constitui problema para análise; se $100 < NC < 1000$, a multicolinearidade é denominada moderada à forte; e se $NC \geq 1000$, é considerada severa (Montgomery e Peck, 1981). Assim, havendo problemas de multicolinearidade entre os caracteres explicativos, uma das alternativas recomendadas é realizar a análise de trilha com todos os caracteres, mas adotar procedimentos equivalentes aos da análise de regressão em crista (Carvalho e Cruz, 1996).

Diante do exposto, o objetivo foi identificar a relação entre caracteres determinantes da eficiência no uso de nitrogênio e fósforo em milho.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para realização deste estudo foram avaliadas 39 combinações híbridas experimentais e 14 linhagens de milho, em dois experimentos, em condições contrastantes de disponibilidades de N (experimento 1) e de P (experimento 2). Os materiais utilizados são oriundos do banco de germoplasma do Programa Milho[®], e foram escolhidos por serem contrastantes na eficiência no uso de N e P. Utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado com duas repetições, em esquema fatorial 2 x 53 (dois níveis de nutriente x 53 genótipos). A parcela foi constituída de uma planta por vaso. Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação, localizada no Campo Experimental Diogo Alves de Mello (20°45'14"S; 42°52'53"W), pertencente ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, Brasil, durante o mês de outubro de 2010.

As sementes foram esterilizadas e, posteriormente, colocadas para germinar em bandejas de polietileno, em células individuais. Após emergirem, transplantou-se uma plântula de cada genótipo para vasos cilíndricos de PVC com 4 dm³ de capacidade (10 cm de diâmetro x 50 cm de altura), preenchidos com diferentes tipos de substrato, de acordo com o experimento. O substrato do experimento 1 foi preparado pela mistura de areia lavada e vermiculita, na proporção de 1:1 (Walk *et al.*, 2006). No experimento 2, o substrato foi preparado pela mistura de 50% de areia lavada, 37,5% de vermiculita e 12,5% de solo (horizonte "B" de Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico). O solo foi usado para adsorver o fósforo e não deixá-lo prontamente disponível para as plantas.

A solução nutritiva foi fornecida a partir do sétimo dia após o transplante, aplicando uma quantidade de 250 ml vaso⁻¹ a cada dois dias. No experimento 1 utilizou-se dois níveis de N. O primeiro simulou as condições ideais de nutrientes, aqui chamada de alta disponibilidade (AN), e o segundo a baixa (BN). A solução utilizada foi a descrita por Chun *et al.* (2005), em que a solução para AN continha 2,0 mmol l⁻¹ e a de BN 0,2 mmol l⁻¹, ou seja, dez vezes menos N do que no AN.

No experimento 2, o P foi adicionado na forma de superfosfato triplo. Para a alta disponibilidade (AP) misturou-se 192 mg de P dm⁻³ no substrato, e na baixa (BP) 34 mg dm⁻³. Os demais nutrientes foram fornecidos via solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1938) modificada, sem adição de fósforo, para estudos de deficiência (Passos, 1996).

As plantas foram coletadas no estágio vegetativo de seis folhas completamente expandidas (V6), em que, na ocasião, a parte aérea foi separada das raízes. Os caracteres mensurados foram: massa da parte aérea seca (MPS), massa de raiz seca (MRS), comprimento de raiz lateral (CRLat), comprimento de raiz axial (CRAxi), área superficial de raiz lateral (ASLat) e área superficial de raiz axial (ASAxi). As massas de parte aérea e raiz secas foram determinadas após secagem em estufa por 72 horas a 60°C, com circulação forçada de ar. Os comprimentos e áreas de raiz foram obtidos por meio do analisador de imagens WinRhizo PRO 2009c, acoplado ao scanner profissional Epson Expression XL 10000 equipado com unidade de luz adicional (TPU), conforme descrito por Bouma *et al.* (2000), entretanto utilizando a raiz inteira e não apenas amostras. Raízes com diâmetro inferior ou igual a 0,5 mm foram consideradas raízes laterais, e aquelas com diâmetros acima de 0,5 mm como raízes axiais (Traschsel *et al.*, 2009). A partir desses valores, foi obtida a área de raiz específica (ARE):

$$ARE = \frac{ASLat + ASAxi}{MRS}$$

Para a quantificação do teor de N, retirou-se uma amostra de 0,2 g da massa da parte aérea seca por planta e foram feitas a digestão, a destilação e a titulação utilizando o método descrito por Bremner (1996). Para a quantificação do teor de P, retirou-se uma amostra de 0,1 g e foram feitas a digestão nitroperclórica e a leitura do teor de P em espectrofotômetro a 725 nm.

Os índices de eficiência nutricional foram obtidos conforme descrito por Moll *et al.* (1982):

$$EAbN = \frac{N(planta)}{N(aplicado)} (mg\ mg^{-1}) \quad e \quad EAbP = \frac{P(planta)}{P(aplicado)} (mg\ mg^{-1})$$

$$EUtN = \frac{MPS}{N(planta)} (mg\ mg^{-1}) \quad e \quad EUtP = \frac{MPS}{P(planta)} (mg\ mg^{-1})$$

$$EUN = \frac{MPS}{N(aplicado)} (mg\ mg^{-1}) = EUtN \times EAbN$$

$$EUP = \frac{MPS}{P(aplicado)} (mg\ mg^{-1}) = EUtP \times EAbP$$

Em razão do caractere CRLat não ter apresentado distribuição normal, procedeu-se a transformação de dados via $\log(x+1)$.

