

**FITO-SISTEMA MILHO-PIPOCA *versus* FÓSFORO: ANÁLISE
GENÉTICO-BIOMÉTRICA DA EFICIÊNCIA NUTRICIONAL DE
LINHAGENS ORIUNDAS DE GRUPOS DIVERGENTES**

THIAGO RODRIGUES DA CONCEIÇÃO SILVA

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO – UENF**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
MAIO – 2016**

FITO-SISTEMA MILHO-PIPOCA *versus* FÓSFORO: ANÁLISE
GENÉTICO-BIOMÉTRICA DA EFICIÊNCIA NUTRICIONAL DE
LINHAGENS ORIUNDAS DE GRUPOS DIVERGENTES

THIAGO RODRIGUES DA CONCEIÇÃO SILVA

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutor em Genética e Melhoramento
de Plantas.”

Orientador: Prof. Antonio Teixeira do Amaral Júnior
Coorientadora: Prof^a. Marta Simone Mendonça de Freitas

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
MAIO – 2016

FITO-SISTEMA MILHO-PIPOCA *versus* FÓSFORO: ANÁLISE
GENÉTICO-BIOMÉTRICA DA EFICIÊNCIA NUTRICIONAL DE
LINHAGENS ORIUNDAS DE GRUPOS DIVERGENTES

THIAGO RODRIGUES DA CONCEIÇÃO SILVA

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutor em Genética e Melhoramento
de Plantas.”

Aprovada em 24 de maio de 2016.

Comissão Examinadora:

Prof. Willian Krause (D.Sc., Genética e Melhoramento de Plantas) - UNEMAT

Prof. Geraldo de Amaral Gravina (D.Sc., Produção Vegetal) – UENF

Prof^a. Marta Simone Mendonça Freitas (D.Sc., Produção Vegetal) - UENF
Coorientadora

Prof. Antonio Teixeira do Amaral Júnior (D.Sc., Genética e Melhoramento) - UENF
Orientador

Se você abre uma porta, você pode ou não entrar em uma nova sala. Você pode não entrar e ficar observando a vida. Mas se você vence a dúvida, o temor, e entra, dá um grande passo: nesta sala vive-se! Mas, também, tem um preço... São inúmeras outras portas que você descobre.

O grande segredo é saber quando e qual porta deve ser aberta.

A vida não é rigorosa, ela propicia erros e acertos.

Os erros podem ser transformados em acertos quando com eles se aprende. Não existe a segurança do acerto eterno. A vida é generosa, a cada sala que se vive, descobrem-se tantas outras portas. E a vida enriquece quem se arrisca a abrir novas portas.

Ela privilegia quem descobre seus segredos e generosamente oferece afortunadas portas. Mas a vida também pode ser dura e severa.

Se você não ultrapassar a porta, terá sempre a mesma porta pela frente.

É a repetição perante a criação, é a monotonia monocromática perante a multiplicidade das cores, é a estagnação da vida... Para a vida, as portas não são obstáculos, mas diferentes passagens!

(IÇAMI TIBA)

Aos meus filhos Ana Luiza, Alice e Arthur Miguel. À minha grande companheira e esposa Aline, mãe dos meus filhos e parceira, que não mede esforços em me apoiar. À minha tia Fátima. Aos meus pais Tania e Reinaldo e aos meus Irmãos Reinaldo, Bruno e Joana.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus e à Nossa Senhora, por me concederem esta oportunidade;

À UENF, pela infraestrutura concedida e pelo suporte financeiro para realização deste trabalho, e à Faperj, pela concessão da bolsa de estudos;

À minha esposa Aline, pelo amor, carinho, companheirismo e dedicação;

Ao Professor Antônio Teixeira do Amaral Júnior, pela orientação, pela oportunidade concedida e por proporcionar o meu crescimento profissional;

À Professora Marta Simone e ao Senhor Acácio, pelo conhecimento transmitido e ajuda na condução do trabalho;

Aos Professores do programa de Genética e Melhoramento de Plantas, por todo conhecimento transmitido;

Ao Senhor José Daniel secretário do Programa, pela eficiência, pelo seu magnífico trabalho e dedicação;

Ao grande amigo de todas as horas Cássio Vittorazzi, pela sua fiel amizade e grande ajuda na condução deste trabalho.

Aos meus queridos sobrinhos/afilhados: Maria Eduarda (*in memoriam*), Rhuam, Thayná, Bernardo, Clara, Mikaelly, Maria Fernanda, Gabriel, Luiz Roberto, Vallentina, Helena, Everton e Dudu;

Aos meus amigos Arnaldo, Bebeto, Danilo, Daniel, Eltinho, Elzo, Evai, Evaldo, Ismael, Jefferson, Fufu, Luciano, Marcos Rodrigues (Marquinho), Lucia, (Tia Lucia) Vinícius, Wellington e Weverton, parceiros e amigos de todas as horas;

A todos os meus amigos, colegas e companheiros do meu ciclo de relacionamento social e profissional, em especial ao Professor Marcelo Vivas, Adriano, Higino, Janeo, Lucas, Aylton, Tarcísio, Alessandro, Clariana, Eidilane, Michele, Vera, Ayla, Mariana, Vagner, Jaiane, Mayara, Neves, Osvaldo, C. Augusto, Guilherme, Geremias, Leandro, Eduardo, Victor Vargas, Serginho, Wallace, Rodrigo, Valdinei, Pedro, Gabrielle, Railan, Juliana, Amanda, Marcelly, Samuel, Valter e Ismael's, pela boa convivência;

Aos Técnicos, e funcionário da UENF, em especial o Geraldo Carvalho, pela amizade e pelos conhecimentos de campo transmitidos durante nosso convívio.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	5
3. REVISÃO DE LITERATURA	6
3.1. Aspectos gerais do milho-pipoca e a busca por cultivares eficientes	6
3.2. Melhoramento genético de milho-pipoca, como ênfase no programa de melhoramento da UENF	8
3.3. O fósforo no solo e na planta	9
3.4. Conceitos e o melhoramento para eficiência ao fósforo	12
4. MATERIAL E MÉTODOS	16
4.1. Obtenção do substrato	16
4.1.1. Calagem, adubação e preenchimento dos vasos	18
4. 2. Seleção dos genótipos para tolerância a baixos níveis de fósforo	20
4.2.1. Plantio e obtenção do material de trabalho	21
4.2.2. Características avaliadas	22
4.2.2.1. As características foram estimação da seguinte forma	23
4.3. Análises genético-biométricas	24
4.3.1. Análise de variância	24
4.3.2. Parâmetros genéticos	25
4.3.3. Interação genótipos por ambiente	26

4.4. Variáveis Canônicas	27
4.5. Parâmetro α	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1. Análises de variâncias e de médias	30
5.2. Interação genótipos por ambientes	37
5.3. Análises de variâncias para os índices de eficiência ao P	39
5.4. Parâmetros genéticos	41
5.5. Discriminação genotípica com base em Variáveis Canônicas	47
5.6. Classificação genotípica com base no Parâmetro α	54
6. CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

RESUMO

SILVA, Thiago Rodrigues da Conceição, D.Sc. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Maio de 2016. Fito-sistema milho-pipoca *versus* fósforo: análise genético-biométrica da eficiência nutricional de linhagens oriundas de grupos divergentes. Orientador: Antonio Teixeira do Amaral Júnior; Coorientadora: Marta Simone Mendonça Freitas. Conselheiros: Geraldo de Amaral Gravina e Helaine Christina Cancela Ramos.

A expansão do mercado agrícola no Brasil vem permitindo que culturas, antes pouco cultivadas, ganhem mercado. Entre essas, destaca-se o milho-pipoca, que tem despertado o interesse dos produtores, devido seu produto ser altamente rentável e muito apreciado pela população brasileira. Para se alcançar uma produção ideal, há necessidade de uma adequada nutrição e, dentre os principais nutrientes para as plantas, destaca-se o fósforo (P). No Brasil, a maioria dos solos são altamente intemperizados, com baixa disponibilidade de P. Não por acaso, a produção agrícola do país é baseada em grande parte no uso de fertilizantes minerais, os quais elevam significativamente o custo de produção. O uso de cultivares mais eficientes no uso do P constitui, pois, uma alternativa de relevo para a redução dos custos. Apesar deste cenário, ainda são poucos os trabalhos sobre o melhoramento do milho-pipoca visando à eficiência na absorção, translocação e uso do P (EUAP). Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo investigar a dispersão gráfica de 29 linhagens S₇ divergentes de

milho-pipoca do Banco de Germoplasma da UENF, quanto à resposta, EUAP, quando cultivadas sob baixa e alta disponibilidade do nutriente. Foram avaliadas as seguintes características: CT (comprimento total), AS (área superficial radicular), VR (volume de raízes), AP (altura média da planta), CF (comprimento da última folha, DC (diâmetro do colmo), PMSA (produção da matéria seca da parte aérea), PMSR (produção da matéria seca da raiz), TPA e TPR (teor de fósforo na parte aérea e na raiz), CONTPA (conteúdo de P na parte aérea) e CONTPR (conteúdo de P das raízes). Essas informações das parcelas experimentais foram utilizadas para estimar os índices de eficiências: EE (eficiência de enraizamento), EAP (eficiência de absorção de P), ETP (eficiência de translocação de P), EUPPA (eficiência de utilização de P na parte aérea), R/PA (relação raiz parte aérea). O delineamento experimental utilizado foi blocos casualizados com quatro repetições, em que as 29 linhagens foram avaliadas em casa-de-vegetação, em vasos plásticos de 5,0 dm³ preenchidos com substrato formado por solo e areia na proporção de (3:1) – previamente caracterizado quanto seus atributos físicos e químicos – em dois níveis de P (4 mg/dm³ e 22mg/dm³ de P) reconhecidos, previamente, por alto e baixo para o P no substrato. Foram realizadas análises de variância individuais e conjuntas, estimados os parâmetros genéticos, avaliadas as Variáveis Canônicas e efetuada a análise do Parâmetro α proposto pelo CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1978). Os ambientes foram suficientemente distintos para promover diferenças entre as características avaliadas, bem como foi confirmada suficiente variabilidade genética entre as linhagens. Com base no teste de médias, foi possível a discriminação das linhagens em dois grupos distintos, destacando-se 7 (P7), 3 (P3), 16 (L59) e 2 (P2) como eficientes; e 29 (L88), 19 (L65), 24 (L74) e 17 (L61), como ineficientes na absorção de P no solo. Concluiu-se que a EUP pode ser avaliada indiretamente, pela estimação da produção de biomassa da raiz associada à produção de matéria seca da parte aérea, permitindo a implementação de trabalhos em casa de vegetação, com um custo menor, sobretudo, em relação à demanda de mão de obra, reduzindo assim, o tempo para o lançamento de cultivares com esses atributos. Os parâmetros genéticos evidenciaram possibilidade de ganhos por seleção para as características avaliadas sob condição de estresse. As Variáveis Canônicas e o Parâmetro α , revelaram resultados concordantes na discriminação dos genótipos, classificando

as linhagens P2, P3 e P7, como eficientes no uso do P. Já, as linhagens L65, L74 e L88, destacaram-se por serem ineficientes na utilização do nutriente, apresentando magnitudes reduzidas do índice utilização do P e da relação raiz/parte aérea.

ABSTRACT

SILVA, Thiago Rodrigues da Conceição, D.Sc. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, May 2016. Popcorn phytosystem versus phosphorus: genetic-biometric analysis of the nutritional efficiency of lines originated from divergent groups. Advisor: Antonio Teixeira do Amaral Júnior; Co-advisor: Marta Simone Mendonça Freitas. Counselors: Geraldo de Amaral Gravina and Helaine Christina Cancela Ramos.

The expansion of the agricultural market in Brazil has allowed little cultivated crops to gain market power. Among these crops, popcorn has aroused the interest of producers, since its product is highly profitable and appreciated by the Brazilian population. To achieve optimum production, adequate nutrition is necessary, and phosphorus (P) stands out among the main nutrients for plants. In Brazil, most soils are highly weathered, with low P availability. Not coincidentally, the country's agricultural production is largely based on the use of mineral fertilizers, which significantly increase production costs. The use of cultivars which are more efficient in the P uptake is therefore an important alternative to reduce costs. Regarding this scenario, there are few studies on popcorn improvement aimed at the efficiency in P absorption, translocation and use (PATU). Given the above, this study aimed to investigate the graphic dispersion of 29 S7 divergent popcorn lines of the Germplasm Bank of UENF, regarding the response, PATU, when cultivated under low and high nutrient availability. The following characteristics were evaluated: TL (total length), SA (root surface area), RV (root volume), PH (mean

plant height), LL (length of the last leaf), SD (stem diameter), SDMY (shoot dry matter yield), RDMY (root dry matter yield), PLS (phosphorus level in the shoots), PLR (phosphorus level in the roots), PCS (P content in the shoot), and PCR (P content in the roots). This information on the experimental plots was used to estimate the efficiency indices: RE (rooting efficiency), PAE (P absorption efficiency), PTE (P translocation efficiency), PUES (P utilization efficiency in the shoot); R/S (root and shoot ratio). The experimental consisted of randomized block design with four replications, in which 29 lines were evaluated in a greenhouse, in 5.0 dm³ plastic pots filled with substrate composed of soil and sand, at the ratio of (3: 1) - previously characterized regarding its physical and chemical properties - at two P levels (4 mg/dm³ and 22mg/dm³ P), recognized previously by high and low for the P level in the substrate. Individual and joint analysis of variance was carried out; the genetic parameters were estimated; the canonical variances were evaluated; and the Parameter α proposed by the CIAT (International Center for Tropical Agriculture, 1978) was analyzed. The environments were distinct enough to promote differences between the characteristics evaluated, confirming sufficient genetic variability among. Based on means test, it was possible to discriminate the lines into two distinct groups, highlighting the groups 7 (P7), 3 (P3), 16 (L59), and 2 (P2) as efficient; and 29 (L88), 19 (L65), 24 (L74), and 17 (L61) as inefficient in P absorption. It was concluded that the P efficiency and use (PEU) can be indirectly evaluated by estimating root biomass production associated with the shoot dry matter yield, allowing the implementation of studies in greenhouse, at lower cost, particularly in relation to workforce, and thus reducing the time for the release of cultivars with these attributes. The genetic parameters evidenced the possibility of gains with selection for the traits evaluated under stress condition. The canonical variables and the Parameter α revealed consistent results in the discrimination of genotypes, and classified the lines P2, P3 and P7 as efficient in P use. On the other hand, the lines L65, L74 and L88 stood out for being inefficient in P use, with reduced magnitude of the P use index and the root/shoot ratio.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com informações da Organização das Nações Unidas (ONU), o Planeta Terra atingiu 7,3 bilhões de pessoas em 2015 (ONU, 2015). Com a taxa atual de crescimento anual de 1,2 %, a estimativa de 8,5 bilhões de pessoas no Planeta, no ano de 2030, conforme Murrel e Fixen (2006) e Baligar e Fageria (2001), tende a se concretizar, o que resultará em considerável aumento na demanda por alimentos. Para equacionar a proporção de oferta e demanda, a produção mundial de cereal terá que dobrar até 2025, sendo que estes aumentos, em sua maioria, deverão ser fundamentados em ganhos de produtividades, em vez de incorporação de novas áreas (Parentoni et al., 2010).

Dentre os milhos especiais, o milho-pipoca (*Zea mays* L. var. *everta*) tem, na pipoca, um produto muito aceito como aperitivo em momentos de lazer e descontração e que é bastante apreciado por várias faixas etárias de diversas classes sociais Sawazaki, 2001; Parentoni et al., 2012).

Para um ideal de desenvolvimento e crescimento das plantas e, não diferentemente, dos cereais, dentre os principais elementos, destaca-se o fósforo

(P), que está presente em componentes estruturais, como nos ácidos nucleicos e fosfolipídios das biomembranas e, também, em componentes metabólicos (Faquin, 2005; Quaggio et al., 2006; Novais et al., 2007; Mattar et al., 2013; Taiz e Zeiger, 2013).

No Brasil, a maioria dos solos é altamente intemperizada, com baixo pH, alto teor de alumínio na sub-superfície e baixas disponibilidades de nutrientes. Estes solos apresentam insuficiente disponibilidade de fósforo em condições naturais. Campos e De Campos (2004) relataram que a agricultura brasileira é baseada, em grande parte, no uso de fertilizantes, os quais, ou são obtidos a partir de combustíveis fósseis, como o nitrogênio, ou dependem de recursos minerais, que devem se esgotar em um período relativamente curto de tempo, como o fósforo e o potássio. Baligar et al. (2001) compararam a eficiência média global na agricultura, em relação ao uso de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), e ressaltaram que para o N, estes valores são, em geral, menores que 50 %; para o K encontram-se por volta de 40 % e, para o P, podem ser inferiores a 10 %.

A baixa disponibilidade de P nos solos altamente intemperizados das regiões tropicais está associada à capacidade dos solos em adsorver e, conseqüentemente, indisponibilizar às plantas o P aplicado, de forma a competir com as raízes das plantas pelo nutriente. O fenômeno de adsorção específica do fósforo associado aos minerais dos solos tropicais é uma das principais limitações de produtividade para as culturas (Quaggio et al., 2006), o que torna necessária a adição aos solos de dosagens superiores às necessárias para as plantas (Schenck e Barber, 1980; Novais et al., 2007; Mattar et al., 2013).

O fósforo é o segundo nutriente consumido na produção agrícola global, sendo superado apenas pelo nitrogênio (Batten, 1992). Para a produção de alimentos, o mundo depende do fósforo como nutriente, no entanto, estima-se que a maior mina de fósforo dos EUA estará esgotada em 20 anos, além do que, por um balanço da vida útil das reservas que podem suprir a agroindústria e a população humana, concluiu-se que têm vida útil de 60 a 250 anos (Gomes, 2016).