Inicialmente, para todos os caracteres avaliados, foram realizadas as análises de variância fatorial, ou seja, considerando os dois níveis de disponibilidade de N ou de P, por meio do seguinte modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

em que, Y_{ijk} é o valor observado para o caractere no i -ésimo genótipo, no j -ésimo nível, na k -ésima repetição; μ é a média geral para o caractere; α_i é o efeito do i -ésimo genótipo ($i=1, 2, 3, \dots, 53$), considerado como de efeito aleatório, em que, $\mathbf{g} \sim \text{NID}(0, \sigma^2_g)$; β_j é o efeito da j -ésima dose de nutriente ($j=1, 2$), considerado como de efeito fixo, em que, $\mathbf{a} \sim \text{N}(a, a^2)$; $(\alpha\beta)_{ij}$ é o efeito da interação o i -ésimo genótipo com j -ésima dose do nutriente, considerado como de efeito aleatório, em que $\mathbf{ga} \sim \text{NID}(0, \sigma^2_{ga})$; ε_{ik} é o efeito do erro aleatório associado à observação de ordem ijk , em que $\mathcal{E} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$.

Para a realização das análises de variância individuais, ou seja, para cada nível de N ou de P, foi considerado o seguinte o modelo:

$$Y_{ik} = \mu + g_i + \varepsilon_{ik}$$

em que, Y_{ik} é o valor observado para o caractere no i -ésimo genótipo na k -ésima repetição; μ é a média geral para o caractere; g_i é o efeito do i -ésimo genótipo, considerado como de efeito aleatório, em que, $\mathbf{g} \sim \text{NID}(0, \sigma^2_g)$; ε_{ik} é o efeito do erro (aleatório) associado à observação de ordem ik , em que $\mathcal{E} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$.

As estimativas das correlações fenotípicas foram obtidas entre todos os caracteres. Posteriormente foi realizada a diagnose de multicolinearidade entre os caracteres explicativos e o seu grau na matriz de correlação foi estabelecido com base no número de condição (Montgomery e Peck, 1981). O desdobramento das correlações fenotípicas, em efeitos diretos e indiretos dos caracteres explicativos sobre a EU (caractere dependente), foi feito por meio da análise de trilha (Wright, 1921).

As análises de variância foram realizadas com a utilização do programa estatístico computacional *Statistical Analysis System* (SAS) versão 9.1 (SAS Institute, 2003). As diagnoses de multicolinearidade e análises de trilha foram realizadas com auxílio do Programa Genes - Aplicativo Computacional em Genética e Estatística (Cruz, 2006).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise de variância fatorial para o experimento de N, os níveis considerados desse nutriente foram suficientemente contrastantes para todos os caracteres, exceto CRLat (Tabela 3.1). No entanto, apenas para os caracteres MPS e EUN os genótipos apresentaram comportamento diferencial, em função da disponibilidade de N (G x N). Resultados semelhantes em milho foram observados por DeLima (2010), Liu *et al.* (2009), Souza *et al.* (2009) e Chun *et al.* (2005).

No experimento de P, efeito semelhante foi observado, em que os níveis considerados desse nutriente também foram suficientemente contrastantes para discriminar os genótipos para a maioria dos caracteres, sendo as exceções ARE, CRAxi e EAbP (Tabela 3.2). Esse resultado para EAbP pode ser, em parte, explicado pela diminuição proporcional do P aplicado e da concentração do P na planta em BP, o que pode ter sido ocasionado pela adsorção de maior porcentagem do P aplicado nesse nível. Além disso, para os caracteres MPS, CRLat, CRAxi e EUP os genótipos apresentaram comportamento diferencial, em função da disponibilidade de P (G x P). Resultados semelhantes em milho foram observados por Fritsche-Neto *et al.* (2010) e Brito (2009).

Com a presença de interação G x N ou P, a avaliação e seleção devem ser realizadas para ambientes específicos e não em função do comportamento médio dos genótipos, pois os genes são expressos diferencialmente em função da disponibilidade dos nutrientes (Fritsche-Neto *et al.*, 2010). Para os caracteres que não apresentaram interação genótipos x níveis de nutriente (G x N ou P), não haveria necessidade de avaliar em alto e baixo nível. A falta de interação significativa é um indicativo de padrões de similaridade de resposta dos genótipos, ou seja, eles poderiam ser avaliados em um único nível e as decisões tomadas serviriam para os demais níveis. Nesse caso, a avaliação em alta disponibilidade é mais recomendada, por serem conhecidos os níveis ideais desses nutrientes e, assim, permitir que os genótipos expressem todo o seu potencial genético com maior herdabilidade e menor coeficiente de variação, conseqüentemente aumentando a eficiência da seleção. Contudo, há necessidade de conhecer a influência da disponibilidade de nutriente nas estimativas de parâmetros genéticos, como correlações, média, herdabilidade entre outras.

Os coeficientes de variação experimental apresentaram valores dentro do aceitável para esse tipo de estudo (DeLima, 2010; Fritsche-Neto *et al.*, 2010; Majerowicz *et al.*, 2002), o que indica boa precisão experimental e confiabilidade nas estimativas.

Nas análises individuais de N, detectou-se diferenças significativas entre os genótipos para a maioria dos caracteres estudados, em alta (Tabela 3.3) e baixa disponibilidade (Tabela 3.4). A exceção foi a EUtN nos dois níveis, e ARE em BN. As diferenças genéticas significativas observadas indicam existência de variabilidade genética, o que possibilita a seleção e ganhos genéticos dentro de cada nível de N.

As médias, variâncias genéticas e herdabilidades dos caracteres foram menores em BN. Isso porque em condições de estresse há limitação do crescimento (Taiz e Zeiger, 2009) e redução na variabilidade genética, pois os genótipos tendem a ter desempenhos semelhantes, dificultando, assim, a seleção (Coque e Gallais, 2006). As exceções foram EAbN e EUN. Elas apresentaram maior variabilidade genética quando em baixa disponibilidade. Isso indica que o estresse por N possibilita que os genótipos expressem a variabilidade desses caracteres, proporcionando a seleção dos mais eficientes. Entretanto, a herdabilidade dos caracteres foi menor em BN, o que indica que os demais componentes também aumentaram, e em maior magnitude do que a variância genética. A média é maior em baixa disponibilidade devido à biomassa não diminuir na mesma proporção da disponibilidade dos nutrientes, ou seja, o milho diminui a concentração do nutriente na planta com o mínimo de redução na biomassa (Figura 3.1).

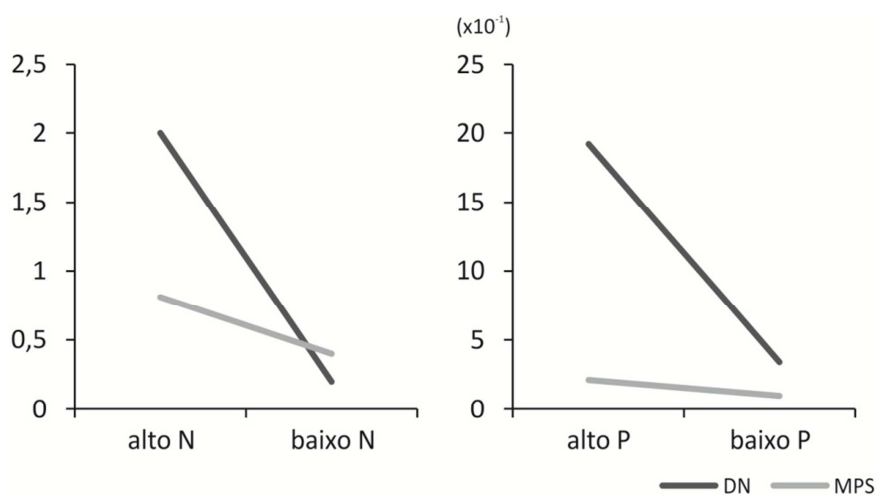


Figura 3.1. Comportamento médio de 53 genótipos de milho tropical quanto à massa da parte aérea seca – MPS, em função da disponibilidade de nutrientes - DN (alto e baixo nível de nitrogênio (N) ou fósforo (P)), Viçosa, MG, 2010.

A redução da ARE em BN, em relação ao AN, contradiz o observado por Bonifas (2005) e Chun (2005), quando afirmam que genótipos de milho respondem à deficiência de N pelo aumento de alocação de carbono da parte aérea para a formação de raízes, visando o aumento da sua área superficial. Porém, não há necessidade do investimento em ARE para o N, já que o N é absorvido juntamente com a água por fluxo de massa, não necessitando da interceptação radicular (Taiz e Zeiger, 2009).

No experimento de P, também houve diferenças significativas entre os genótipos para a maioria dos caracteres estudados, em alta (Tabela 3.5) e baixa disponibilidade (Tabela 3.6). A exceção foi a EUP nos dois níveis. Assim como observado por Brito (2009), o CRLat dos genótipos aumentou em BP, em relação ao AP. Isso indica que as plantas investem em comprimento de raízes de menor diâmetro quando em estresse por deficiência desse nutriente. O P, diferente do N, é absorvido por difusão, o que exige grande proximidade entre a raiz e o nutriente no solo, fazendo com que maior CRLat constitua ponto-chave na habilidade das plantas em adquirir P do solo (Parentoni *et al.*, 2011).

As variâncias genéticas dos caracteres de raiz e da EUP apresentaram maior valor quando em baixa disponibilidade de P. Isso indica que o estresse por P, assim como o de N, permite que todos os caracteres de raiz expressem sua variabilidade. Já para MPS e EAbP, efeito contrário foi observado.

O componente genético da variância e a herdabilidade da EUP em AP apresentaram valores negativos (Tabela 3.5), assim como ocorreu com os componentes de variância da interação em CRLat e CRAxi na análise fatorial de N (Tabela 3.1). Isso ocorre devido aos valores do resíduo serem superiores aos dos genótipos, ocasionado pela variância genética dessas características que são próximas de zero. Segundo Searle (1971), para estimativas negativas de componentes de variância deve-se, entre outras alternativas, admitir que o valor do parâmetro é 0 (zero) e então, considerar a estimativa negativa como nula, quando o teste *F* é não significativo.

Para alcançar aumentos na EU de N ou de P, é necessário o aumento de seus componentes (Parentoni e Souza Jr, 2008; Hirel *et al.*, 2007). Segundo Corrales *et al.* (2007), quando a disponibilidade de um determinado nutriente é limitante, a EAb é mais importante que a EUP. A não significância da EUP em milho pode ser explicada pela menor redução na MPS em relação ao teor de nutrientes nos tecidos. Com isso, há

pouca redução na biomassa, enquanto a concentração do nutriente na planta reduz consideravelmente, fazendo com que não haja grande diferença entre os genótipos.