Na região Norte do Estado do Rio de Janeiro, levantamentos regionais sobre as condições químicas dos solos, realizados pela FUNDENOR (Fundação Norte Fluminense de Desenvolvimento Regional) apontam para uma situação

semelhante, onde o teor médio de fósforo não ultrapassa 5 mg.dm^{-3} , valor considerado baixo para o bom desempenho da maioria das plantas cultivadas na região (da Gama-Rodrigues et al., 1994; De-Polli et al., 1999).

Neste aspecto, pesquisas que identifiquem genótipos mais eficientes e mais responsivos, contribuem para a obtenção de cultivares mais adaptadas às condições limitantes, assim como para sistemas de cultivo com baixa aplicação de insumos, o que favorece a sustentabilidade agrícola da cadeia de produção. Segundo Parentoni e Souza (2008), cada vez mais, cultivares desenvolvidas pelos programas de melhoramento de plantas são selecionadas para proporcionarem altas produtividades em ambientes favoráveis, que demandam altas dosagens de insumos e, em geral, utilizam estes de forma ineficiente. Assim, é relevante mencionar que, no caso da atividade agrícola, a busca por plantas mais eficientes em converter nutrientes em produtos finais deve ser considerada como “peça chave” neste “novo” paradigma de maximização do uso dos fatores de produção.

Duncan (1994) cita que a base genética da tolerância ao baixo nível de P, em plantas, pode variar entre e dentro de espécies, já que diferentes estratégias ou mecanismos relacionados à tolerância ao baixo P podem ter diferentes tipos de controle gênico. Sobre o controle gênico destes processos, as características relacionadas à absorção de P são, geralmente, poligênicas (Goldstein, 1991; Clarkson e Hawkesford, 1993; Parentoni, 2008; Fritsche-Neto et al., 2010), as de eficiência de utilização de P para a produção de matéria seca também são poligênicas, sendo que tanto efeitos aditivos quanto efeitos dominantes têm se mostrado importantes na expressão da característica (Fawole et al., 1982; Gabelman e Gerloff, 1983; Parentoni, 2008; Mendes et al., 2012).

Como são poucas as pesquisas que tratam da análise genética da nutrição mineral do P em milho-pipoca no país (Mundim et al., 2013), apesar de se tratar de um nutriente tão importante, entende-se que a avaliação precoce de linhagens sob condições de estresses abióticos é um passo de relevância fundamental para o estabelecimento de um programa de melhoramento, com foco na obtenção de cultivares eficientes no uso do nutriente, o que se traduz na disponibilização de híbridos de interesse para o agronegócio nacional.

A avaliação e seleção de linhagens de milho-pipoca para maior eficiência na absorção e utilização de nutrientes revestem-se, ainda mais de elevada

importância para o Brasil, por possuir vastas extensões de solos ácidos, pouco férteis, com alta capacidade de fixação de fósforo, em que predominam agricultores com baixo capital para investimento.

Por conseguinte, o objetivo deste trabalho foi avaliar a dispersão genética de linhagens de milho-pipoca do Banco de Germoplasma da UENF, oriundas de diferentes genealogias, quanto à eficiência na absorção, translocação e uso do P. Este estudo servirá como base para possibilitar a identificação de genitores contrastantes, mais e menos eficientes para o fósforo, que será instrumento básico para, a *posteriori*, determinar o controle genético da eficiência para o fósforo em milho-pipoca e, assim, estabelecer a estratégia de melhoramento mais adequada para a seleção de genótipos superiores em gerações segregantes.

2. OBJETIVO

Investigar a dispersão gráfica de 29 linhagens S_7 , oriundas de genealogia divergentes de milho-pipoca, quanto à eficiência de absorção e de utilização do fósforo, quando cultivadas em substrato com baixa e alta disponibilidade do nutriente.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Aspectos gerais do milho-pipoca e a busca por cultivares eficientes

O milho-pipoca [*Zea mays* L. var. *everta* (Sturtev) L. H. Bailey] é originário da subfamília Panicoide, tribo Maydeae, gênero *Zea* e espécie *Zea mays* L., de forma semelhante ao milho comum. No entanto, o milho-pipoca difere do milho comum, por possuir grãos menores, maior prolificidade e menor vigor da planta. Entretanto, a principal diferença do milho-pipoca em relação ao milho comum consiste na capacidade do grão de se expandir dando origem à pipoca (Brunson, 1937; Hallauer e Carena, 2009). A expansão do grão ocorre quando este é submetido à pressão de 135 psi, decorrente do aquecimento em torno de 177 °C (Hoseney et al., 1983; Silva et al., 1993).

Em relação à arquitetura e à fisiologia das plantas, geralmente as cultivares de milho-pipoca são mais prolíficas, superprecoces na maturação e na secagem dos grãos, além de possuírem um sistema radicular menos desenvolvido, o que torna a planta mais suscetível, também, ao acamamento e à seca (Fantin et al., 1991; Hallauer, 2001). Possivelmente, isso ocorre devido aos caracteres agronômicos do milho-pipoca se correlacionem, negativamente, com os caracteres de qualidade da pipoca (Willier e Brunson, 1927; Pacheco et al., 1998; Hallauer, 2001; Daros et al., 2004; Rangel et al., 2011). De outro modo, poder-se-ia pressupor que quando se melhora para capacidade de expansão, o genitor que apresenta tais características desejáveis trará consigo características

indesejáveis, tais como: baixo vigor, baixa produtividade e maior suscetibilidade a fatores edafoclimáticos.

Com o passar do tempo, novas concepções de pesquisas científicas na área agrícola tornam-se necessárias, de forma a permitir benefícios à humanidade, sem agressão ao homem ou ao seu Planeta. O Melhoramento Genético, a Ciência do Solo e a Fitotecnia, enquanto ciências inovadoras, não devem estar alijadas deste propósito. Neste aspecto, estudos a respeito da resposta de genótipos a condições estressantes, como, por exemplo, a altas temperaturas, a elevados teores de alumínio ou a baixos níveis de fósforo, dentre outras, devem merecer destaque por parte das agências fomentadoras de recursos, pelo fato de proporcionarem uma melhor harmonia na exploração econômica e na preservação ambiental.

No Brasil, a exploração do potencial genético-adaptativo de cultivares em solos com reduzidos teores de fósforo é um aspecto que se torna sobremaneira importante. Tendo em vista que cerca de 80 % dos solos apresentam teores de fósforo considerados baixos para o desenvolvimento das culturas (Novais e Barros, 1997), além do que a maioria desses solos possui elevada capacidade de fixação do elemento (Leal e Velloso, 1973; Whiteaker et al., 1976; Gonçalves et al., 1985), acarretando em baixa eficiência da adubação fosfatada (Oliveira et al., 1982; Goedert (1987); Souza et al., 2008; Quaggio et al., 2006; Mattar et al., 2013).

Outrossim, as fontes minerais de fósforo são um recurso natural não-renovável, cujas reservas mundiais tendem a se esgotar no intervalo de 300 a 400 anos, caso continue o atual nível de exploração, conforme preconizado por Stangel (1984) e Cella e Rossi (2010), sendo que as maiores reservas mundiais estão em países como Marrocos (60 %), China (15 %), Estados Unidos (4 %), África do Sul (4 %) e Jordânia (2 %), que detêm 85 % das reservas da rocha. Os três maiores produtores mundiais são os Estados Unidos, a Rússia e Marrocos, já o Brasil é o sétimo produtor mundial de fosfato e tem as maiores jazidas nos estados de Minas Gerais (73,8 %), Goiás (8,3 %) e São Paulo (7,3 %) (Albuquerque et al., 2005; IFA, 2009; Nehring, 2016). Os principais países fornecedores de P para o Brasil são: Marrocos (24 %), Rússia (21 %), Estados Unidos (17 %), China (16 %) e Israel (12 %) (FAO, 2009).

Portanto, a busca por genótipos mais eficientes no uso do fósforo e a adaptação de genótipos a solos com baixa disponibilidade é alternativa extremamente valiosa para prolongar a vida útil das reservas naturais de fosfato e reduzir o custo de produção.

3.2. Melhoramento genético de milho-pipoca, como ênfase no programa de melhoramento da UENF

No Brasil, o melhoramento do milho-pipoca teve maior impulso a partir de 1990, embora o primeiro programa de milho híbrido tenha se iniciado em 1932, no Instituto Agrônomo de Campinas, sendo que em 1941 foi lançada a primeira variedade nacional, que se originou de ciclos de seleção massal na população-base *South American Mushroom* (SAM), derivada de *South American*, proveniente dos E.U.A. Mas, apenas em 1988 é que ocorreu o lançamento do primeiro híbrido simples, designado IAC 112 (Sawazaki, 2001). Porém, conforme os registros mais fidedignos, o primeiro lançamento de híbrido no país ocorreu mesmo em 1941, pela PIONEER, que foi denominado de Zélia.

Em abril de 2006, foi registrado o IAC 125, híbrido *topcross* (híbrido simples x variedade), resultado do cruzamento do IAC 112 com um sintético obtido de um híbrido norte-americano. O IAC 125 é uma versão de híbrido simples do IAC 112. Atualmente, o IAC 112 é o híbrido de melhor sanidade de espiga com grande estabilidade de produção, devido à resistência às principais doenças foliares, viroses e a podridões de grãos.

A partir de então, o programa de melhoramento genético de milho-pipoca da UENF vem interagindo amplamente com novos grupos de pesquisa, abrangendo assim, novas vertentes, como tolerância a estresses abióticos, que é o caso do fósforo e do nitrogênio, do estresse hídrico, bem como de estresses bióticos, como investigações da resistência a doenças de importância econômica para a cultura do milho-pipoca, no intento de estabelecer programas com abordagem sustentável para o Norte e Noroeste Fluminense.

A história do melhoramento do milho-pipoca da UENF (Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro) iniciou-se com o professor Joachim Friedrich Wilhelm von Bülow, com o melhoramento populacional a partir de UNB-

2U, passando por Pereira e Amaral Júnior (2001), que promoveram estudos de herança por meio do Delineamento I, de Comstock e Robinson (1948) na mesma população UNB-2U e propuseram estratégias de seleção recorrente intrapopulacional para obtenção de ganhos genéticos superiores (Pereira e Amaral Junior, 2001; Amaral Junior et al., 2013).

Com base na progressiva evolução dos resultados obtidos com a população UNB-2U, em 2012 foi realizado o lançamento de UENF-14 (nome atribuído à variedade melhorada a partir da população UNB2-2U) (Amaral Junior et al., 2013). Outro resultado promissor é o fato que o método de seleção recorrente tem contribuído expressivamente na extração de linhagens que servirão como base para a obtenção de híbridos ao longo do processo.

A população UNB-2U, ora designada UENF 14, quando de seu lançamento (Amaral Junior et al., 2013), vem passando por diversos ciclos de seleção recorrente, com ganhos crescentes para as principais características de importância econômica da cultura, decorrente dos trabalhos desenvolvidos por estudiosos do melhoramento desta população, a saber: Daros et al. (2002), Santos et al. (2007), Freitas Júnior et al. (2009), Rangel et al. (2009), Ribeiro et al. (2012), Freitas et al. (2014), Guimarães et al. (2016), Vittorazzi et al. (2016).

3.3. O fósforo no solo e na planta

O ciclo do fósforo no solo envolve as plantas, os animais e os microrganismos. Incluem-se nesse sistema, o processo de absorção pelas plantas, de reciclagem pelos resíduos de plantas e de animais, de reciclagem biológica pelos processos de mineralização-imobilização, de reações de adsorção pelas argilas e óxidos e hidróxidos do solo, e solubilização de fosfatos pela atividade de micro-organismos e plantas. Quando os solos são cultivados, o ciclo é alterado, pois há adição de elementos com as adubações e exportações na colheita ou ocorrência de erosão ou percolação (Stevenson, 1994; Barros Filho, et al., 2005; Mattar et al., 2013).

No solo, o fósforo pode ser dividido em dois grupos, de acordo com a natureza do composto a que está ligado: o P inorgânico forma prontamente absorvível pelas plantas; e o P orgânico, que deve ser mineralizado para que as

plantas possam absorvê-lo (Dechen e Nachtigall, 2007). Para mineralizar o P, é preciso da interação de uma série de fatores, como: alterações na rizosfera, como a liberação de exudatos orgânicos; a alteração do pH; bem como a associação com micro-organismos, como bactérias diazotróficas e micorrizas. Segundo Paul e Clark (1996), os principais fatores que afetam a taxa de mineralização do resíduo vegetal são a quantidade e a qualidade do substrato.

De acordo com Barber (1984), a liberação do fósforo orgânico para a solução do solo é controlada pela taxa de mineralização da matéria orgânica e depende da atividade microbiana. Giacomini et al. (2003) verificaram que a velocidade de liberação de nutrientes dos resíduos culturais durante o processo de decomposição depende da localização e da forma na qual esses nutrientes se encontram no tecido vegetal, sendo que, para o P, pelo fato de ser um constituinte da estrutura do tecido vegetal, a liberação apresenta uma íntima relação com a mineralização desses materiais. A estabilidade destes compostos depende de sua natureza e de sua interação com a fração mineral, pois eles são utilizados como fonte de carbono pelos micro-organismos, cujos resultados são a mineralização e disponibilização do fósforo para as plantas (Parentoni et al., 2011).

A fração inorgânica, por sua vez, pode ser separada em duas partes: o fósforo dos minerais primários e o fósforo adsorvido. Principalmente em condições tropicais, a maior parte do fósforo inorgânico encontra-se adsorvida pelo solo e não disponível para as plantas (Collins et al., 2008). A adsorção do P no solo depende, principalmente, do pH, sendo que em solos com pH menores que 7 aumenta a disponibilidade do ânion H_2PO_4^- , forma preferencialmente absorvida pelas plantas. Entretanto, em solos ácidos, como os que predominam na realidade do Brasil, há altas concentrações de ferro (Fe) e alumínio (Al) em sua solução, o que pode provocar a precipitação do fósforo inorgânico como fosfatos de Fe e de Al. Com o aumento do pH, a carga superficial de partículas do solo torna-se cada vez mais negativa, aumentando a repulsão (menor adsorção) entre o fosfato e a superfície adsorvente. Contudo, nos solos com pH muito alcalinos, quase todo o fósforo inorgânico se encontra na forma de PO_4^{3-} , forma não absorvida pelas plantas, ou precipitado como hidroxiapatita ou como carbonatoapatita (Dechen e Nachtigall, 2007; Taiz e Zeiger, 2013).

Cerca de 75 % do fósforo presente nas sementes está armazenado na forma de myo-inositol (1,2,3,4,5,6)-hexakisphosphate (insP6), conhecido como

fitato, o qual está depositado sob a forma de sais contendo vários cátions, como potássio, magnésio, cálcio, ferro e zinco. É uma molécula de açúcar/álcool ligada a seis grupos fosfato, constituindo-se em fonte de fósforo para a germinação da semente (Raboy, 2001). No milho, 90 % deste fitato estão localizados no embrião e, 10 %, na aleurona.

Durante a germinação da semente, este fitato é quebrado por enzimas presentes na semente, liberando o P e outros minerais para serem utilizados pela plântula. Estes compostos contendo fitato servem, então, para diversas funções nos estádios iniciais da germinação, tais como: atuam como doadores de P na regeneração do ATP a partir de ADP antes da reconstituição das membranas mitocondriais; atuam no processo de quebra e reparo das fitas duplas de DNA e na transferência do RNA do núcleo para o citoplasma, além de servirem como reserva de cátions necessários ao metabolismo celular (Taiz e Zeiger, 2013). Estudos têm revelado que este fitato tem função importante na resposta das “células guardas” dos estômatos ao ácido abscísico (Konietzny e Greiner, 2002; Parentoni e Souza Jr, 2008).

De acordo com Fritsche-Neto et al. (2010), o fitato na semente teria mais importância para plantas que crescem sem a interferência do homem, do que em culturas que recebem altas doses de adubos fosfatados para seu estabelecimento. Por outro lado, possíveis efeitos benéficos também podem ser atribuídos ao maior teor de fitato nos grãos, como sua capacidade de inibir a produção de aflotoxina e de aumentar o vigor das plântulas (Batten, 1992; Konietzny e Greiner, 2002).

A obtenção de genótipos com menor teor de P nos grãos diminui a exportação deste nutriente, sobretudo em áreas deficientes e de baixo uso de insumos, segundo Batten (1992). Outros autores concluíram que há uma correlação negativa entre o teor de fitato e o peso de grão em linhagens de milho, sugerindo que a seleção para baixo teor de fitato poderia levar a um aumento no tamanho da semente, nesta espécie (Coelho et al., 2002).

3.4. Conceitos e o melhoramento para eficiência ao fósforo

Clark e Brown (1974) definem como eficiente, um genótipo capaz de acumular grande quantidade de P em um ambiente pobre deste nutriente. Este conceito não tem sido utilizado por não considerar a produtividade do genótipo neste ambiente. Embora haja vários conceitos para o uso eficiente de fósforo (Clarck e Brown, 1974; Gerloff, 1976; Fox, 1978; Fawole et al., 1982; Gabelman et al., 1983), basicamente, tal definição pode ser resumida pela maior produção de biomassa por unidade de fósforo absorvido (Nassery, 1970; Baligar e Fageria, 2001; Majerowicz et al., 2002).

Sobre o contexto fisiológico, a eficiência para o fósforo está associada à capacidade de absorção do elemento (Lindgren et al., 1977) e à intensidade de redistribuição nos tecidos vegetais para uso interno (Whiteaker et al., 1976). Para algumas culturas, como o sorgo e o trigo, tem sido esclarecido que a eficiência na utilização do fósforo está vinculada à sua maior capacidade de redistribuição interna (Wieneke, 1990; Horst et al., 1993). Não obstante, em capim-colonião, o transporte de fósforo para a parte aérea foi o fator mais importante na diferenciação entre genótipos (Furlani e Usberti Filho, 1990).