Nas matrizes de correlação fenotípica, foi diagnosticada a presença de multicolinearidade, com nível moderado, entre os caracteres explicativos referentes ao AN. Como todos os caracteres são importantes e não poderiam ser eliminados, a análise de trilha para esse nível de N foi realizada sob multicolinearidade (Carvalho e Cruz, 1996). Nessa análise não ocorreram valores de inflação das variâncias (VIFs) superiores a 10 (Tabela 3.7). Isso indica que os coeficientes foram pouco influenciados pela multicolinearidade. Além disso, o valor da constante k escolhido para a estabilização das estimativas foi pequeno (0,077), ocasionando pouco *viés* na análise de regressão (Carvalho e Cruz, 1996). Os coeficientes de determinação de todas as análises de trilha apresentaram valores elevados, acima de 0,9, o que indica que grande parte da variação do caractere principal foi determinada pelos caracteres explicativos.

Os principais determinantes em AN da EUN, foram MPS e EAbN (Tabela 3.7). Eles apresentaram elevada correlação, porém seus efeitos diretos foram de baixa magnitude. Além disso, a EAbN apresentou efeito indireto via MPS maior do que seu efeito direto sobre EUN. A ARE apresentou baixa correlação e baixo efeito direto sobre a EUN, indicando que o investimento de carbono em raízes de menor diâmetro não influencia na EUN. Os caracteres CRAxi e CRLat apresentaram correlações de alta magnitude com EUN, porém seus efeitos diretos foram inferiores ao valor da variável residual. Contudo, seus efeitos indiretos via MPS e EAbN foram altos, corroborando a maior importância desses últimos caracteres.

Em BN, apenas MPS apresentou elevada correlação e elevado efeito direto sobre a EUN. A EAbN apresentou elevada correlação com EUN, mas teve efeito direto inferior ao valor da variável residual. Os caracteres de raiz, de modo semelhante aos observados em AN, apresentaram baixo efeito sobre EUN. Baixos efeitos diretos dos comprimentos radiculares também foram observados por DeLima (2010), indicando que a avaliação desses efeitos diretos dos comprimentos não é importante na seleção de genótipos com maior EUN em plântulas de milho. Entretanto, esses resultados contradizem Liu *et al.* (2009), que afirmam que em BN as plantas investem em maior sistema radicular para supplantar o estresse.

No experimento de P, o principal determinante da EUP foi a MPS em ambos os níveis (Tabela 3.8). Os caracteres EAbP, CRLat e CRAxi, apresentaram elevada

correlação com EUP, porém seus efeitos diretos foram baixos. Entretanto, seus efeitos indiretos via MPS foram altos, corroborando a maior importância desse último caráter na determinação da EUP nesse ambiente, e indicando que a seleção em MPS aumentará esses caracteres. Porém, com o efeito indireto de ARE via MPS negativo, sua seleção acarretaria em diminuição daquele. Esse resultado contradiz Taiz e Zieger (2009), que afirmam que a absorção do P está ligada à área de raiz.

Os caracteres de raiz não apresentaram efeitos sobre a EUP, mesmo com o aumento da média do CRLat em BP. Isso indica que a avaliação desses caracteres também não é importante na seleção de genótipos com maior EUP em plântulas de milho.

A relação entre MPS e EU evidencia que não basta a planta absorver o nutriente em grande quantidade, mas também usá-lo com eficiência, transformando em área fotossintetizante e em órgãos reprodutivos.

4. CONCLUSÕES

A massa de parte aérea seca e a eficiência de absorção são os caracteres determinantes da eficiência no uso de nitrogênio em alta disponibilidade, sendo o primeiro de maior importância.

A massa de parte aérea seca é o caractere determinante da eficiência no uso de nitrogênio em baixa disponibilidade.