O fósforo é crucial no metabolismo de todas as plantas, desempenhando um importante papel, na transferência de energia da célula, na respiração e na fotossíntese. É, também, componente estrutural dos ácidos nucleicos de genes e cromossomos, assim como de muitas coenzimas, fosfoproteínas e fosfolipídeos. As limitações na disponibilidade de P no início do ciclo vegetativo podem resultar em restrições no crescimento, das quais a planta não se recupera posteriormente, mesmo aumentando o suprimento de P em níveis adequados (Rotili et al., 2010; Rotili et al., 2015). O suprimento adequado de P é essencial desde os estádios iniciais de crescimento da planta (Almeida Júnior et al., 2009).

Uma maior eficiência de utilização do P (EUP) pode ser obtida pelo aumento na aquisição e na utilização interna do nutriente pelas plantas (Hammond et al., 2004; Parentoni e Souza Junior, 2008). A melhoria da EUP pelo aumento na aquisição de P é resultante da morfologia e arquitetura da raiz e está relacionada ao aumento do volume e área radicular. Segundo Baligar e Fageria (1997), a maior EUP proporciona aumento na produção de biomassa por unidade de P translocada (Ma et al., 2003).

Segundo Fritsche-Neto et al. (2010), o acúmulo de fósforo e de matéria seca são caracteres que podem ser utilizados na seleção indireta de plantas mais EUP, sob alta e baixa disponibilidade de P no substrato. Por isso, pesquisas que estudam a interação entre dosagens de nutrientes adequadas podem eliminar desperdícios, reduzir custos, pois se sabe que dosagens muito altas de adubos desbalanceiam as relações entre nutrientes no solo (Shortall e Liebhardt, 1975; Gianello e Ernani, 1983; Wang et al., 1984).

Mendes et al. (2012) relataram que para garantir sua sobrevivência em solos com baixas concentrações de P, as plantas desenvolveram no seu processo evolutivo artifícios morfológicos, bioquímicos e simbióticos que aumentam a capacidade de aquisição de P e, ou melhoram a eficiência de utilização interna desse nutriente.

Dentre essas adaptações, podem-se destacar: modificações radiculares, como aumento do tamanho, densidade, diâmetro e formação de pelos do sistema radicular; associação com microrganismos como bactérias e fungos micorrizos; modificações do microambiente na rizosfera; distribuição e remobilização do nutriente na parte aérea, compreendendo remobilização de partes maduras, como folhas velhas, para meristemas de crescimento vegetativo e reprodutivo, e ainda, a capacidade do genótipo em manter o metabolismo normal com concentrações reduzidas do nutriente no tecido (Moura et al., 2001). A formação de parênquimas, por exemplo, tem sido relatada por alguns autores como uma das modificações anatômicas verificadas em raízes de plantas cultivadas em condições de estresse nutricional de nitrogênio (He et al., 1997), de fósforo (Fan et al., 2003; Ma et al., 2003; Coelho et al., 2010) e de sulfato (Bouranis et al., 2006).

Isto posto, conhecimento dos caracteres e dos mecanismos envolvidos na eficiência nutricional (aquisição, utilização e translocação de nutrientes para os grãos), assim como de sua herança genética em solos com baixos teores de nutrientes, é fundamental para orientar o melhorista quanto ao método mais adequado a ser empregado na sua cultura de interesse (Gaume et al., 2001; Yun e Kaeppler, 2001; Hirel et al., 2007). É importante que se estabeleçam estratégias de melhoramento para aumentar a eficiência no uso do P, além de conhecer o controle genético dessa característica. Nesse sentido, informações sobre o tipo de

ação gênica predominante irão contribuir para escolha de estratégias mais adequadas.

São muitas as características utilizadas para se estudar e entender a eficiência na utilização dos nutrientes necessários para o crescimento do milho (Mendes et al., 2012). Para a cultura do milho-pipoca, como estes estudos são menos expressivos, podem-se utilizar os descritores que vêm sendo bem-sucedidos para o milho comum, uma vez que apesar das peculiaridades, o milho-pipoca se parece muito com o milho comum em termos morfológicos e fisiológicos (Von Pinho et al., 2010).

Furlani et al. (1985) avaliaram quarenta linhagens de milho comum quanto aos sintomas visuais de deficiência de P. A classificação foi baseada nos pesos de matéria seca, dispostos numa curva de distribuição "t" de médias. De acordo com o intervalo de confiança da média geral, calculado com 99,9 % de probabilidade, separou-se o material em 11 linhagens ineficientes (com peso abaixo de 5,28 g), 20 linhagens medianamente eficientes (com peso entre 5,28 e 6,04 g) e nove linhagens eficientes (com peso acima de 6,04 g). Com o intuito de estudar o efeito da omissão de P nas características fisiológicas de absorção de P e no comprimento de raízes de milho comum, Alves et al. (2002) avaliaram oito genótipos, sendo quatro eficientes e quatro ineficientes para absorção de P. Constatou-se que a omissão de P no meio de cultivo é um mecanismo geral de resposta das plantas à deficiência de P, onde aumentou significativamente o comprimento radicular em três dos genótipos eficientes, indicando que o crescimento diferencial do sistema radicular pode ser um dos possíveis mecanismos da eficiência para fósforo em milho comum.

Pesquisas têm revelado que os melhores critérios e métodos usados para avaliar plantas mais eficientes na absorção e uso de nutriente são os que submetem as plantas de diferentes genótipos às condições de baixo nível do nutriente em solução nutritiva ou em solo, observando se tais diferenças são devidas aos mecanismos de absorção e, ou de utilização do nutriente para produção de matéria seca (Gerloff, 1976; Whiteaker et al., 1976; Lindgren et al., 1977; Gabelman, 1983; Furlani e Clark, 1984; Furlani et al., 1985).

Estudos que submeteram genótipos de milho ao teor de 8 mg.dm^{-3} de concentração de P, revelaram que houve uma diferenciação marcante entre os genótipos estudados, mas com efeito já depressivo sobre algumas delas. Furlani

et al. (1985) consideraram importante observar o desempenho dessas linhagens nos níveis mais baixos. Na concentração de 2 mg.dm^{-3} de P na solução nutritiva, observou-se uma separação bastante razoável das linhagens, em termos de produção de matéria seca total. Já, em 1 mg.dm^{-3} , a separação foi menor. Estes caracteres genéticos nem sempre podem estar correlacionados diretamente com a produção do genótipo, da mesma forma que outros importantes caracteres, mas eles podem ser incorporados aos genótipos-elite que possuem características agrônomicas desejáveis. De forma sumariada, a eficiência para o uso do fósforo vem sendo mais estudada no decorrer das últimas décadas para algumas culturas, como: alface (Cock et al., 2002; Cock et al., 2003; Fonseca et al., 2013); alfafa (Missaoui e Young, 2016); arroz (Fukuda et al., 2007); cafeeiro (Braccini et al., 1998; Martins et al., 2013; Neto et al., 2016); capim-colonião (Furlani e Usberti Filho, 1990); feijoeiro (Lindgren et al., 1977; Silva et al., 2016); mamona e pinhão-manso (Martins et al., 2010); milho comum (Furlani et al., 1985; Furlani et al., 1998; Machado et al., 2001; Fernandes e Muraoka, 2002; Zhu et al., 2006; Fidélis et al., 2008; Li et al., 2008; Chen et al., 2009; Fritsche-Neto et al., 2010; Li et al., 2010; Parentoni et al., 2010; Chen et al., 2011; Guimarães, 2011; Guimarães et al., 2012; Mendes et al., 2012); nabo (Yao et al., 2011); pimentão (Moura et al., 1999; Oliveira et al., 1982); soja (Zhang et al., 2009; Chen et al., 2011); sorgo (Furlani et al., 1984; Wieneke, 1990); tomateiro (Hochmuth et al., 1985); e trigo (Batten, 1992; Horst et al., 1993; Jamjod et al., 1993).

No Brasil, em se tratando de pesquisa relacionada ao melhoramento do milho-pipoca para ambientes estressantes aos nutrientes no solo, pode-se citar apenas o trabalho desenvolvido por Mundim et al. (2013). Em termos de Centros de Pesquisa, apenas o CNPMS (Centro Nacional de Pesquisas milho e Sorgo da Embrapa) possui uma linha de pesquisa associada ao Programa de Melhoramento de Milho da Embrapa Milho e Sorgo sobre tolerância a estresses abióticos, visando à caracterização e geração de linhagens, híbridos e sintéticos de milho-comum (Guimarães et al., 2012; Mendes et al., 2012). Isto demonstra a incipiência de pesquisas inerentes com a espécie *Zea mays*, o que causa perplexidade, tendo em vista que o milho comum, assim como os milhos especiais, são culturas dependentes de maciças adubações químicas efetuadas com o fósforo para que se tenham produções satisfatórias.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Dois experimentos foram conduzidos – um para cada nível de fósforo, baixo e adequado -, em condições de casa de vegetação na Unidade de Apoio a Pesquisa do CCTA/UENF, em Campos dos Goytacazes - RJ, (21°45'43.63"S e 41°17'15.65"O) em vasos plásticos de 5,0 dm³, preenchidos com substratos formado por três partes de terra previamente caracterizada e uma parte de areia lavada e devidamente identificada.

4.1. Obtenção do substrato

Para compor o substrato, foram coletadas amostras de solo em diferentes locais do Colégio Agrícola Antônio Sarlo, em Campos dos Goytacazes-RJ, visando à seleção daqueles desejáveis, ou seja, com baixo teor de fósforo. As amostras dos solos foram coletadas na camada de 0-60 cm de profundidade, onde foram separadas e homogeneizadas, passadas em peneira de malha 4 mm e analisadas para aferição de suas propriedades físico-químicas, conforme o método preconizado pela EMBRAPA/CNPMS (1979).

As análises foram realizadas no Laboratório de Fitotecnia da UENF, em que se avaliaram as características de textura física e os seguintes atributos químicos: pH e P. Assim, o solo selecionado para a composição do substrato foi aquele que apresentou o teor de P mais baixo, correspondendo a, aproximadamente, 0,8 mg/dm³.

Tabela 1 - Classificação da área selecionada para a retirada do solo, que deu origem ao substrato.

Local	Georreferência	pH	% Argila	Média P ₃ mg/dm ³
i	21°42'47.70"S 41°20'40.58"O	4,26	-	0,98
ii	21°42'54.20"S 41°20'30.89"O	4,12	48	0,82
iii	21°42'47.94"S 41°20'38.69"O	4,04	-	0,88

O solo selecionado foi o proveniente do local **ii**, coletado no Colégio Agrícola Antonio Sarlo. Por conter alto teor de argila, o que dificulta o processo de lavagem das raízes, o solo selecionado foi misturado com a areia, previamente caracterizada, e na proporção de 3:1 (solo:areia) compondo, assim, o substrato utilizado. A análise química completa do substrato foi realizada na Fundenor (Fundação Norte Fluminense de Desenvolvimento Regional) e as devidas correções foram realizadas de acordo com o proposto por Sawazaki (2001). Obteve-se, então, um substrato com característica areno-argilosa, o qual é o ideal para o crescimento das plantas.

Tabela 2 - Resultado da análise de solo do substrato utilizado (solo: Areia) no experimento com as respectivas características analisadas.

Características Analisadas		
pH	4,1	H ₂ O > 1:2 e 5
P	2	mg/dm ³
K	1	mmol _c /dm ³
Ca	1,2	mmol _c /dm ³
Mg	3,6	mmol _c /dm ³
Al	6	mmol _c /dm ³
H + Al	19,0	mmol _c /dm ³
Na	0,8	mmol _c /dm ³
C	1,8	g/dm ³
MO	3,10	g/dm ³
CTC	25,60	mmol _c /dm ³
SB	6,60	mmol _c /dm ³
V	26	%
m	48	%
ISNa	3	%
Fe	7,46	mg/dm ³
Cu	0,15	mg/dm ³
Zn	1,20	mg/dm ³
Mn	2,27	mg/dm ³
B	0,92	mg/dm ³

N/pH em água, KCl e CaCl Relação 1:2,5; P - Na - K - Fe - Zn - Mn - Cu - Extrator Mellich 1; Ca - Mg - Al - Extrator: KCl - 1 mol/L; H + Al - Extrator Acetato de Cálcio mol/L - pH 7,0; B - Extrator quente; S - Extrator - Fosfato monocálcico; SB = Soma de Bases e Trocáveis; CTC - Capacidade de Trocas Catiônicas a pH 7,0; V = Índice de Saturação de Bases; m = Índice de Saturação de Alumínio; ISNa - índice de Saturação de Sódio; Mat. Org. = (MO) = C.Org x 1,724 - Walkley-Black.

4.1.1. Calagem, adubação e preenchimento dos vasos

Para corrigir o pH do substrato, foi utilizado calcário dolomítico, cuja análise encontra-se na Tabela 3. A dosagem foi estabelecida baseando-se no método da elevação da saturação por bases do solo. A dosagem calculada foi de 3,125 g por vaso, o equivalente a 1,25 toneladas de calcário por hectare, que foi previamente incorporada à porção de areia lavada e, em seguida, misturada à porção de solo, sacola a sacola. Nessa etapa, utilizaram-se sacolas plásticas de 8 dm³ para auxiliar na homogeneização do substrato. Após a calagem, as sacolas foram umedecidas e submetidas a um período de incubação por trinta dias.

Este método consiste na elevação da saturação de bases trocáveis para um valor que proporcione o máximo rendimento econômico do uso de calcário. A estimativa da necessidade de calcário (NC) foi obtida por meio da seguinte expressão:

$$NC \text{ (t.ha}^{-1}\text{)} = \frac{(V_2 - V_1) \times T \times f}{100}$$

em que:

V1 = valor da saturação das bases trocáveis do solo, em porcentagem, antes da correção ($V1 = 100 S/T$), sendo:

$$S = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ \text{ (cmol}_c \text{ dm}^{-3}\text{)};$$

V₂ = Valor da saturação de bases trocáveis que desejou 70%, já que o substrato utilizado possui um baixo teor de matéria orgânica;

T = capacidade de troca de cátions, $T = S + (H+Al^{3+})$ (cmolc dm⁻³); e

f = fator de correção do PRNT do calcário $f = 100/PRNT$.

Tabela 3 - Análise química do calcário.

CaO (%)	MgO (%)	PN (%)	ER (%)	PRNT (%)
40,36	10,01	89,99	94,87	85,37

Granulometria			
Fração retida por cada 100 g			
Peneira de 10 mm	Peneira de 20 mm	Peneira de 50 mm	Fundo
0	0,56	11,69	87,75

O P foi aplicado no substrato na forma de superfosfato simples em dosagens que forneceram dois níveis de disponibilidade do elemento no substrato: 4 e 22 mg/dm³ de P. Para tanto, realizou-se ensaio preliminar para determinar a capacidade do solo em fixar o fósforo em quatro períodos de tempo: 24 h, 48h, 72 h e 168 h, nas dosagens de 0, 25, 50, 100, 150, 200, 250 mg dm³ de P, em que foram estabelecidas as proporções de 25 e 150 mg/dm³ de P para os respectivos níveis desejáveis.

Como fonte de K foram utilizados 0,5645 g de KCl, equivalentes a 70 kg.ha⁻¹ de K, por vaso, seguindo as recomendações técnicas da cultura (Sawazaki, 2001), que também recebeu o mesmo procedimento de incorporação e homogeneização do fósforo. Já, o nitrogênio (N) foi parcelado entre o quinto,

décimo terceiro e vigésimo dia após a emergência das plântulas nos vasos, durante a condução do experimento, sendo aplicados 20 mg/mL de N na forma de NH_4NO_3 .

A adubação fosfatada foi realizada após o período de incubação do substrato com a calagem, com o auxílio das mesmas sacolas utilizadas na calagem, visando também homogeneizar o superfosfato simples no substrato (solo+areia). Para as 116 sacolas que receberam $4,0 \text{ mg.dm}^{-3}$ de P, foram adicionados 1,59 g da fonte de fósforo, as quais, após receberem as respectivas dosagens de P e K, foram homogeneizadas e levadas direto para os respectivos vasos. Nas sacolas com nível de 22 mg.dm^{-3} de P, foram utilizados 12,72 g de superfosfato simples por sacola, utilizando-se a mesma metodologia de incorporação de enchimento do nível anterior. Após esses procedimentos, os vasos permaneceram incubados por, aproximadamente, trinta dias, tempo suficiente para o solo fixar todo o P em função da sua capacidade de retenção.

4. 2. Seleção dos genótipos para tolerância a baixos níveis de fósforo

Vinte e nove linhagens S_7 de milho-pipoca oriundas de diferentes genealogias, constantes no Banco Ativo de Germoplasma da UENF (Tabela 4), foram utilizadas para serem avaliadas nos dois níveis de fósforo (baixo e adequado), na presente pesquisa.

Tabela 4 - Descrição das linhagens de milho-pipoca do Banco de Germoplasma da UENF utilizadas para seleção à eficiência e responsividade ao P.