A massa de parte aérea seca é o caractere determinante da eficiência no uso de fósforo tanto em alta como em baixa disponibilidade.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Algren S, Barky A, Bernesson S, Nordberg A, Norén O & Hansson PA. 2008. Ammonium nitrate fertilizer production based on biomass – environmental effects from a life cycle perspective. **Bioresource Technology** **99**: 8034-8041.
- Banziger M, Setimela PS, Hodson, D & Vivek B. 2004. Breeding for improved drought tolerance in maize adapted to southern Africa . *in* "New directions for a diverse planet". **Proceedings of the 4th International Crop Science Congress**, Brisbane, Australia. Published on CD-ROM. Web site [www.cropscience.org.au](http://www.cropsscience.org.au)
- Bignotto EA, Souza EA de, Ramalho MAP, Souza JC de & Ribeiro PHE. 2000. Desempenho de cultivares modernos de milho em relação a cultivares primitivos em uso no sul de Minas Gerais. In: **Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Milho e Sorgo**. SBMS, Uberlândia (CD-ROM).
- Bonifas KD & Lindquist JL. 2009. Effects of Nitrogen Supply on the Root Morphology of Corn and Velvetleaf. **Journal of Plant Nutrition** **32**: 1371–1382.
- Bonifas KD, Walters DT, Cassman KG & Lindquist JL. 2005. Nitrogen supply affects root:shoot ratio in corn and velvetleaf (*Abutilon theophrasti*). **Weed Science** **53**: 670–675.
- Bouma TJ, Nielson KL & Koutstaal BAS. 2000. Sample preparation and scanning protocol for computerized analysis of root length and diameter. **Plant and Soil** **218**: 185-196.
- Bremner JM. 1996 Nitrogen total. In: Page AL. **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America Press, p.1085-1121.
- Brito CM. 2009. **Variabilidade genética e caracterização do sistema radical de plântulas de milho para eficiência na absorção e utilização de fósforo**. 39p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- Cantarella H & Duarte AP. 2004. Manejo da fertilidade do solo para cultura do milho. In: **Tecnologias de Produção de Milho**. Eds: Galvão, J. C. C.; Miranda, G. V. Viçosa, UFV.
- Carvalho SP & Cruz CD. 1996. Diagnosis of multicollinearity: assessment of the condition of correlation matrices used in genetic studies. **Revista Brasileira de Genética** **3**: 479-484.
- Cecarelli S. 1996. Adaptation to low/high input cultivation. **Euphytica** **92**: 203-214.
- Chun L, Mi G, Li J, Chen F & Zhang F. 2005. Genetic analysis of maize root characteristics in response to low nitrogen stress. **Plant and Soil** **276**: 369–382.
- Clay DE, Kim KI, Chang J, Clay AS & Dalsted K. 2006. Characterizing Water and Nitrogen Stress in Corn Using Remote Sensing. **Agronomy Journal** **98**: 579–587.
- Coelho AM, França GE de, Pitta GVE, Alves VMC & Hernani LC. 2010. Cultivo do Milho: Nutrição e adubação do milho. Sistema de Produção. **Embrapa Milho e Sorgo. Versão Eletrônica, 6ª ed.**
- Coque M & Gallais A. 2006 Genomic regions involved in response to grain yield selection at high and low nitrogen fertilization in maize. **Theoretical and Applied Genetics** **112**: 1205-1220.

- Corrales I, Amenós M, Poschenrieder C, Barceló J. 2007. Phosphorus efficiency and root exudates in two contrasting tropical maize varieties. **Journal of Plant Nutrition** **30**: 887–900.
- Cruz CD. 2006. **Programa Genes: Biometria**. Viçosa-MG: Editora UFV.
- Cruz CD, Regazzi AJ & Carneiro PCS. 2004. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. v.1. Viçosa: UFV, 480p.
- DeLima RO. 2010. **Herança e relação entre caracteres associados à morfologia de raiz e eficiência de uso de nitrogênio em milho**. 35 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- Deuner S, Nascimento R do, Ferreira LS, Badinelli PG & Kerbe RS. 2008. Adubação foliar e via solo de nitrogênio em plantas de milho em fase inicial de desenvolvimento. **Revista Ciência e Agrotecnologia** **5**: 1359-1365.
- Donald CM & Hamblin J. 1976. The biological yield and harvest index of cereal as agronomic and plant breeding criteria. **Advances in Agronomy** **28**: 361-405.
- DoVale JC. 2011. **Herança e correlação entre caracteres associados a eficiência no uso de nitrogênio e fósforo em milho**. 86 p. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- Eghball B & Maranville JW. 1993. Root development and nitrogen influx of corn genotypes grown under combined drought and nitrogen stresses. **Agronomy Journal** **85**: 147-152.
- Fischer KS & Palmer FE. 1984. Tropical maize. In: Goldsworthy PR, Fisher NM (ed.). **The physiology of tropical field crops**. Wiley, p.231-248.
- Fritsche-Neto R, Miranda GV, DeLima RO, Souza LV, Silva J. 2010. Herança de caracteres associados à eficiência de utilização do fósforo em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** **45**: 465-471.
- Fritsche-Neto R. 2011. **Seleção genômica ampla e novos métodos de melhoramento do milho**. 39 p. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- Gallais A & Hirel B. 2004. An approach to the genetics of nitrogen use efficiency in maize. **Journal of Experimental Botany** **396**: 295-306.
- Hirel B, Le Gouis J, Ney B & Gallais A. 2007. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. **Journal of Experimental Botany** **58**: 2369–2387.
- Hoagland DR & Arnon DI. 1938. **The water culture method for growing plants without soil**. Berkeley, CA: California Agricultural Experiment Station. (347).
- Liu J, Chen F, Olokhnuud C, Glass ADM, Tong Y, Zhang F & Mi G. 2009. Root size and nitrogen-uptake activity in two maize (*Zea mays*) inbred lines differing in nitrogen-use efficiency. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science** **172**: 230-236.
- Lucena LFC, Oliveira FA, Silva IF & Andrade AP. 2000. Resposta do milho a diferentes dosagens de nitrogênio e fósforo aplicados ao solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** **4**: 334-337.

- Machado CTT, Machado AT & Furlani AMC. 2004. Variação intrapopulacional em milho para características relacionadas com a eficiência de absorção e utilização de fósforo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo 3**: 77-91.
- Majerowicz N, Pereira JMS, Medici LO, Bison O, Pereira MB & Santos UMJ. 2002. Estudo da eficiência de uso do N em variedades locais e melhoradas de milho. **Revista Brasileira Botânica 25**: 129-136.
- Miller DD, De Ruijter NC, Bisseling T & Emons AM. 1999. The role of actin in root hair morphogenesis: studies with lipochito-oligosaccharides as a growth stimulator and cytochalasin as an actin perturbing drug. **Plant Journal 17**: 141-154.
- Miranda GV, Godoy Cl, Souza LV & Santos IC. 2005. Selection of discrepant maize genotypes for nitrogen use efficiency by a chlorophyll meter. **Crop Breeding and Applied Biotechnology 5**: 451-459.
- Moll RH, Kamprath EL & Jackson A. 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy Journal 74**: 562-564.
- Montgomery DC & Peck EA. 1981. **Introduction to linear regression analysis**. New York: John Wiley & Sons. 504 p.
- Murrel TS & Fixen PE. 2006. Improving fertilizer P effectiveness: challenges for the future. In: **International Symposium on Phosphorus Dynamics in the Soil-Plant Continuum**, 3, Uberlândia. Proceedings... Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, p. 150-151.
- Oliveira LR. 2009. **Eficiência de uso de nitrogênio e atividade da nitrato redutase e glutamina sintetase em milho**. Viçosa: UFV. 94p. (Tese de Doutorado).
- Parentoni SN, Mendes FF & Guimarães LJM. 2011. Melhoramento para eficiência no uso de fósforo. In: **Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos**. Eds: Fritsche-Neto R & Borém AO. Visconde do Rio Branco, MG. Editora Suprema, 250 p.
- Parentoni SN, Souza Jr. CL. 2008. Phosphorus acquisition and internal utilization efficiency in tropical maize genotypes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira 43**: 893-901.
- Passos LP. 1996. **Métodos analíticos e laboratoriais em fisiologia vegetal**. Coronel Pacheco: Embrapa.
- Raun WR, Sanders DH & Olson RA. 1989. Nitrogen fertilizer carries and their placement for minimum till corn under sprinkler irrigation. **Agronomy Journal 81**: 280-285.
- Sano EE, Ferreira LG, Asner GP & Steinke ET. 2007. Spatial and temporal probabilities of obtaining cloud-free Landsat images over the Brazilian tropical savanna. **International Journal of Remote Sensing 28**: 2739-2752.
- SAS Institute. 2003. **SAS/STAT software versão 9.1**, Cary.
- Searle SR. 1971. **Linear Models**. Nova Iorque, John Wiley, 532p.
- Siqueira Neto M, Piccolo M de C, Scopel E, Costa Junior C da, Cerri CC & Bernoux M. 2009. Carbono total e atributos químicos com diferentes usos do solo no Cerrado. **Acta Scientiarum. Agronomy 31**: 709-717.

- Souza LV, Miranda GV, Galvão JCC, Guimarães LJM, Santos IC. 2009. Combining ability of maize grain yield under different levels of environmental stress. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** **44**: 1297-1303.
- Taiz L & Zeiger E. 2009. **Fisiologia vegetal**. (4. Ed.) Porto Alegre: Artmed. 848p.
- Trachsel S, Messmer R, Stamp P & Hund A. 2009. Mapping of QTLs for lateral and axile root growth of tropical maize. **Theoretical and Applied Genetics** **119**: 1413–1424.
- Walk TC, Jaramillo R & Lynch JP. 2006. Architectural tradeoffs between adventitious and basal roots for phosphorus acquisition. **Plant Soil** **279**: 347-366.
- Wright S. 1921. Correlation and causation. **Journal of Agricultural Research** **20**: 557-585.
- Zhu JM, Mickelson SM, Kaeppler SM & Lynch JP. 2006. Detection of quantitative trait loci for seminal root traits in maize (*Zea mays* L.) seedlings grown under differential phosphorus levels. **Theoretical and Applied Genetics** **113**: 1-10.

ANEXOS

Tabela 3.1 - Resumo das análises da variância para os caracteres massa de parte aérea seca (MPS), área de raiz específica (ARE), comprimento de raiz lateral (CRLat) e axial (CRAXi), eficiência na absorção (EAbN), utilização (EUtN) e no uso de nitrogênio (EUN) em 14 linhagens e 39 combinações híbridas de milho, avaliados em dois níveis de N, Viçosa-MG, 2010

FV	GL	Quadrado Médio						
		MPS	ARE	CRLat	CRaxi	EAbN	EUtN	EUN
Genótipos (G)	52	0,17 ^{**}	4E-4 ^{**}	0,12 ^{**}	25,68 ^{**}	0,01 ^{**}	24,32 ^{ns}	15,06 ^{**}
Níveis de N (N)	1	8,78 ^{**}	3E-3 ^{**}	0,05 ^{ns}	34,65 ^{**}	2,33 ^{**}	4968,41 ^{**}	3362,24 ^{**}
GxN	52	0,04 ^{**}	2E-4 ^{ns}	0,01 ^{ns}	2,95 ^{ns}	4E-3 ^{ns}	21,78 ^{ns}	6,54 ^{**}
Resíduo	104	0,02	2E-4	0,01	3,09	3E-3	20,73	3,24
Média		0,60	0,12	1,24	7,50	0,19	29,30	6,07
CV(%)		24,87	11,56	9,49	23,44	30,60	15,54	29,63
$\hat{\sigma}_g^2$		0,04	5E-5	0,03	5,65	3E-3	0,90	2,96
$\hat{\sigma}_{ga}^2$		5E-3	4E-6	-6E-4	-0,04	3E-4	0,26	0,82
\hat{h}_g^2		0,87	0,52	0,88	0,88	0,75	0,15	0,79

^{ns} não significativo e ^{**} significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. $l = a / a - 1$

Tabela 3.2 - Resumo das análises da variância para os caracteres massa de parte aérea seca (MPS), área de raiz específica (ARE), comprimento de raiz lateral (CRLat) e axial (CRAxi), eficiência na absorção (EAbP), utilização (EUtP) e no uso de fósforo (EUP) em 14 linhagens e 39 combinações híbridas de milho, avaliados em dois níveis de P, Viçosa-MG, 2010