Genótipos	Tipo	Variedade Originária	Adaptação Climática	Instituição de Desenvolvimento
L 51	Linhagem S7	Beija-flor: UFV	Temperado/ Tropical	UENF
L 52	Linhagem S7	Beija-flor: UFV	Temperado/ Tropical	UENF
L 53	Linhagem S7	Beija-flor: UFV	Temperado/ Tropical	UENF
L 54	Linhagem S7	Beija-flor: UFV	Temperado/ Tropical	UENF
L 55	Linhagem S7	Beija-flor: UFV	Temperado/ Tropical	UENF
L 59	Linhagem S7	Beija-flor: UFV	Temperado/ Tropical	UENF
L 61	Linhagem S7	BRS Angela: EMBRAPA	Tropical	UENF
L 63	Linhagem S7	BRS Angela: EMBRAPA	Tropical	UENF
L 65	Linhagem S7	BRS Angela: EMBRAPA	Tropical	UENF
L 66	Linhagem S7	BRS Angela: EMBRAPA	Tropical	UENF
L 69	Linhagem S7	BRS Angela: EMBRAPA	Tropical	UENF
L 70	Linhagem S7	BRS Angela: EMBRAPA	Tropical	UENF
L 71	Linhagem S7	BRS Angela: EMBRAPA	Tropical	UENF
L 74	Linhagem S7	BRS Angela: EMBRAPA	Tropical	UENF
L 75	Linhagem S7	Viçosa: UFV	Temperado/ Tropical	UENF
L 76	Linhagem S7	Beija-flor: UFV	Temperado/ Tropical	UENF
L 77	Linhagem S7	Viçosa: UFV	Temperado/ Tropical	UENF
L 80	Linhagem S7	Viçosa: UFV	Temperado/ Tropical	UENF
L 88	Linhagem S7	Viçosa: UFV	Temperado/ Tropical	UENF
P1	Linhagem	Híbrido Zélia	Temperado/ Tropical	UEM
P2	Linhagem	Composto CMS-42	Temperado/ Tropical	UEM
P3	Linhagem	Composto CMS-42	Temperado/ Tropical	UEM
P4	Linhagem	Raças Sul-Americanas	Temperado/ Tropical	UEM
P5	Linhagem	Híbrido Zaeli	Temperado/ Tropical	UEM
P6	Linhagem	Híbrido Zaeli	Temperado/ Tropical	UEM
P7	Linhagem	Híbrido Zaeli	Temperado/ Tropical	UEM
P8	Linhagem	Híbrido IAC112	Temperado/ Tropical	UEM
P9	Linhagem	Híbrido IAC112	Temperado/ Tropical	UEM
P10	Linhagem	Híbrido IAC112	Temperado/ Tropical	UEM

4.2.1. Plantio e obtenção do material de trabalho

Na casa de vegetação, sementes das 29 linhagens (Tabela 4) foram plantadas em vasos de polietileno contendo 5,0 dm³ de solo no dia 10/07/2015. A umidade do solo foi mantida com regas de água frequentes, baseadas nas

condições climáticas e no desempenho do substrato frente à evapotranspiração observada. No plantio, foram utilizadas três sementes por vaso, deixando-se, após o desbaste, uma planta. Cada vaso de polietileno foi considerado uma unidade experimental.

Os experimentos foram instalados em blocos casualizados, com quatro repetições, para as duas condições estabelecidas anteriormente. As plantas foram colhidas na fase vegetativa V6 (seis folhas totalmente expandidas), aproximadamente 30 dias após a emergência (DAE), efetuando-se um corte rente ao solo, separando o sistema radicular da parte aérea, este tempo foi suficiente para que as aferições no sistema radicular não fossem prejudicadas, pois se a planta cresce mais, etapas como a de lavagem radicular se tornaria inviável devido aos enovelamentos ocasionados por falta de espaço no vaso, além disso, a produção de biomassa poderia passar a ser interferida por deficiência de outros nutrientes. Imediatamente após a colheita, executou-se a lavagem das raízes com água corrente, retirando todo o solo e, em seguida, armazenando numa solução de etanol a 30 % para posterior análise de imagem e nutricional.

4.2.2. Características avaliadas

Após a colheita, as seguintes características foram avaliadas: **CT** (comprimento total da raiz, em cm), **AS** (área superficial radicular, em cm²), **VR** (volume de raízes, em cm³), **AP** (altura média da planta, em cm), **CF** (comprimento da última folha, em cm), **DC** (diâmetro do colmo, em mm), **PMSA** (produção da matéria seca da parte aérea, em g), **PMSR** (produção da matéria seca da raiz, em g), **TPA e TPR** (teor de fósforo da parte aérea e na raiz, em g/Kg), **CONTPA** (conteúdo de fósforo da parte aérea, em mg/planta), **CONTPR** (conteúdo de fósforo das raízes, em mg/planta).

Na sequência, foram estimados os seguintes índices de eficiência ao fósforo: **EE** (eficiência de enraizamento), **EAP** (eficiência de absorção de fósforo), **ETP** (eficiência de translocação de fósforo), **EUPPA** (eficiência de utilização de fósforo na parte aérea) e **R/PA** (relação raiz parte aérea).

4.2.2.1. As características foram estimadas da seguinte forma:

- a) **CT** (comprimento total da raiz, em cm), **AS** (área superficial radicular, em cm^2) e **VR** (volume de raízes, em cm^3), foram estimadas por meio do *software* WinRhizo 2009 PRO (*Regent Instruments*, Quebec, Canadá) quando do processamento de imagens das raízes de cada planta efetuadas pelo *Scanner Epson Perfection 10000XL*.
- b) Três características foram quantificadas no dia da colheita na fase vegetativa V_6 . Destas, duas – **AP** (altura da planta, em cm) e **CF** (comprimento da última folha) – foram estimadas com o auxílio de uma régua de madeira milimétrica com 80 cm de comprimento, e **DC** (diâmetro do colmo, em mm), foi mensurada com o auxílio de um paquímetro digital, cuja leitura realizada na base na planta rente ao solo.
- c) **PMSA** (produção da matéria seca da parte aérea, em g) - A matéria seca da parte aérea (folha+caule) foi determinada pela pesagem das mesmas após terem sido secas em estufas de ventilação forçada, a 70 °C, durante 36 horas.
- d) **PMSR** (produção da matéria seca da raiz, em g) - A matéria seca da raiz foi determinada pela pesagem das raízes após terem sido secas em estufas de ventilação forçada, a 70 °C, até durante 36 horas, após o término das análises das imagens.
- e) **TPA e TPR** (teor de fósforo da parte aérea e na raiz, em g/kg) - Após a determinação da matéria seca da parte aérea e raízes, ambas foram moídas em moinho tipo Willey e o material moído foi pesado e acondicionado em frascos hermeticamente fechados e identificados. O P das amostras foi determinado através de digestão com HNO_3 e H_2O_2 e leitura em ICP-OESi em sistema de digestão aberta, sendo as condições do ICP: gás plasma $8,0 \text{ L min}^{-1}$, gás auxiliar $0,70 \text{ L min}^{-1}$ e gás carreador $0,55 \text{ L min}^{-1}$ (Peters, 2005). A análise foi realizada no Setor de Nutrição de Plantas do Laboratório de Fitotecnia do CCTA/UENF.
- f) **CONTPA** (conteúdo de P da parte aérea, em mg/planta) - Foi obtido pelo produto entre a matéria seca da parte aérea e o teor de fósforo da parte aérea (TPA). A seguinte expressão permitiu a quantificação do conteúdo de fósforo da parte aérea: $\text{CONTPA} = \text{PMSA} \times \text{TPA}$.

- g) **CONTPR** (conteúdo de P das raízes em mg/ planta) - Obtido pelo produto entre a matéria seca da raiz (MSR) e o teor de P na raiz (TPR). A seguinte expressão permitiu sua quantificação: $CONTPR = MSR \times TPR$.

Uma vez obtidos os dados quantitativos no momento da condução do experimento, foram estimados os seguintes índices de eficiência, fundamentados na proposta de Sidiqui e Glass (1985) e citados por Moura et al. (2001):

- a) **EE** (eficiência de enraizamento) = $(g \text{ de matéria seca de raiz})^2 / g \text{ de P na parte aérea}$.
- b) **EAP** (eficiência de absorção de fósforo) = $\text{conteúdo de P total} / g \text{ de matéria seca de raiz}$.
- c) **ETP** (eficiência de translocação de fósforo) = $\text{conteúdo de P na parte aérea} / \text{conteúdo de P total}$.
- d) **EUPPA** (eficiência de utilização de P na parte aérea) = $(g \text{ de matéria seca da parte aérea})^2 / g \text{ de P na parte aérea}$.
- e) **R/PA** (relação raiz: parte aérea) = $(g \text{ de matéria seca da raiz}) / (g \text{ de matéria seca da parte aérea})$.

4.3. Análises genético-biométricas

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, agrupamento de médias (Scott-Knott, 1974) e análise multivariada, neste último caso para a formação de grupos discrepantes, que permitam a fidedigna discriminação das linhagens com diferentes eficiências nutricionais para o fósforo. Para tanto, foram utilizados os recursos computacionais do Programa GENES (Cruz, 2013).

4.3.1. Análise de variância

O esquema da análise de variância e as esperanças dos quadrados médios para as características avaliadas, conforme o modelo estatístico utilizado encontra-se na Tabela 5.

Modelo estatístico:

$$Y_{ij} = \mu + G_i + B_j + E_{ij},$$

sendo:

Y_{ij} = valor observado, no genótipo i da repetição j ;

μ = média geral;

G_i = efeito fixo atribuído ao i -ésimo genótipo ($i=1,2,3,\dots,g$);

B_j = efeito do j -ésimo bloco ($j=1,2,3,\dots,b$); e

E_{ij} = erro experimental atribuído à observação Y_{ij} .

Tabela 5 - Esquema da análise de variância e esperança de quadrados médios, considerando o delineamento de blocos casualizados para as características avaliadas.

FV	GL	QM	E(QM)	F
Blocos	(b-1)	QMB	$\sigma^2 + g\sigma_b^2$	
Tratamentos	(g-1)	QMG	$\sigma^2 + r\Phi_g$	QMT/QMR
Resíduo	(b-1)(g-1)	QMR	σ^2	
Total	(n-1)			

em que:

b = número de blocos (repetições);

g = número de genótipos (tratamentos);

n = número de plantas; e

Φ_g = variabilidade genotípica.

4.3.2. Parâmetros genéticos

Para melhor conhecimento da estrutura genética dos genótipos avaliados, foram obtidas as estimativas dos seguintes parâmetros genéticos:

a) Variância Fenotípica

Expressa pela relação entre o quadrado médio do genótipo e o número de repetições.

$$\sigma_f^2 = \frac{QMG}{b}$$

b) Variância de Ambiente

É a razão do quadrado médio do resíduo e o número de repetições.

$$\sigma_A^2 = \frac{QMR}{b}$$

c) Variabilidade Genotípica

Obtida pela razão entre o quadrado médio do genótipo diminuindo-se do quadrado médio do resíduo ponderado pelo número de blocos.

$$\Phi_G = \frac{QMG - QMR}{b}$$

d) Coeficiente de Determinação Genotípica

Obtido pela razão entre os estimadores da variabilidade genotípica e de variância fenotípica.

$$H^2 = \frac{\hat{\Phi}_g}{\hat{\sigma}_f^2}$$

e) Coeficiente de Variação Genotípica

Obtido pela expressão:

$$CV_G = \frac{100\sqrt{\Phi_G}}{\hat{m}}$$

f) Índice de Variação

É a relação entre o coeficiente de Variação Genotípica e o Coeficiente de Variação Experimental.

$$I_V = \frac{CV_G}{CV_A} = \sqrt{\frac{\hat{\Phi}_G}{QMR}}$$

4.3.3. Interação genótipos por ambiente

O modelo estatístico $Y_{ijk} = \mu + B/A_{jk} + G_i + A_j + GA_{ij} + E_{ijk}$ foi o utilizado para avaliar a interação dos genótipos por ambiente com níveis baixo e ideal de P para as características avaliadas, quais sejam:

Y_{ijk} = Valor observado do i-ésimo genótipo na k-ésima repetição dentro de j-

ésimo ambiente;

μ = média geral;

G_i = efeito fixo do i-ésimo genótipo;

A_j = efeito aleatório do j-ésimo ambiente;

GA_{ij} = efeito aleatório do i-ésimo genótipo com o j-ésimo ambiente; e

E_{ijk} = erro experimental.

Com isso, foi possível estimar as esperanças dos quadrados médios contidas na Tabela 6, de análise de variância conjunta

Tabela 6 - Esquema de análise de variância conjunta para as características MSF e MSR com as respectivas esperanças de quadrados médios.

FV	GL	E (QM)	F
Blocos/Ambientes	$(b-1)a$	$\sigma^2 + g\sigma_b^2$	
Genótipos (G)	$(g-1)$	$\sigma^2 + r\lambda\sigma_{ga}^2 + ar\Phi_g$	QM_G/QM_{GA}
Ambientes (A)	$(a-1)$	$\sigma^2 + g\sigma_b^2 + gr\sigma_a^2$	QM_A/QM_B
G x A	$(g-1)(a-1)$	$\sigma^2 + r\lambda\sigma_{ga}^2$	QM_{GA}/QM_R
Resíduo	$(g-1)(a-1)a$	σ^2	

$$\Phi_g = \sum_{i=1}^g G_i^2 / (g-1); \text{ e } \lambda = g / (g-1)$$

4.4. Variáveis Canônicas

A análise estatística multivariada foi efetuada por meio da técnica de variáveis canônicas, descrita por Rao (1952), que consiste em transformar o conjunto de “n” variáveis originais em um novo conjunto, as variáveis canônicas.

As variâncias das Variáveis Canônicas e dos coeficientes de ponderação das características foram obtidas pela solução do sistema $\det (T - I_j E) = \Phi$, em que T é a matriz de variâncias e covariâncias fenotípicas, proveniente da avaliação entre acessos; E é a matriz de variâncias e covariâncias residuais; e I_j são as raízes características (autovalores) da matriz $E^{-1}T$ (Cruz et al., 2012). As Variáveis Canônicas foram utilizadas para a disposição dos acessos em um gráfico bidimensional, visando à identificação de 'clusters' de genótipos com *performance* diferenciada em relação aos níveis de fósforo no solo. Após a determinação do número de Variáveis Canônicas, estimaram-se os escores, para cada genótipo, relativo às Variáveis Canônicas.

4.5. Parâmetro α

O Parâmetro α proposto pelo CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1978) é um estimador da eficiência de utilização de nutrientes que considera o aumento da produção de matéria seca de folhas devido ao fornecimento do nutriente as plantas, permitindo que se faça a classificação dos genótipos em quatro grupos distintos: eficientes e não-responsivos; eficientes e responsivos; não-eficientes e responsivos; e, não-eficientes e não-responsivos; em função de seus índices de eficiência de utilização de fósforo e responsividade quanto à aplicação do nutriente. O índice é obtido pela seguinte expressão:

$$\alpha = \frac{EUPPA_{\text{altoP}} - EUPA_{\text{baixoP}}}{\text{Diferença entre os níveis alto e baixo}}$$

Assim, os valores de produção de matéria seca de folhas dos diferentes genótipos cultivados no nível baixo de fósforo e seus respectivos valores α são plotados nos eixos x e y do sistema de coordenadas cartesianas.

Com a média da produção de matéria seca de folha e a média do estimador α , no nível baixo do nutriente, divide-se o sistema de coordenadas cartesianas em quadrantes, o que permite classificar os genótipos em quatro grupos:

- a) Genótipos eficientes e não-responsivos: grupos de genótipos que atingem altos índices em eficientes na utilização de fósforo pela parte aérea da planta (EUPPA) no ambiente com baixo nível do nutriente, mas não respondem ao incremento da disponibilidade do nutriente em questão;
- b) Genótipos eficientes e responsivos: representados pelos genótipos que atingem altos índices de EUPPA no nível baixo do nutriente, e respondem com incremento na EUPPA, no ambiente com nível alto do nutriente;
- c) Genótipos não-eficientes e responsivos: representados pelos genótipos que atingem baixos índices de EUPPA no menor nível do nutriente, mas têm uma boa magnitude media no ambiente com disponibilidade de P; e
- d) Genótipos não-eficientes e não-responsivos: representados por aqueles com baixos índices de EUPPA, tanto para a condição de estresse quanto para a disponibilidade adequada e/ou alta do nutriente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análises de variâncias e de médias

A Tabela 7 contém os quadrados médios das características avaliadas para o ambiente com 4 mg/dm³ de P; e a Tabela 8, com 22 mg/dm³ de P. Constatou-se, inicialmente que a precisão experimental, expressa pelo coeficiente de variação experimental (CV_e) variou entre as características avaliadas de 3,83 % a 54,16 %, sendo observadas maiores discrepâncias de CV_e no ambiente com a condição de estresse, para a maioria das características.

Estimativas elevadas para CV_e, em condições de baixa disponibilidade de P, têm sido detectadas em outros trabalhos (Fageria et al., 2010; Fageria et al., 2011; Parentoni et al., 2011; Mendes et al., 2014), o que se acredita que decorra da maior heterogeneidade ambiental entre as parcelas, quando em avaliações em ambiente com baixo nível do nutriente. Nesses casos, presume-se, também, que uma maior pressão de seleção provocada pelo ambiente mais estressante, favoreça a expressão de maior variabilidade genotípica.

Ainda no que se refere à precisão experimental, na Tabela 7, o ambiente com 4 mg/dm³ de P proporcionou o menor percentual de coeficiente de variação

experimental, o que ocorreu para a produção da matéria seca da parte aérea (PMSA), com estimativa de 3,83 %. Na avaliação da eficiência quanto ao P em genótipos de alface, Cock et al. (2003), também, obtiveram respostas similares para PMSA em ambiente com baixa dosagem do nutriente. Naquela pesquisa, Cock et al. (2003) verificaram que a estimativa de CV_e para PMSA foi de 12,2911 %, um dos menores valores dentre as oito características avaliadas, sendo que, quatro foram índices da eficiência ao P.

A característica com maior expressão de CV_e foi CONTPR, de magnitude 52,44 %, conforme Tabela 7. A provável explicação para tal resposta reside no fato de CONTPR ser influenciada por fatores outros que não apenas a avaliação da característica *per se*, como resíduos do substrato que ficam agregados na parte inferior extrema da planta e que dificultam o procedimento de quantificação da raiz, mesmo após a efetiva lavagem das raízes, e que no momento da digestão com HNO₃ e H₂O₂, acaba superestimando o resultado final.

Tabela 7 - Resumo de análise de variância de doze características avaliadas em 29 linhagens endogâmicas de milho-pipoca cultivadas em substrato contendo 4 mg/dm³ de P. Campos dos Goytacazes, RJ, junho de 2015.

FV	GL	Ambiente com 4 mg/dm ³ de P					
		Quadrados Médios ¹					
		CT	AS	VR	AP	DC	CF
Blocos	3	1556732,60	198578,28	134,61	78,63	3,69	126,18
Genótipos	28	1873348,26**	168892,21**	96,31**	41,51**	4,07**	257,0**
Resíduo	84	402900,96	22197,00	15,46	5,68	0,74	27,88
Méd. Geral		3075,02	647,34	11,28	14,43	5,33	44,16
CV_e (%)		20,64	23,01	34,85	16,51	16,21	11,95

^{ns}, **, *. Não-significativo e significativo, no nível de 1 % e 5 % de probabilidade, pelo teste F, respectivamente.

¹ Comprimento total (CT), área superficial radicular (AS), volume de raízes (VR), altura da planta (AP), diâmetro do colmo (DC) e comprimento da última folha (CF).

Tabela 7, cont.

FV	GL	Ambiente com 4 mg/dm ³ de P					
		Quadrados Médios ^{1/}					
		PMSA	PMSR	TPA	TPR	CONTPA	CONTPR
Blocos	3	0,87	0,52	0,20	0,007	43,98	0,08
Genótipos	28	0,66 ^{**}	0,27 ^{**}	0,06 ^{ns}	0,003 ^{ns}	15,09 [*]	0,02 ^{**}
Resíduo	84	0,23	0,05	0,04	0,005	7,76	0,01
Méd. Geral		12,68	0,64	1,25	0,300	15,92	0,19
CV _e (%)		3,83	37,70	16,65	24,864	17,50	52,44

^{ns}, **, *. Não-Significativo e Significativo, no nível de 1 % e 5 % de probabilidade, pelo teste F, respectivamente.

^{1/} Produção da matéria seca da parte aérea (**PMSA**), produção da matéria seca da raiz (**PMSR**), teor de fósforo na parte aérea (**TPA**), teor de fósforo na raiz (**TPR**), conteúdo de fósforo na parte aérea (**CONTPA**) e conteúdo de fósforo nas raízes (**CONTPR**).

Tabela 8 - Resumo de análise de variância de doze características avaliadas em 29 linhagens endogâmicas de milho-pipoca cultivadas em substrato contendo 22 mg/dm³ de P. Campos dos Goytacazes, RJ, junho de 2015.

FV	GL	Ambiente com 22 mg/dm ³ de P					
		Quadrados Médios ^{1/}					
		CT	AS	VR	AP	DC	CF
Blocos	3	689524,86	109597,72	377,00	17,85	1,21	45,86
Genótipos	28	420878,21 ^{ns}	132422,46 ^{**}	443,46 ^{**}	63,35 ^{**}	7,21 ^{**}	286,89 ^{**}
Resíduo	84	424737,82	13111,04	89,70	6,95	0,91	32,83
Méd. Geral		2571,54	954,50	30,39	27,10	11,73	73,15
CV _e (%)		25,34	11,99	31,16	9,73	8,14	7,83

^{ns}, **, *. Não-significativo e significativo, no nível de 1 % e de 5 % de probabilidade, pelo teste F, respectivamente.

^{1/} Comprimento total (CT), área superficial radicular (AS), volume de raízes (VR), altura da planta (AP), diâmetro do colmo (DC) e comprimento da última folha (CF).

Tabela 8, cont.

FV	GL	Ambiente com 22 mg/dm ³ de P					
		Quadrados Médios ^{1/}					
		PMSA	PMSR	TPA	TPR	CONTPA	CONTPR
Blocos	3	5,18	0,29	1,3584	0,043	7,40	0,32
Genótipos	28	8,12 ^{**}	1,24 ^{**}	0,63 ^{**}	0,04 ^{**}	87,23 ^{ns}	0,93 ^{**}
Resíduo	84	0,65	0,14	0,22	0,01	66,22	0,13
Méd. Geral		16,80	1,60	3,57	0,87	59,65	1,39
CV _e (%)		4,80	23,31	13,14	15,87	13,68	26,10

^{ns}, **, *. Não-significativo e significativo, no nível de 1 % e 5 % de probabilidade, pelo teste F, respectivamente.

^{1/} Produção da matéria seca da parte aérea (PMSA), produção da matéria seca da raiz (PMSR), teor de fósforo na parte aérea (TPA), teor de fósforo na raiz (TPR), conteúdo de fósforo na parte aérea (CONTPA) e conteúdo de fósforo nas raízes (CONTPR).

Para a característica produção da matéria seca da parte aérea (PMSA), observou-se, para o ambiente sob baixa disponibilidade de P, que as médias dos genótipos variaram de 13,56 g a 11,76 g (Tabela 9), com média geral de 12,68 (Tabela 7). Já, para o ambiente com alta disponibilidade de P, a média geral foi de 16,80 g (Tabela 8). Notou-se uma redução de 25 % da produção de matéria seca na parte aérea, considerando os ambientes com alto e baixo P. Para a produção da matéria seca da raiz (PMSR), a redução foi de mais de 60 %. Portanto, em condições de estresse, ocorre uma diferença expressiva na produção de matéria seca da raiz em relação à alta disponibilidade de P. Isso significa que a redução no crescimento, por efeito da deficiência de P, geralmente é maior na parte aérea da planta do que nas raízes, permitindo à planta, desta forma, manter pelo menos o crescimento radicular para encontrar e extrair P do solo, em condição de escassez do nutriente. Não por acaso, Grant et al. (2001) definem que o crescimento das raízes e da parte aérea são correlatas com a distribuição do P nestes órgãos.

Em se tratando do comprimento total da raiz (CT), a média para a condição de estresse (4 mg/dm^3) foi de 3.075,02 cm e, para o ambiente com alto nível (22 mg/dm^3), a média geral foi de 2.571,54 cm. com isso, é possível inferir que, sob condições de estresse, as plantas apresentam mecanismos naturais, que aumentam sua capacidade de explorar o solo, com o crescimento do comprimento das raízes, possibilitando, assim, uma maior busca pelo nutriente que se encontra em baixa proporção no solo, lembrando que a baixa disponibilidade do P no substrato está vinculada à capacidade dos solos em adsorver e, conseqüentemente, indisponibilizar às plantas o P aplicado, de forma a competir com as raízes das plantas pelo nutriente.

Para altura média de plantas (AP), foi observado intervalo de variação de 19,38 a 8,00 cm, com média geral de 14,43 cm, para o ambiente com baixo P, enquanto para o ambiente sem estresse, a média geral foi de 27,10 cm, o que produziu cerca de 53 % de variação. A Figura 1 possibilita uma constatação visual da maior produção comparada de biomassa em ambiente sob estresse, utilizando como exemplo a linhagem 75, em que se evidencia o maior crescimento desse genótipo no nível alto do nutriente, resultando em evidentes maiores estimativas para PMSA (Tabelas 7 e 8).



Figura 1 - Comparação visual do crescimento da parte aérea no estágio V6, com 30 dias após a emergência, da linhagem L75, em dois níveis contrastantes de P. A = nível alto (22 mg/dm^3) de P; e B = nível baixo (4 mg/dm^3) de P.

Para as características teor de fósforo na parte aérea (TPA), teor de fósforo na raiz (TPR), conteúdo de fósforo na parte aérea (CONTPA) e conteúdo de fósforo nas raízes (CONTPR), as médias foram diretamente proporcionais à dosagem de P disponibilizado, ou seja, o acúmulo de P na planta vincula-se diretamente à disponibilidade do nutriente no solo. Com exceção do comprimento total da raiz (CT), todas as outras características seguiram uma proporção diretamente correlacionada com relação à dosagem de fósforo.

Assim, pode-se inferir que o comprimento total da raiz é uma característica muito afetada em ambientes contrastantes em relação à disponibilidade de P. Nesse aspecto, onde as plantas tendem a desenvolver um sistema radicular mais comprido em busca do nutriente ausente, nota-se claramente que não há uma maior produção de biomassa (vide estimativas para as características PMSA e PMSR, nas Tabelas 8 e 9), mas sim, um aumento no comprimento total.

Partindo do princípio que um extenso sistema radicular é relevante para a adaptação de genótipos a ambientes em condição de estresse, principalmente devido ao fato de que o P tem sua mobilidade limitada na solução do solo, outros autores utilizaram caracteres agronômicos similares ao desta pesquisa, para classificar genótipos responsivos ao uso de fósforo. Como exemplos, citam-se Mundim et al. (2013), que avaliaram linhagens de milho-pipoca; Silva et al. (2016), que estudaram genótipos de feijoeiro; Van de Wiel et al. (2016), que revisaram a eficiência no uso de fósforo como uma oportunidade para os melhoristas; e Neto et al. (2016), que classificaram linhagens de café quanto à eficiência no uso do fósforo; sendo que todos destacaram as características relacionadas às raízes, como reveladoras de informações úteis para classificar genótipos eficientes no uso do P.

Adotando-se as características comprimento total (CT), área superficial radicular (AS), volume de raízes (VR), produção da matéria seca da parte aérea (PMSA) e produção da matéria seca da raiz (PMSR), como as principais para a discriminação de genótipos nutricionalmente mais eficientes a baixos teores de P no solo, obtiveram-se as estimativas das médias, bem como o agrupamento de Scott-Knott (Steel e Torrie, 1980) para as 29 linhagens de milho-pipoca avaliadas no ambiente com 4 mg/dm^3 de P, apresentadas na Tabela 9. Com isso, pode-se inferir que tais características foram suficientes para classificar as linhagens quanto sua EUP com eficácia e clareza. Souza et al. (2010) classificaram genótipos de sorgo, onde observou plasticidades radiculares mais favoráveis à aquisição de P sob condição de estresse, ou seja, maior comprimento, área e volume radicular para os genótipos eficientes.

Na Tabela 9, verifica-se que houve consistência na discriminação das linhagens em dois grupos distintos, sendo um com médias a partir de 12,87 a 13,37 g para PMSA e 0,73 a 1,38 g para PMSR, respectivamente, em que os genótipos foram considerados como eficientes; e os demais com médias variando entre 11,76 e 12,76 g para PMSA e 0,20 e 0,55 g para PMSR, sendo considerados como ineficientes, ou quiçá, medianamente eficientes ao baixo teor de P disponível no solo.

Tabela 9 - Estimativas das médias de seis características e do agrupamento de Scott-Knott (Stell e Torrie, 1980) em 29 linhagens de milho-pipoca avaliadas em ambiente com 4 mg/dm³ de P. Campos dos Goytacazes, RJ, junho de 2015.

L ¹	CT ²		AS ²		VR ²		AP ²		PMSA ²		PMSR ²	
	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S
P1	3249,78	A	607,95	C	9,380	C	13,50	B	12,68	B	0,54	B
P2	3478,58	A	926,85	A	19,88	A	17,13	A	13,22	A	1,06	A
P3	3797,02	A	1006,31	A	22,07	A	18,50	A	13,32	A	1,28	A
P4	3855,45	A	845,16	A	14,94	B	14,88	A	12,95	A	0,83	A
P5	3033,96	A	726,03	B	14,07	B	19,38	A	13,24	A	0,80	A
P6	3412,49	A	647,94	B	10,02	C	13,38	B	12,88	A	0,51	B
P7	4376,67	A	975,63	A	18,11	A	17,00	A	12,90	A	0,99	A
P8	3936,56	A	829,60	A	14,27	B	19,25	A	13,08	A	0,89	A
P9	3838,91	A	527,22	C	14,39	B	17,75	A	13,37	A	0,80	A
P10	3084,03	A	821,90	A	14,93	B	17,88	A	13,28	A	0,80	A
L51	2691,80	B	746,91	B	9,17	C	14,25	B	12,64	B	0,54	B
L52	2659,70	B	547,47	C	7,44	C	14,50	B	12,39	B	0,47	B
L54	2049,28	C	496,16	C	5,44	C	14,00	B	12,33	B	0,31	B
L55	2380,94	C	368,76	D	8,52	C	13,13	B	12,60	B	0,48	B
L57	3447,39	A	499,42	C	12,04	B	16,50	A	12,67	B	0,68	A
L59	4055,85	A	716,14	B	15,57	B	17,88	A	13,56	A	0,75	A
L61	2129,15	C	889,34	A	4,80	C	10,38	C	12,55	B	0,32	B
L63	2848,56	B	355,52	D	7,79	C	10,50	C	12,43	B	0,47	B
L65	1710,90	C	300,60	D	4,35	C	11,25	C	12,23	B	0,30	B
L66	3531,61	A	818,06	A	15,29	B	16,88	A	13,00	A	0,20	B
L69	3255,34	A	691,90	B	11,89	B	13,13	B	12,44	B	0,98	A
L70	3449,4	A	598,62	C	8,32	C	10,88	C	12,25	B	0,79	A
L71	3023,61	A	566,47	C	8,47	C	11,50	C	12,29	B	0,55	B
L74	2212,21	C	334,74	D	4,07	C	8,000	C	11,76	B	0,54	B
L75	3319,50	A	852,84	A	17,5	A	16,00	A	12,76	B	0,25	B
L76	2816,65	B	582,79	C	9,62	C	12,50	B	12,46	B	0,87	A
L77	2898,17	B	663,29	B	12,56	B	17,38	A	12,87	A	0,53	B
L80	2793,06	B	554,07	C	9,02	C	8,00	C	12,47	B	0,73	A
L88	1839,01	C	275,25	D	3,32	C	13,50	B	11,97	B	0,51	B

^{1/} - Linhagens S₇ de milho-pipoca.

^{2/} - CT (comprimento total, em cm), AS (área superficial radicular, em cm²), VR (volume de raízes, em cm³), AP (altura da planta, em cm), PMSA (produção da matéria seca da parte aérea, em g) e PMSR (produção da matéria seca da raiz, em g).

Com base no teste de médias, para as características avaliadas, podem-se destacar as linhagens 7 (P7), 3 (P3), 16 (L59) e 2 (P2) como eficientes; e as linhagens 29 (L88), 19 (L65), 24 (L74) e 17 (L61), como ineficientes na absorção de P no solo.

Souza et al. (2010), avaliando genótipos de sorgo, observaram diferenças de respostas entre os genótipos quando cultivados em níveis contrastantes de P, sendo verificado pequeno crescimento de parte aérea, como observado (Figura 1-B) e grande crescimento de raízes no experimento com baixa disponibilidade de P

(Figura 2), enquanto no ensaio com alto nível de fósforo, foi verificada resposta inversa, com grande crescimento de parte aérea e pequeno crescimento de raízes. Na literatura são reportados vários trabalhos que concordam com os resultados obtidos nesta pesquisa e por Wang et al. (2010), em que se verifica uma tendência entre as cultivares de aumentar a quantidade de MSR em ambiente com estresse de P (Fritsche-Neto et al., 2010; Mundim et al 2013; Mendes et al., 2014; Clemens et al., 2016).

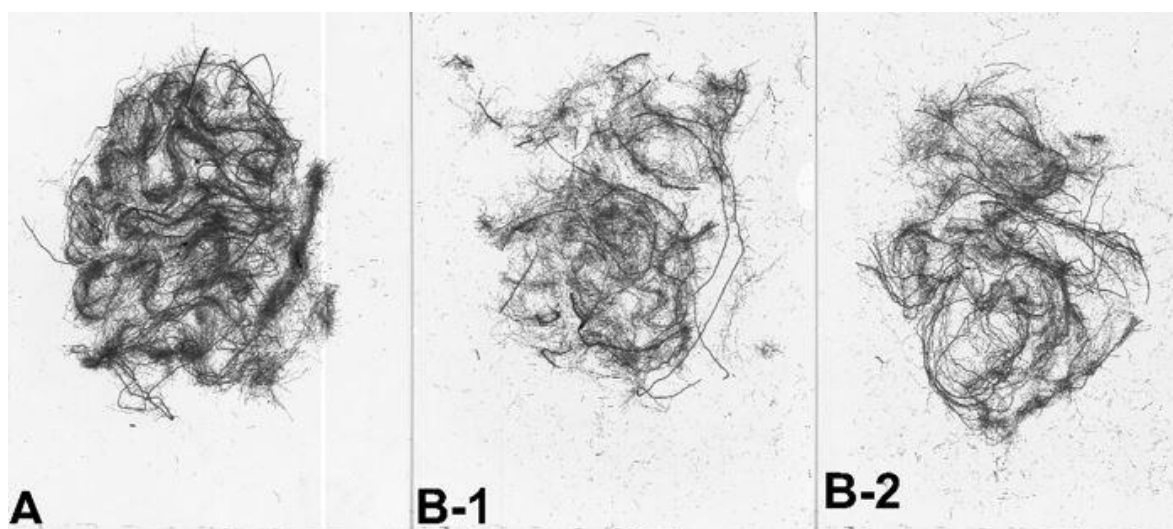


Figura 2 - Imagens dos sistemas radiculares das linhagens de milho-pipoca que se destacaram quanto a CT (comprimento total), AS (área superficial radicular), VR (volume de raízes) no ambiente com estresse (4 mg/dm^3). A = Linhagem P3; B-1 e B-2 = Linhagem P7, fracionada em duas partes.

5.2. Interação genótipos por ambientes

Apenas duas características - diâmetro do colmo (DC) e comprimento da última folha (CF) - foram não-significativas em 5 % de probabilidade para a interação genótipos *versus* ambientes, sendo que CT, VR, PMSA, PMSR, CONTPA e CONTPR foram significativas em 1 % para esta interação (Tabela 10), o que demonstra que os níveis de P avaliados (4 mg/dm^3 de P e 22 mg/dm^3 de P) foram, de fato, contrastantes, tornando confiável o estudo da discriminação das linhagens eficientes para o fósforo, nesta pesquisa. Outras pesquisas conduzidas em casa de vegetação e com alta e baixa disponibilidade de P vêm sendo implementadas, como na cultura do algodoeiro, em que Marcante et al. (2016) identificaram a ocorrência de variação genética na EUP entre 17 cultivares

testadas. Avaliando a eficiência de linhagens de milho-pipoca ao P, Mundim et al. (2013) observaram a formação de três grupos distintos. Por sua vez, Martins et al. (2013) classificaram clones de café quanto à eficiência e responsividade a níveis de P, tendo identificado a formação de cinco grupos divergentes na condição de estresse. Isso revela que a eficiência nos estudos realizados em casa de vegetação favorece a predição da variação genotípica, como um fidedigno guia para a implementação de programas de melhoramento visando à adaptação de segregantes superiores ao baixo nível de fósforo no solo.