FV	GL	Quadrado Médio						
		MPS	ARE	CRLat	CRaxi	EAbP	EUtP	EUP
Genótipos (G)	52	1,27**	3E-4**	0,06**	33,72**	1E-4**	6298,64 ^{ns}	12,89**
Níveis de P (P)	1	66,94**	4E-4 ^{ns}	0,14**	6,33 ^{ns}	7E-5 ^{ns}	5431465,31**	990,45**
GxP	52	0,38**	1E-4 ^{ns}	0,01**	5,12*	4E-5 ^{ns}	7885,72 ^{ns}	4,24**
Resíduo	104	0,16	1E-4	7E-3	3,21	4E-5	5410,87	2,41
Média		1,56	0,10	1,45	10,58	0,02	343,75	5,00
CV(%)		25,72	9,63	5,69	16,95	38,68	21,40	31,07
$\hat{\sigma}_g^2$		0,28	5E-5	0,01	7,63	2E-5	221,94	2,62
$\hat{\sigma}_{ga}^2$		0,05	6E-6	1E-3	0,48	3E-7	618,71	0,46
\hat{h}_g^2		0,87	0,68	0,89	0,90	0,70	0,14	0,81

^{ns} não significativo, * significativo a 5% e ** significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. $l = a / a - 1$

Tabela 3.3 - Resumo das análises de variância para os caracteres massa de parte aérea seca (MPS), área de raiz específica (ARE), comprimento de raiz lateral (CRLat) e axial (CRAXi), eficiência na absorção (EAbN), utilização (EUtN) e no uso de nitrogênio (EUN) em 14 linhagens e 39 combinações híbridas experimentais de milho, avaliados em alta disponibilidade de N, Viçosa-MG, 2010

FV	GL	Quadrado Médio						
		MPS	ARE	CRLat	CRaxi	EAbN	EUtN	EUN
Genótipos	52	0,18 ^{**}	4E-4 [*]	0,08 ^{**}	16,35 ^{**}	2E-3 ^{**}	7,03 ^{ns}	1,19 ^{**}
Resíduo	52	0,04	2E-4	0,02	2,99	5E-4	6,49	0,23
Média		0,81	0,12	1,26	7,91	0,08	24,42	2,05
CV(%)		23,23	12,11	9,85	21,85	26,20	10,43	23,24
σ_g^2		0,07	9E-5	0,03	6,68	1E-3	0,27	0,48
\hat{h}_g^2		0,81	0,45	0,81	0,82	0,77	0,08	0,81

^{ns} não significativo, ^{*} significativo a 5% e ^{**} significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 3.4 - Resumo das análises de variância para os caracteres massa de parte aérea seca (MPS), área de raiz específica (ARE), comprimento de raiz lateral (CRLat) e axial (CRAXi), eficiência na absorção (EAbN), utilização (EUtN) e no uso de nitrogênio (EUN) em 14 linhagens e 39 combinações híbridas experimentais de milho, avaliados em baixa disponibilidade de N, Viçosa-MG, 2010

FV	GL	Quadrado Médio						
		MPS	ARE	CRLat	CRaxi	EAbN	EUtN	EUN
Genótipos	52	0,03 ^{**}	2E-4 ^{ns}	0,05 ^{**}	12,27 ^{**}	0,02 ^{**}	39,07 ^{ns}	20,41 ^{**}
Resíduo	52	0,01	2E-4	0,01	3,20	6E-3	34,98	6,25
Média		0,40	0,11	1,23	7,10	0,30	34,19	10,09
CV(%)		24,77	10,87	9,10	25,20	26,80	17,30	24,77
σ_g^2		0,01	2E-5	0,02	4,54	5E-3	2,05	7,08
\hat{h}_g^2		0,69	0,21	0,75	0,74	0,59	0,10	0,69

^{ns} não significativo e ^{**} significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 3.5 - Resumo das análises de variância para os caracteres massa de parte aérea seca (MPS), área de raiz específica (ARE), comprimento de raiz lateral (CRLat) e axial (CRaxi), eficiência na absorção (EAbP), utilização (EUtP) e no uso de fósforo (EUP) em 14 linhagens e 39 combinações híbridas de milho, avaliados em alta disponibilidade de P, Viçosa-MG, 2010

FV	GL	Quadrado Médio						
		MPS	ARE	CRLat	CRaxi	EAbP	EUtP	EUP
Genótipos	52	1,42 ^{**}	2E-4 [*]	0,03 ^{**}	18,26 ^{**}	8E-5 ^{**}	2093,41 ^{ns}	2,41 ^{**}
Resíduo	52	0,24	1E-4	9E-3	2,56	3E-5	2362,97	0,40
Média		2,12	0,11	1,42	10,35	0,02	180,40	2,76
CV(%)		22,88	10,17	6,79	15,47	31,86	26,95	22,88
σ_g^2		0,59	5E-5	0,01	7,85	3E-5	-134,78	1,00
\hat{h}_g^2		0,83	0,48	0,72	0,86	0,68	-0,13	0,83

^{ns} não significativo, ^{*} significativo a 5% e ^{**} significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 3.6 - Resumo das análises de variância para os caracteres massa de parte aérea seca (MPS), área de raiz específica (ARE), comprimento de raiz lateral (CRLat) e axial (CRAXi), eficiência na absorção (EAbP), utilização (EUtP) e no uso de fósforo (EUP) em 14 linhagens e 39 combinações híbridas de milho, avaliados em baixa disponibilidade de P, Viçosa-MG, 2010