Tabela 10 - Análise de variância conjunta para doze características estimadas em 29 linhagens endogâmicas de milho-pipoca avaliadas em casa de vegetação e em dois níveis (4 mg/dm³ e 22 mg/dm³) de fósforo. Campos dos Goytacazes, RJ, junho de 2015.

FV	GL	QM ¹					
		CT	AS	VR	AP	DC	CF
Blocos/Ambiente	6	1123128,73	154088,00	255,80	48,24	2,45	86,02
Genótipos	28	1306134,27 ^{ns}	272360,74 ^{**}	442,93 ^{**}	94,53 ^{**}	10,26 ^{**}	497,58 ^{**}
Ambiente	1	14702492,05 [*]	5472445,49 ^{**}	21180,56 ^{**}	9307,88 ^{**}	2369,41 ^{**}	48734,50 ^{**}
G x A	28	988092,21 ^{**}	28953,93 [*]	96,84 ^{**}	10,33 [*]	1,01 ^{ns}	46,36 ^{ns}
Resíduo	168	413819,39	17654,02	52,58	6,32	0,83	30,35
Total	231						

^{ns}, **, *. Não-significativo e significativo, no nível de 1 % e 5 % de probabilidade, pelo teste F, respectivamente.

^{1/} Comprimento total (CT), área superficial radicular (AS), volume de raízes (VR), altura da planta (AP), diâmetro do colmo (DC) e comprimento da última folha (CF).

Tabela 10, cont.

FV	GL	QM ¹					
		PMSA	PMSR	TPA	TPR	CONTPA	CONTPR
Blocos/Ambiente	6	3,02	0,41	0,28	0,02	25,69	0,20
Genótipos	28	6,21 [*]	1,22 ^{**}	0,26 ^{ns}	0,023 ^{ns}	40,13 ^{ns}	0,61 ^{ns}
Ambiente	1	986,12 ^{**}	53,79 ^{**}	313,52 ^{**}	18,90 ^{**}	110926,83 ^{**}	82,38 ^{**}
G x A	28	2,56 ^{**}	0,28 ^{**}	0,44 ^{**}	0,21 [*]	62,19 ^{**}	0,35 ^{**}
Resíduo	168	0,44	0,99	0,13	0,012	37,19	0,07
Total	231						

^{ns}, **, *. Não-significativo e significativo, no nível de 1 % e de 5 % de probabilidade, pelo teste F, respectivamente.

^{1/} Produção da matéria seca da parte aérea (PMSA), produção da matéria seca da raiz (PMSR), teor de fósforo na parte aérea (TPA), teor de fósforo na raiz (TPR), conteúdo de fósforo na parte aérea (CONTPA) e conteúdo de fósforo nas raízes (CONTPR).

As características que exibiram significância em 5 % de probabilidade para a interação genótipos por ambientes foram: AS, AP e TPR. Em estudo de

caracterização do sistema radicular de genótipo de milho, Hipólito et al. (2014) também identificaram interação significativa ($P < 0,05$) para a fonte de variação genótipos x ambientes para área de superfície, de forma consonante com os resultados da presente pesquisa. A caracterização prévia dos ambientes (“substratos”) como fidedignamente se referenciando ao nível baixo (4 mg/dm^3) e alto (22 mg/dm^3) de P foi uma etapa importante nesta pesquisa, pois caracterizou um adequado controle local e, conseqüentemente, maior precisão experimental. Ademais, favoreceu a adequada expressão da variabilidade presente nos genótipos avaliados, conforme já mencionado.

A presença da significância para a interação genótipos por ambientes na maioria das características (Tabela 7) reforça a necessidade de avaliação de genótipos em ambientes que sejam fidedignamente contrastantes, quando o intento é selecionar materiais eficientes no uso de P.

5.3. Análises de variâncias para os índices de eficiência ao P

As análises de variâncias para as características EE (eficiência de enraizamento), EAP (eficiência de absorção de fósforo), ETP (eficiência de translocação de fósforo), EUPPA (eficiência de utilização de fósforo na parte aérea) e R/PA (relação raiz parte aérea), estão apresentadas na Tabela 1. Neste trabalho, os índices de eficiência ao P foram avaliados somente para o ambiente sob baixo nível do nutriente. Em trabalhos anteriores com a cultura do milho, Mendes et al. (2014) e Rodrigues (2010) demonstraram que, em condições de disponibilidade de P, as características que compõem a eficiência do uso do nutriente não foram suficientes para discriminar os genótipos eficientes e ineficientes. Além disso, Parentoni (2008) verificou alta correlação entre os índices avaliados em ambientes contrastantes quanto ao P, em que seus resultados indicaram interação do tipo simples e, portanto, sem alteração substancial na diferenciação dos genótipos de milho nos distintos ambientes.

Tabela 11 - Resumo de análise de variância para cinco índices de eficiência na utilização de P, para o ambiente com baixo nível (4 mg/dm^3) do nutriente, em 29 linhagens de milho-pipoca. Campos dos Goytacazes, RJ, junho de 2015.

FV	Ambiente com 4 mg/dm^3 de P					
	GL	EE	EAP	ETP	EUPPA	R/PA
Blocos	3	0,0033	3,8750	0,0009	13,6689	0,0027
Genótipos	28	0,0024**	4,2946**	0,0019 ^{ns}	3,8705 ^{ns}	0,0015**
Resíduo	84	0,0007	0,7133	0,0016	2,7038	0,0002
Méd. Geral		0,0313	2,4771	0,8050	10,4507	0,0500
CV _e (%)		83,7525	34,0950	5,0186	15,7341	34,4438

^{ns}, **, *. Não-significativo e significativo nos níveis de 1 % e 5 % de probabilidade, pelo teste F, respectivamente.

^{1/} **EE** (eficiência de enraizamento), **EAP** (eficiência de absorção de fósforo), **ETP** (eficiência de translocação de fósforo), **EUPPA** (eficiência de utilização de P na parte aérea) e **R/PA** (relação raiz parte aérea).

Foram observadas estimativas de baixa magnitude para ETP e EUPPA, e diferenças altamente significativas ($p \leq 0,01$) para o efeito de genótipos/linhagens, para os índices EE, EAP e R/PA (Tabela 11). As linhagens que revelaram maiores estimativas de eficiência de enraizamento (EE), associada à maior produção de matéria seca de raiz (PMSR), podem ser consideradas eficientes, desde que exibam, concomitantemente, alta eficiência de absorção de fósforo (EAP). Esta associação está de acordo com os resultados encontrados por outros autores que buscaram classificar espécies vegetais quanto à sua EUP, a citar: Moura et al. (2001), que classificaram genótipos de pimentão; Souza et al. (2008) e Mendes et al. (2012), com milho, e Silva et al. (2016), em feijão. De forma conclusiva, são considerados eficientes os genótipos que possuem eficiência de enraizamento, associada a elevada produção de matéria seca de raiz (PMSR).

Uma resposta comumente observada na deficiência ao P é o aumento da razão de massa seca entre raiz e parte aérea (R/PA), devido ao aumento do estímulo do maior crescimento radicular em detrimento do menor crescimento concomitante da parte aérea (Hermans et al., 2006) em condição de *stress* ao P. Em um estudo com feijão, Nielsen et al. (2001) mostraram que genótipos eficientes na utilização do nutriente mantiveram uma maior razão R/PA durante o crescimento sob condições de baixo P, quando comparados com genótipos ineficientes. O mesmo foi observado em estudo com genótipos contrastantes de milho, por Brasil et al. (2007).

5.4. Parâmetros genéticos

As estimativas dos componentes de variância foram obtidas para cada ambiente avaliado, as quais estão expressas nas Tabelas 12 e 13, respectivamente, para o baixo e alto níveis de P utilizados. De modo similar ao apresentado anteriormente, a existência de variabilidade genética entre as linhagens para as características avaliadas, também pode ser comprovada pela estimativa dos parâmetros genéticos.

No ambiente sob condição de estresse (4 mg/dm³ de P), as estimativas de variabilidade genotípica ($\hat{\phi}_G$) foram diferentes de zero para a maioria das características, com exceção de TPA (teor de fósforo da parte aérea). Isso revela a ocorrência de variação entre os genótipos avaliados, o que é de fundamental importância para a seleção de linhagens superiores, visando à indicação de cruzamentos e geração de segregantes de interesse.

De modo geral, as magnitudes do coeficiente de determinação genotípica (H^2) foram elevadas, indicando que a maior parte da variabilidade fenotípica observada entre os genótipos foi devido a causas genéticas.

Dentre as características não expressas por eficiência ou conteúdo, as estimativas de H^2 variaram de 89,1534 % a 58,7112 %, respectivamente, para CF e PMSR. Em ordem hierárquica, as estimativas foram decrescendo na seguinte sequência de variáveis: CF, AS, AP, CT, R/PA, PMSR, PMSA e DC (Tabela 12).

Entre os índices que compõem a eficiência de utilização de P, EAP foi o que apresentou maior estimativa do coeficiente de determinação genotípica (H^2), seguido da relação raiz/parte aérea (R/PA), mostrando, portanto, maior influência do efeito ambiental em relação às raízes. Se, por um lado, isso ratifica que as raízes, de fato, são a principal parte da planta a exibir os efeitos da raridade do fósforo, por outro, dificulta a seleção, por não se tratar de uma área exposta, que pudesse favorecer a atuação do Melhorista e do Fitotecnista.

Os valores do índice de variação (I_V) foram superiores no ambiente sob estresse, para CT, AS, VR, CF e CONTPA, nesta ordem (Tabela 12). Tal situação confirma a possibilidade de obtenção de ganhos genéticos, já que o componente genético foi o fator determinante na variação observada, o que indica, também,

que métodos simples de seleção serão suficientes para se obter ganhos satisfatórios em gerações segregantes.

Observando a Tabela 13 – estimativas resultantes da condição de alto P, nota-se uma correlação inversa para com o índice de variação (I_V) e o coeficiente de determinação genotípica (H^2), quando comparado com as estimativas oriundas do ambiente sob estresse (Tabela 12), vez que tenderam a ser aproximar de zero, para a característica comprimento total da raiz (CT), dificultando a discriminação e, conseqüentemente, a seleção dos genótipos superiores com base nesta característica. Ainda, no que se refere a H^2 , pode-se inferir que há uma menor influência ambiental atuando sobre o comprimento da raiz, ratificando o que foi citado anteriormente de que, em condições de disponibilidade de P, as características que compõem a eficiência do uso do nutriente não são tão facilmente perceptíveis para discriminar os genótipos quanto sua eficiência.

Tabela 12 - Estimativas das variâncias fenotípicas ($\hat{\sigma}_f^2$), de ambiente ($\hat{\sigma}_A^2$), da variabilidade genotípica ($\hat{\phi}_G$), do coeficiente de determinação genotípica (H^2) e do índice de variação (I_V), para 17 características avaliadas em ambiente com baixo teor de P (4 mg/dm³) em relação a 29 linhagens S₇ de milho-pipoca. Campos dos Goytacazes, RJ, junho de 2015.

Parâmetros	Ambiente com 4 mg/dm ³ de P								
	Quadrados Médios ¹⁷								
	CT	AS	VR	AP	DC	CF	PMSA	PMSR	TPA
$\hat{\sigma}_f^2$	468337,0672	42223,0548	24,0799	10,3779	1,0182	64,2625	0,1665	0,0688	0,0173
$\hat{\sigma}_A^2$	100725,2416	5549,2508	3,8659	1,4221	0,1874	6,9703	0,0592	0,0148	0,0108
$\hat{\phi}_G$	367611,8256	36673,8039	20,2140	8,9557	0,8308	57,2922	0,1037	0,0540	0,0065
H^2	78,4930	86,8573	83,9455	86,2963	81,5915	89,1534	64,4579	78,4724	37,5737
I_V	0,9552	1,2854	1,1433	1,2547	1,0526	1,4335	0,6733	0,9546	0,3879

¹⁷ Comprimento total (CT), área superficial radicular (AS), volume de raízes (VR), altura da planta (AP), diâmetro do colmo (DC), comprimento da última folha (CF), Produção da matéria seca da parte aérea (PMSA), produção da matéria seca da raiz (PMSR), teor de fósforo na parte aérea (TPA).

Tabela 12, cont.

Ambiente com 4 mg/dm ³ de P								
Quadrados Médios ^{1/}								
Parâmetros	TPR	CONTPA	CONTPR	EE ^{1/}	EAP	ETP	EUPPA	R/PA
$\hat{\sigma}_f^2$	0,0009	3,7744	0,0070	0,0006	1,0736	0,0004	0,9676	0,0003
$\hat{\sigma}_A^2$	0,0013	1,9415	0,0027	0,0001	0,1783	0,0004	0,6759	0,0001
$\hat{\phi}_G$	0,0001	1,8328	0,0043	0,0004	0,8953	0,0001	0,2916	0,0003
H^2	0,0001	48,55	61,8228	71,2526	83,39	15,68	30,1437	80,3571
I_V	0,0001	0,4858	00,6363	0,7871	1,1203	0,2156	0,3284	1,0113

^{1/}Teor de fósforo na raiz (TPR), conteúdo de fósforo na parte aérea (CONTPA) e conteúdo de fósforo nas raízes (CONTPR), eficiência de enraizamento (EE), eficiência de absorção de fósforo (EAP), eficiência de translocação de fósforo (ETP), eficiência de utilização de P na parte aérea (EUPPA), relação raiz parte aérea (R/PA).

Tabela 13 -Estimativas das variâncias fenotípicas ($\hat{\sigma}_f^2$), de ambiente ($\hat{\sigma}_A^2$), da variabilidade genotípica ($\hat{\phi}_G$), do coeficiente de determinação genotípica (H^2) e do índice de variação (I_V), para 17 características avaliadas em ambiente com alto nível de P (22 mg/dm³) em relação a 29 linhagens S₇ de milho-pipoca. Campos dos Goytacazes, RJ, junho de 2015.

Parâmetros	Ambiente com 22 mg/dm ³ de P								
	Quadrados Médios ^{1/}								
	CT	AS	VR	AP	DC	CF	PMSA	PMSR	TPA
$\hat{\sigma}_f^2$	105219,5548	33105,6164	110,8668	15,8389	1,8025	71,7228	2,0306	0,3104	0,1599
$\hat{\sigma}_A^2$	106184,4563	3277,7619	22,4267	1,7392	0,2285	8,2087	0,1628	0,0351	0,0552
$\hat{\phi}_G$	0,0001	29827,8540	88,44013	14,0997	1,574082	63,5140	1,8677	0,2753	0,1046
H^2	0,0001	90,0991	79,7715	89,0193	87,3233	88,5549	74,1413	88,6740	65,4371
I_V	0,0001	1,5083	0,9929	1,4236	1,3123	1,3908	1,6933	1,399	0,6880

^{1/} Comprimento total (CT), área superficial radicular (AS), volume de raízes (VR), altura da planta (AP), diâmetro do colmo (DC), comprimento da última folha (CF), produção da matéria seca da parte aérea (PMSA), produção da matéria seca da raiz (PMSR), teor de fósforo na parte aérea (TPA).

Tabela 12, cont.

Ambiente com 22 mg/dm ³ de P								
Parâmetros	Quadrados Médios ^{1/}							
	TPR	CONTPA	CONTPR	EE	EAP	ETP	EUPPA	R/PA
$\hat{\sigma}_f^2$	0,0101	21,8084	0,2338	0,4047	1,6313	0,0001	0,8130	0,0006
$\hat{\sigma}_A^2$	0,0048	16,6556	0,0329	0,0710	0,1280	0,0001	0,1189	0,0001
$\hat{\phi}_G$	0,0052	5,1527	0,2009	0,3336	1,5032	0,0001	0,6940	0,0005
H^2	52,4207	23,6275	85,9220	82,4448	92,1508	20,7874	85,3714	85,0232
I_V	0,5248	0,2781	1,2352	1,0837	1,7132	0,2561	1,2079	1,1913

^{1/}Teor de fósforo na raiz (TPR), conteúdo de fósforo na parte aérea (CONTPA) e conteúdo de fósforo nas raízes (CONTPR), eficiência de enraizamento (EE), eficiência de absorção de fósforo (EAP), eficiência de translocação de fósforo (ETP), eficiência de utilização de P na parte aérea (EUPPA), relação raiz parte aérea (R/PA).

5.5. Discriminação genotípica com base em Variáveis Canônicas

A análise de Variáveis Canônicas tem por finalidade resumir um grande número de características originais correlacionadas em um gráfico bi ou tridimensional de tal forma que a variação seja maximizada e a correlação entre as variáveis seja nula (Khattree e Naik, 2000; Cruz et al., 2014).

A discriminação dos genótipos por meio das Variáveis Canônicas é de grande importância no planejamento de programas de melhoramento, sobretudo direcionados à obtenção de híbridos e na formação de população-base, pois ajudam na indicação de grupos e, ou, subgrupos distintos a serem incluídos nos programas de cruzamentos ou, mesmo, de seleção.

Na Tabela 14 estão as variâncias acumuladas pelas Variáveis Canônicas (VC_i) para as características relacionadas com as eficiências, considerando-se as estimativas oriundas do ambiente com baixo nível de P. Esta análise teve como objetivo resumir as informações, contidas em nove características avaliadas, para poucos componentes, sendo representados por combinações lineares, o que simplifica a interpretação dos resultados.

Tabela 14 - Variâncias acumuladas ($\hat{\sigma}_{Acumulada}$ %) pelas Variáveis Canônicas de nove características relacionadas com a eficiência, avaliadas em 29 linhagens S_7 de milho-pipoca, quando cultivadas em ambiente com baixo nível P (4mg/dm^3).