FV	GL	Quadrado Médio						
		MPS	ARE	CRLat	CRaxi	EAbP	EUtP	EUP
Genótipos	52	0,26 ^{**}	2E-4 ^{**}	0,04 ^{**}	20,07 ^{**}	8E-5 [*]	11643,23 ^{ns}	14,36 ^{**}
Resíduo	52	0,08	9E-5	4E-3	3,89	5E-5	8580,68	4,51
Média		0,98	0,10	1,48	10,80	0,01	510,26	7,28
CV(%)		29,16	9,00	4,39	18,25	45,45	18,15	29,16
σ_g^2		0,09	7E-5	0,02	8,09	2E-5	1531,27	4,93
\hat{h}_g^2		0,69	0,61	0,89	0,81	0,40	0,26	0,69

^{ns} não significativo, ^{*} significativo a 5% e ^{**} significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 3.7 - Estimativas dos efeitos diretos e indiretos, que envolvem a variável principal eficiência do uso do nitrogênio (EUN) e as variáveis independentes explicativas: comprimento de raiz lateral (CRLat) e axial (CRAxi), área de raiz específica (ARE), eficiência de absorção de N (EAbN) e massa da parte área seca (MPS) de 14 linhagens e 39 combinações híbridas de milho avaliados em alto e baixo N, Viçosa, MG, 2010

Caractere	Efeitos de Associação	Estimativas		
		Alto N	VIF*	Baixo N
MPS	Direto sobre EUN	0,430	7,573	0,872
	Indireto via ARE	-0,001	0,003	-
	Indireto via CRLat	0,079	2,241	0,037
	Indireto via CRAxi	0,099	2,241	0,014
	Indireto via EAbN	0,349	4,658	0,068
	Total	0,990		0,990
ARE	Direto sobre EUN	-0,025	1,122	-
	Indireto via MPS	0,022	0,017	-
	Indireto via CRLat	0,006	0,015	-
	Indireto via CRAxi	0,001	0,001	-
	Indireto via EAbN	0,048	0,087	-
	Total	0,051		-
CRLat	Direto sobre EUN	0,093	3,588	0,041
	Indireto via MPS	0,366	4,729	0,776
	Indireto via ARE	-0,002	0,005	-
	Indireto via CRAxi	0,099	2,226	0,014
	Indireto via EAbN	0,288	3,162	0,059
	Total	0,851		0,890
CRAxi	Direto sobre EUN	0,117	3,578	0,016
	Indireto via MPS	0,367	4,745	0,743
	Indireto via ARE	-0,003	0,002	-
	Indireto via CRLat	0,079	2,232	0,036
	Indireto via EAbN	0,282	3,029	0,057
	Total	0,853		0,852
EAbN	Direto sobre EUN	0,361	5,785	0,073
	Indireto via MPS	0,416	6,098	0,809
	Indireto via ARE	-0,003	0,017	-
	Indireto via CRLat	0,074	1,961	0,033
	Indireto via CRAxi	0,091	1,873	0,013
	Total	0,967		0,928
Coeficiente de determinação		0,952		0,981
Valor de k usado na análise		0,077		-
Efeito da variável residual		0,218		0,137
Determinante da matriz		0,030		-

*Fatores que inflacionam as variâncias

Tabela 3.8 - Estimativas dos efeitos diretos e indiretos, que envolvem a variável principal eficiência no uso do fósforo (EUP) e as variáveis independentes explicativas: comprimento de raiz lateral (CRLat) e axial (CRAxi), área de raiz específica (ARE), eficiência na absorção de P (EAbP) e massa da parte área seca (MPS) de 14 linhagens e 39 combinações híbridas de milho avaliados em alto e baixo P, Viçosa, MG, 2010

Caractere	Efeitos de Associação	Estimativas	
		Alto P	Baixo P
MPS	Direto sobre EUP	0,926	0,884
	Indireto via ARE	0,005	0,003
	Indireto via CRLat	-1E-4	0,007
	Indireto via CRAxi	0,021	0,031
	Indireto via EAbP	0,039	0,065
	Total	0,990	0,990
ARE	Direto sobre EUP	-0,010	-0,007
	Indireto via MPS	-0,445	-0,318
	Indireto via CRLat	7E-5	-0,003
	Indireto via CRAxi	-0,013	-0,016
	Indireto via EAbP	-0,013	-0,015
	Total	-0,481	-0,360
CRLat	Direto sobre EUP	-2E-4	0,009
	Indireto via MPS	0,666	0,641
	Indireto via ARE	0,004	0,002
	Indireto via CRAxi	0,022	0,030
	Indireto via EAbP	0,028	0,043
	Total	0,719	0,725
CRAxi	Direto sobre EUP	0,026	0,037
	Indireto via MPS	0,765	0,742
	Indireto via ARE	0,005	0,003
	Indireto via CRLat	-2E-4	0,007
	Indireto via EAbP	0,031	0,049
	Total	0,826	0,839
EAbP	Direto sobre EUP	0,044	0,072
	Indireto via MPS	0,809	0,799
	Indireto via ARE	0,003	0,002
	Indireto via CRLat	-1E-4	0,006
	Indireto via CRAxi	0,018	0,025
	Total	0,874	0,903
Coeficiente de determinação		0,981	0,981
Efeito da variável residual		0,139	0,137