	$VC_i^{1/}$								
	VC_1	VC_2	VC_3	VC_4	VC_5	VC_6	VC_7	VC_8	VC_9
$\hat{\sigma}_{Acumulada}$	47,03	64,36	76,81	86,10	91,41	95,46	97,29	98,74	100,00

^{1/} Características utilizadas para compor as Variáveis Canônicas: teor de fósforo na parte aérea e na raiz (TPA e TPR), conteúdo de P na parte aérea (CONTPA), conteúdo de P na raiz (CONTPR), eficiência de enraizamento (EE), eficiência de absorção de fósforo (EAP), eficiência de translocação de fósforo (ETP), eficiência de utilização de P na parte aérea (EUPPA), relação raiz/parte aérea (R/PA).

Observa-se que as Variáveis Canônicas VC_1 e VC_2 explicaram menos que 70 % da variância total, o que demonstra uma discrepância entre as variâncias para as características avaliadas, com base nos fundamentos do método de Variáveis Canônicas, citados por Cruz et al. (2014), que pressupõem um mínimo de 70,00 % de variação acumulada nas duas primeiras Variáveis Canônicas, para a plotagem dos genótipos em um gráfico bidimensional, com

fidedigna representação da variabilidade presente. Neste aspecto, para alcançar uma representativa discriminação dos genótipos em eixos cartesianos, tornou-se necessária a utilização da terceira Variável Canônica (VC_3), uma vez que a variância acumulada ($\hat{\sigma}_{Acumulada}$) nas três primeiras variáveis foi de 76,81 %.

A contribuição relativa de cada característica para a discriminação genotípica, baseando-se no método de Singh (1981), é apresentada na Tabela 15.

Constatou-se que, em condição de estresse para o P, a eficiência de translocação de P (ETP) foi a característica que mais contribuiu para a diversidade presente nos acessos de milho-pipoca, apresentando valor percentual de 30,49 %, seguida pela eficiência de absorção de P (EAP) e pela relação raiz parte aérea (R/PA), com valores percentuais de 20,88 e 20,75, respectivamente. Considerando-se estes resultados e as estimativas de H^2 e I_V , expressas na Tabela 12, com magnitudes de 83,39 % e 1,12 para a característica eficiência de absorção; e 80,35 e 1,01, para relação raiz parte aérea, constata-se que a eficiência de absorção de P e a relação raiz parte aérea surgem como as características que, presumivelmente, seriam as de maiores importâncias para a seleção. Todavia, não se trata de características de fácil mensuração, sobretudo, por envolver procedimentos destrutivos da planta. De todo modo, a maior variação para R/PA mostra que a proporção de raízes em relação às partes aéreas variou sobremaneira no ambiente com baixo P, ratificando o comportamento ambíguo da parte aérea e da raiz, quando em ambiente sob estresse.

Com base na necessidade de utilização das três primeiras Variáveis Canônicas para explicar grande parte da variação total (Tabela 14), compôs-se um gráfico tridimensional (Gráfico 1), mostrando que a divergência genética entre as linhagens de milho-pipoca, a princípio influenciada pelos índices de eficiência estudados, foi possível ser avaliada por um complexo de variáveis de mais fácil interpretação.

Tabela 15 - Contribuição relativa de cada característica para a discriminação de 29 linhagens de milho-pipoca, com base no Método de Singh (1981).

Características ^{1/}	(S _j)	Valor em %
TPA	57,6521	1,0749
TPR	602,4324	11,2324
CONTPA	91,6275	1,7084
CONTPR	184,4441	3,4390
EE	304,5985	5,6193
EAP	1120,0038	20,8825
ETP	1635,4964	30,4939
EUPPA	254,0113	4,7361
R/PA	1113,0899	20,7536

^{1/} TPA e TPR (teor de fósforo da parte aérea e na raiz), CONTPA (conteúdo de P da parte aérea), CONTPR (conteúdo de P das raízes, em mg/planta). EE (eficiência de enraizamento), EAP (eficiência de absorção de fósforo), ETP (eficiência de translocação de fósforo), EUPPA (eficiência de utilização de P na parte aérea), R/PA (relação raiz parte aérea).

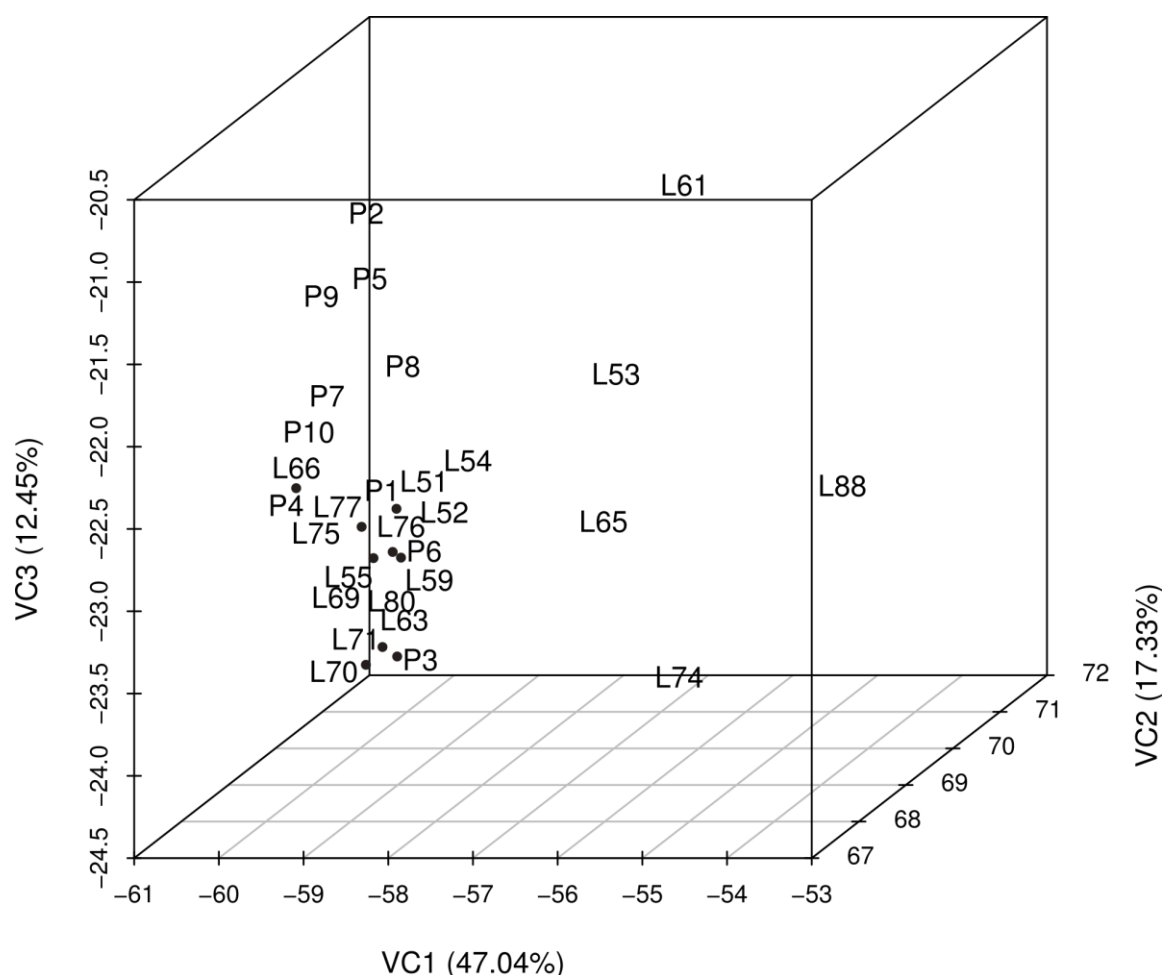


Gráfico 1a - Dispersão gráfica dos escores em relação aos eixos representativos das Variáveis Canônicas (VC1, VC2 e VC3) relativas a nove características avaliadas para 29 linhagens de milho-pipoca, cultivadas em condição de baixo P (4 mg/dm³).

deteve a menor média para EAP; por outro lado, P3 foi uma das melhores linhagens para eficiência no transporte (ET) e na utilização do P na parte aérea (EUPPA) e, finalmente, a mais proeminente na expressão da relação raiz/parte aérea (R/PA) (Tabela 16).

As linhagens P2 e P7, que também compuseram um grupo individual (Gráfico 1) tiveram sua *performance* espacial muito favorável quanto à eficiência ao P, revelando expressões de EE, ET, EUPPA e R/PA semelhantes a P3, o que as classificam como eficientes no uso de P.

A eficiência nutricional dessas linhagens parece estar vinculada, sobretudo, à maior relação raiz/parte aérea (R/PA), haja vista apresentarem as maiores estimativas de R/PA (Tabela 16), explicando, também, assim, a classificação diferenciada desses genótipos para as características de comprimento, área, volume e produção de matérias secas, expostas na Tabela 9. Por essa mesma lógica, porém, em situação oposta, as linhagens L65, L74 e L88, destacam-se por serem ineficientes na utilização de fósforo, apresentando magnitudes reduzidas do índice utilização de fósforo e da relação raiz/parte aérea.

Com relação ao genótipo 29 (L88), o afastamento gráfico em relação aos demais (Gráfico 1), pode ser presumido estar vinculado à sua menor magnitude da relação R/PA; neste caso, há que se acrescentar que essa mesma linhagem foi considerada eficiente na absorção de P, como pode ser constatado na Tabela 16, na comparação com as estimativas dos valores de EAP e R/RA, denotando que, apesar da alta *performance* na absorção, não houve um bom aproveitamento na conversão do nutriente para a produção de biomassa. Contrariamente, a linhagem 4 (P4) expressou menores magnitudes para os índices de EAP e EUPPA (Tabela 16). Este antagonismo pode ser atribuído à existência de mecanismos morfofisiológicos adaptativos, inclusive afetando diretamente a cadeia energética e na produção de hormônios, o que estabelece a adaptação do genótipo ao ambiente com baixa disponibilidade de P.

Analogamente, outras inferências podem ser realizadas, como por exemplo, a alocação de alguns genótipos no mesmo grupo, tais como: 26, 18, 14, 11 e 12 (Gráfico 1), o que pode ter decorrido da semelhança entre as magnitudes dos índices considerados. Observando-se a Tabela 16, constata-se que a média apresentada para EUPPA, associada a baixa relação raiz parte aérea (R/PA) em

relação ao genótipo 29 (L88), evidencia uma alta capacidade de aproveitamento do P na parte aérea da planta. Ainda assim, foi caracterizado como genótipo ineficiente. Isso ocorreu porque, para ser considerado como um genótipo eficiente a baixos níveis de P no solo, o mesmo deve ser capaz de absorver, translocar e utilizar o P sob essas condições, ou seja, além de apresentar alta capacidade de EUPPA, ele também deveria ter um bom crescimento radicular, sua relação raiz parte aérea deveria ter sido mais alta, justificando, pois, o seu isolamento espacial no Gráfico 1.

Tabela 16 - Médias e agrupamentos de 29 linhagens de milho-pipoca avaliadas em ambiente com baixo nível de (4 mg/dm^3) em relação a nove características vinculadas a teores, conteúdos e eficiências de P, pelo teste de Scott Knott (Steel e Torrie, 1980), dispostas em ordem decrescente da contribuição para a variação total.

	TPA ^{1/} g/kg		TPR g/kg		CONTPA g/planta		CONTPR g/planta		EE Índice					
5	1,52	A	15	0,35	A	5	19,88	A	7	0,34	A	3	0,12	A
21	1,48	A	9	0,35	A	21	18,42	A	3	0,33	A	2	0,07	B
26	1,41	A	10	0,34	A	10	18,06	A	8	0,31	A	7	0,07	B
23	1,41	A	4	0,34	A	9	17,58	A	2	0,31	A	8	0,06	B
15	1,38	A	13	0,33	A	26	17,56	A	20	0,30	A	20	0,06	B
10	1,36	A	8	0,33	A	15	17,49	A	9	0,29	A	25	0,05	B
4	1,35	A	29	0,32	A	4	17,47	A	4	0,28	A	16	0,04	C
1	1,35	A	7	0,32	A	20	17,46	A	10	0,28	A	21	0,04	C
20	1,34	A	24	0,32	A	2	17,33	A	25	0,27	A	4	0,04	C
2	1,31	A	5	0,32	A	23	17,31	A	15	0,25	A	10	0,04	C
9	1,31	A	25	0,32	A	1	17,12	A	5	0,25	A	9	0,04	C
27	1,28	A	14	0,31	A	27	16,59	A	27	0,22	A	5	0,04	C
25	1,26	A	1	0,31	A	8	16,46	A	21	0,21	B	27	0,04	C
8	1,25	A	27	0,31	A	25	16,13	A	16	0,20	B	15	0,03	C
6	1,23	A	6	0,31	A	3	15,89	B	1	0,18	B	22	0,02	C
17	1,23	A	11	0,30	A	6	15,84	B	11	0,17	B	23	0,02	C
11	1,23	A	26	0,30	A	7	15,55	B	26	0,16	B	11	0,02	C
14	1,21	A	20	0,30	A	11	15,53	B	23	0,16	B	28	0,02	C
7	1,21	A	23	0,29	A	16	15,45	B	6	0,16	B	14	0,02	C
16	1,20	A	18	0,29	A	17	15,43	B	14	0,16	B	1	0,02	C
12	1,19	A	12	0,29	A	14	15,25	B	22	0,15	B	26	0,02	C
3	1,19	A	16	0,28	A	12	14,78	B	18	0,14	B	12	0,02	C
28	1,18	A	19	0,28	A	28	14,74	B	12	0,14	B	6	0,02	C
22	1,18	A	2	0,27	A	18	14,67	B	28	0,13	B	18	0,01	C
18	1,18	A	22	0,27	A	22	14,50	B	13	0,11	B	19	0,01	C
24	1,08	A	21	0,27	A	19	12,96	B	19	0,08	B	17	0,01	C
19	1,06	A	28	0,26	A	24	12,65	B	24	0,08	B	13	0,01	C
29	0,98	A	3	0,24	A	13	11,90	B	29	0,07	B	29	0,01	C
13	0,96	A	17	0,23	A	29	11,76	B	17	0,07	B	24	0,01	C

Linhagens: 1 = P1, 2 = P2, 3 = P3, 4 = P4, 5 = P5, 6 = P6, 7 = P7, 7 = P8, 9 = P9, 10 = P10, 11 = L51, 12 = L52, 13 = L53, 14 = L54, 15 = L55, 16 = L59, 17 = L 61, 18 = L63, 19 = L65, 20 = L66, 21 = L 69, 22 = L70, 23 = L71, 24 = L74, 25 = L75, 26 = L76, 27 = L77, 28 = L80 e 29 = L88.

^{1/} **TPA e TPR** (teor de fósforo da parte aérea e na raiz), **CONTPA** (conteúdo de P da parte aérea), **CONTPR** (conteúdo de P das raízes, em mg/planta), **EE** (eficiência de enraizamento), **EAP** (eficiência de absorção de fósforo), **ETP** (eficiência de translocação de fósforo), **EUPPA** (eficiência de utilização de P na parte aérea), **R/PA** (relação raiz parte aérea).

Tabela 16, cont.

EAP ^{1/} Índice			EAP ^{1/} Índice			ETP ^{1/} Índice			R/PA ^{1/} Índice		
29	5,63	A	21	0,9	A	13	12,85	A	3	0,10	A
24	4,58	B	17	0,8	A	29	12,22	A	7	0,08	A
17	4,29	B	3	0,8	A	19	11,73	A	2	0,08	A
19	3,87	B	23	0,8	A	3	11,40	A	20	0,08	A
13	3,45	B	26	0,8	A	17	11,19	A	25	0,07	B
14	2,75	C	5	0,8	A	24	11,03	A	21	0,07	B
26	2,71	C	28	0,8	A	7	10,98	A	8	0,07	B
1	2,66	C	22	0,8	A	12	10,85	A	4	0,07	B
12	2,63	C	20	0,8	A	14	10,82	A	10	0,06	B
23	2,61	C	2	0,8	A	16	10,79	A	9	0,06	B
15	2,54	C	1	0,8	A	8	10,79	A	16	0,06	B
18	2,54	C	16	0,8	A	2	10,74	A	5	0,06	B
11	2,50	C	27	0,8	A	28	10,71	A	27	0,06	B
6	2,48	C	18	0,8	A	22	10,63	A	15	0,05	B
28	2,34	C	12	0,8	A	11	10,62	A	23	0,05	C
22	2,18	C	10	0,8	A	18	10,58	A	22	0,05	C
16	2,11	C	25	0,8	A	9	10,51	A	26	0,04	C
5	2,11	C	11	0,8	A	6	10,49	A	11	0,04	C
21	2,11	C	6	0,8	A	25	10,28	A	1	0,04	C
27	2,01	C	4	0,8	A	27	10,15	A	28	0,04	C
8	1,88	C	15	0,8	A	20	9,84	A	6	0,04	C
10	1,85	C	19	0,8	A	10	9,81	A	18	0,04	C
9	1,69	C	14	0,8	A	4	9,66	A	14	0,04	C
4	1,64	C	8	0,8	A	1	9,66	A	12	0,04	C
25	1,59	C	9	0,8	A	15	9,23	A	19	0,03	C
20	1,46	C	7	0,8	A	5	9,12	A	17	0,03	C
7	1,28	C	24	0,8	A	26	9,07	A	13	0,03	C
2	1,27	C	29	0,8	A	23	8,87	A	24	0,02	C
3	1,13	C	13	0,8	A	21	8,47	A	29	0,02	C

Linhagens: 1 = P1, 2 = P2, 3 = P3, 4 = P4, 5 = P5, 6 = P6, 7 = P7, 7 = P8, 9 = P9, 10 = P10, 11 = L51, 12 = L52, 13 = L53, 14 = L54, 15 = L55, 16 = L59, 17 = L 61, 18 = L63, 19 = L65, 20 = L66, 21 = L 69, 22 = L70, 23 = L71, 24 = L74, 25 = L75, 26 = L76, 27 = L77, 28 = L80 e 29 = L88.

^{1/} **EAP** (eficiência de absorção de fósforo), **ETP** (eficiência de translocação de fósforo), **EUPPA** (eficiência de utilização de P na parte aérea), **R/PA** (relação raiz parte aérea).

5.6. Classificação genotípica com base no Parâmetro α

Fundamentando-se no parâmetro alfa, estimador da eficiência de aproveitamento de nutrientes, em que se considera o aumento de utilização de fósforo pela parte aérea da planta decorrente da dosagem do nutriente fornecido para os genótipos, foi possível classificar as 29 linhagens de milho-pipoca avaliadas em quatro grupos distintos, ou seja, linhagens eficientes e não-responsivas (ENR), eficientes e responsivas (ER), não-eficientes e responsivas

(NER) e não-eficientes e não-responsivas (NENR), conforme podem ser visualizados no Gráfico 2.

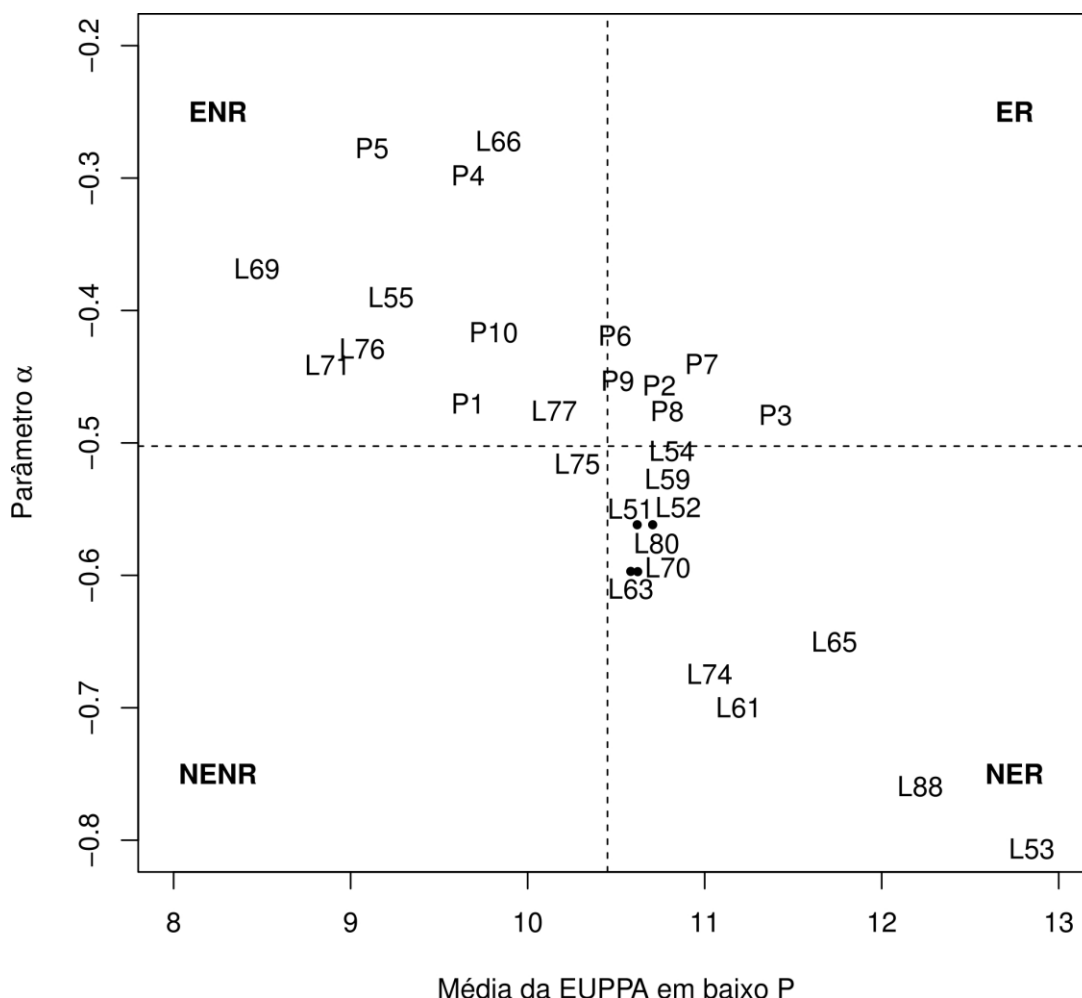


Gráfico 2 - Discriminação genotípica baseada no parâmetro α (CIAT, 1978), entre 29 linhagens S_7 de milho-pipoca, em que: ENR = eficientes e não-responsivas, ER = eficientes e responsivas, NER = não-eficientes e responsivas e NENR = não-eficientes e não-responsivas.

Com base no estimador - Parâmetro alfa -, as linhagens eficientes na utilização de P foram aquelas que atingiram magnitudes de α acima de -0,50, no ambiente com baixa disponibilidade de P e, responsivas, as que atingiram valores de EUPPA acima de 10,41, por grama de P aplicado.

Este estudo facilita a indicação de genótipos a sistemas de produção em níveis tecnológicos distintos, no que diz respeito à disponibilidade do nutriente em questão. Assim, os genótipos classificados como ENR foram eficientes na utilização de fosforo, mas não corresponderam com incremento de massa seca,

quando da elevação da disponibilidade do nutriente, sendo, então, indicados para sistemas de produção que não dispõem de recursos para a adubação fosfatada. Nesse grupo, destaca-se a linhagem P4 (Gráfico 2).

Os genótipos classificados como ER são os mais indicados para sistemas de produção com poucos recursos para adubação, contudo, à medida que a disponibilidade do adubo se amplia, as linhagens respondem com o incremento na produção. Obviamente que não se trata, aqui, da indicação de linhagens para cultivo, mas de seus híbridos descendentes. Neste caso, recomendam-se hibridações oriundas das linhagens P3, P2 e P7, as quais por suas reconhecidas eficiências e responsabilidades ao P, nesse trabalho, possuem potencial para serem utilizadas em programas de melhoramento, para futuras obtenções de cultivares de milho-pipoca com alta *performance* em ambientes com baixos níveis de P, como ocorrem com os solos do Norte e Noroeste Fluminense.

Selecionando genótipos, precocemente para a eficiência ao P, como no caso dessa pesquisa, em que se utilizaram linhagens, fornecem-se as bases para a determinação de genitores contrastantes, menos e mais eficientes, que são "ferramentas básicas" para que, *a posteriori*, determine-se o controle genético dessa característica, permitindo o estabelecimento da estratégia de melhoramento mais adequada para a seleção de segregantes superiores de milho-pipoca quanto à eficiência ao P.

Empregando cultivares eficientes na utilização de P, possibilita-se aos produtores, maior economia no custo de produção em plantios comerciais e uma oportunidade de se praticar agricultura sustentável, no que diz respeito à dependência de um adubo que está cada vez mais escasso e, conseqüentemente, com seu custo mais elevado, o que pode ocasionar salinização se aplicado de forma indiscriminada, dentre outros impactos socioambientais deletérios.

Gerhardt et al. (2016), trabalhando com essas mesmas linhagens de milho-pipoca, porém em campo, obtiveram resultados similares na seleção dos genótipos superiores quanto à eficiência na utilização de P. Isto posto, pode-se inferir que esta alta correlação entre produtividade de grãos e produção de biomassa em campo e em casa de vegetação, permite a implementação de trabalhos em nível de casa de vegetação, com um custo sobremaneira menor, sobretudo com relação à demanda de mão de obra, reduzindo assim, o tempo

para o lançamento de cultivares com esses atributos. Soma-se à valoração desta inferência, o fato de que em outros trabalhos, o aumento no rendimento de grãos tem sido associado a aumentos semelhantes na produção de biomassa, conforme propalado por Perry e D'Antuono (1989); Perim et al. (2002) e Costa et al. (2005).

6. CONCLUSÕES

As conclusões possíveis resumem-se assim:

- a) Os ambientes foram suficientemente distintos para promover diferenças entre as características avaliadas, bem como houve suficiente variabilidade genética entre as linhagens do Banco Ativo de Germoplasma da UENF.
- b) O teste de médias permitiu discriminar as linhagens 7 (P7), 3 (P3), 16 (L59) e 2 (P2) como eficientes e 29 (L88), 19 (L65), 24 (L74); e 17 (L61) como ineficientes no uso de P.
- c) A eficiência de uso de P pode ser avaliada indiretamente, pela avaliação da produção de biomassa da raiz associada à produção de matéria seca da parte aérea.
- d) Os parâmetros genéticos evidenciaram possibilidade de ganhos por seleção sob condição de estresse.
- e) As Variáveis Canônicas apresentaram resultados concordantes ao Parâmetro α na discriminação das linhagens, classificando P3, P7 e P2, como eficientes e L65, L74 e L88, como ineficientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, G.A.S.C., Azambuja, R.S.L., Lins, F.A.F. (2005) Rochas e minerais industriais: usos e especificações. *Centro de Tecnologia Mineral – Ministério da Ciência e Tecnologia*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Alves, V.M.C., Parentoni, S.N., Vasconcellos, C.A., Pitta, G.V.E., França, C. (2002) Cinética de absorção de fósforo e crescimento do sistema radicular de genótipos de milho contrastantes para eficiência a fósforo. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 1(1), 85-92.
- Amaral Júnior, A.T., Goncalves, L.S.A., Freitas Júnior, S.P., Candido, L.S., Vittorazzi, C., Pena, G.F., Ribeiro, R.M., Silva, T.R.C., Pereira, M.G., Scapim, C.A., Viana, A.P., Carvalho, G.F. (2013) UENF 14: a new popcorn cultivar. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 13:218.
- Almeida Júnior, A.B., de Oliveira, F.D.A., de Medeiros, J.F., de Oliveira, M.K.T., Linhares, P.C.F. (2009) Efeito de doses de fósforo no desenvolvimento inicial da mamoneira. *Revista Caatinga*, 22(1).
- Asher, C.J., Loneragan, J.F (1967) Resposta das plantas à concentração de fosfato na cultura solução: I. Crescimento e teor de fósforo. *Soil Science*, 103 (4): 225-233.

- Baligar, V.C., Fageria, N.K. (1997) Nutrient use efficiency in acid soils: *nutrient management and plant use efficiency* p. 75–93. In: Monitz, A.C., Furlani, A.M.C., Fageria, N.K., Rosolem, C.A., Cantarells, H. (eds.), *Plant-Soil Interactions at*.
- Baligar, V.C., Fageria, Z.L., He, N.K. (2001) Nutrient use efficiency in plants. *Comm. Soil Sci. Plant Analysis* 32: 921-950.
- Barber, S.A. (1984) Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. *New York: Wiley-Interscience*, 398 p.
- Barros Filho, N.F., Comerford, N.B., Barros, N.F. (2005) Phosphorus sorption, desorption and resorption by soils of the Brazilian Cerrado supporting eucalypt. *Biomass & Bioenergy*, v. 28, p. 229-236.
- Batten, G.D. (1992) A review of phosphorus efficiency in wheat. *Plant and Soil* v.146, p.163-168.
- Braccini, M., Martinez, H., Pereira, P., Sampaio, N.F., Pereira, A.A. (1998) Tolerância de genótipos de cafeeiro ao alumínio em solução nutritiva. II Teores de P, Ca, e Al e eficiência ao P e Ca. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22(3).
- Brasil, E.C., Carvalho, V.M., Marriel, I. E., Pitta, G.V.E., Carvalho, J.G. (2007) Matéria seca e acúmulo de nutrientes em genótipos de milho contrastantes quanto a aquisição de fósforo. *Ciência e Agrotecnologia, Lavras*, v. 31, p. 704-712.
- Bouranis, D.L., Chorianopoulou, S.N., Kollias, C., Maniou, P., Protonotarios, V.E., Siyiannis, V. F., Hawkesford, M.J. (2006) Dynamics of aerenchyma distribution in the cortex of sulfate-deprived adventitious roots of maize. *Annals of Botany*, 97(5), 695-704.

- Brunson, A.M. (1937) Popcorn breeding. Washington: *Yearbook Agricultural*, v.1, p.395-404.
- Campos, A.T., De Campos, A.T. (2004) Balanços energéticos agropecuários: uma importante ferramenta como indicativo de sustentabilidade de agroecossistemas. *Ciência Rural* 34.6 (2004): 1977-1985.
- Carena M.J. (2009) Handbook of plant breeding: cereals. Springer, New York p99-126.
- Cella, D.R., Rossi, M.C.L. (2010) Análise Do Mercado de Fertilizantes no Brasil Interface Tecnológica - v.7 - n.1.
- Chen, J., Cai, Y., Xu, L., Wang, J., Zhang, W., Wang, G., Xu, D., Chen, T., Lu, X., Sun, H., Huang, A., Liang, Y., Dai, G., Qin, H., Huang, Z., Zhu, Z., Yang, Z., Xu J., Kuang, S. (2011) Identification of QTLs for biomass production in maize (*Zea mays* L.) under different phosphorus levels at two sites. *Front. Agric. China*, 5(2): 152–161.
- Chen, J., Xu, L., Cai, Y., & Xu, J. (2009) Identification of QTLs for phosphorus utilization efficiency in maize (*Zea mays* L.) across P levels. *Euphytica*, Wageningen 167 (2)245-252.
- Chen, Z., Cui, Q., Liang, C., Sun, L., Tian, J., Liao, H. (2011) Identification of differentially expressed proteins in soybean nodules under phosphorus deficiency through proteomics analysis. *Proteomics*. 11, 4648- 4659.
- Coelho, G.T.D.C.P., Souza, I.R.P.D., Carneiro, N.P., Schaffert, R.E., Brandão, R.L., Alves, V., Carneiro, A.A. (2010) Formação de aerênquima em raízes de milho sob estresse de fósforo. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 5(03).
- Coelho, C. Maria, M., Santos, J.C.P., Tsai, S.M.V., Vitorello, V. A. (2002) Teor de fitato em grãos e a absorção e distribuição de fósforo em genótipos de feijoeiro. *Braz. J. Plant Physiol.* [online]. vol.14, n.1, pp.51-58.

- Collins, N. C., Tardieu, F., Tuberosa, R. (2008) Quantitative trait loci and crop performance under abiotic stress: where do we stand. *Plant Physiology*, Bethesda, v. 147, p. 469-486.
- Comstock, R.E., Robinson, H.F. (1948) The components of genetic variance in populations of biparental progenies and their use in estimating the average degree of dominance. *Biometrics*, 4:254-266.
- Clark, R.B., Brown, J.C. (1974) Differential phosphorus uptake by phosphorus stressed corn inbreds. *Crop Science, Madison*, v. 14, p. 505-508.
- Clarkson, D., Hawkesford M. (1993) Membrane and long distance transport of sulfate. In: De Kok LJ, Stulen I, Rennenberg H, Brunold C, Rauser WE, editors. Sulfur nutrition and assimilation in higher plants: regulatory, agricultural and environmental aspects. The Hague: *SPB Academic Publishing*. p. 3–19.
- Cock, W.R.S., Tardin, F.D., Amaral Júnior, A.T.D., Scapim, C.A., Amaral, J.F.T.D., Cunha, G. D.M., Pinto, R.J.B. (2003) Seleção de genótipos de alface eficientes na absorção do fósforo, *actasciagron*. v25i1. 2348. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 25(1), 59-64. 27238799.
- Cock, W.R.S., Amaral Júnior, A.T., Smith, R. E. B., Monnerat, P.H. (2002) Biometrical analysis of phosphorus use efficiency in lettuce cultivars adapted to high temperatures. *Euphytica (Wageningen)*, v. 126, p. 299-308.
- Costa, A.C.T., Oliviera, L., Carmo, M., Pereira, M.B., Pimentel, C. (2005) Produção de biomassa e de grãos e resistência à ferrugem no composto ENA 2 de milho pérola, semeado na época da seca. *Agronomia*, 39, 71-76.
- Cruz, C.D., Carneiro, P. C. de S., Regazzi, A. J. (2014) Modelos Biométricos Aplicados ao Melhoramento Genético. 3. ed. Viçosa, MG: Editora UFV,. v. 2. 668p .

- Cruz, C. D. (2013) GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. *Acta Scientiarum. Agronomy* 35: 271-276.
- Cruz, C.D., Regazzi, A.J., Carneiro, P.C.S. (2012) Modelos Biométricos Aplicados ao Melhoramento Genético, 4. ed. Viçosa: *Editora UF*, v. 2. 514p .
- Da Gama Rodrigues, E.F., De-Polli, H., da Eira, P.A. (1994) Inoculação, calagem e adubação para mucuna-preta e feijão-de-porco num solo Podzólico Vermelho-Amarelo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 29.5: 807-814.
- Daros, M.; Amaral Júnior, A.T.; Pereira, M.G.; Santos, F.S.; Scapim, C.A.; Freitas Júnior, S.P.; Daher, R.F.; Ávila, M.R. (2004) Correlações entre caracteres agrônômicos em dois ciclos de seleção recorrente em milho-pipoca. *Ciência Rural*, v.34, p.1389-1394.
- Daros, M., Amaral Júnior, A.T., Pereira, M.G. (2002) Genetic gain for grain yield and popping expansion in full-sib recurrent selection in popcorn. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 2 (3): 339-344.
- Dechen, A.R., Nachtigall, R.G. (2007) Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: Novais, R. F. et al. (Org.). *Fertilidade do solo*. Viçosa, MG: *Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*. p. 91-132.
- De-polli, H., Guerra, J.G.M.C. (1999) N e P na biomassa microbiana do solo. Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: *Genesis*, 1999, 389-411.
- Duncan R.R. (1994) Genetic Manipulation. pp. 1-38. In: R.E. Wilkinson (Ed.), *Plant environment interactions*. New York: Marcel Dekker.
- Fageria, N.K., Baeta, A.B., Alexandre, B.H. (2011) Lowland rice genotypes evaluation for phosphorus use efficiency in tropical lowland. *Journal of Plant Nutrition*, 34(8), 1087-1095.

- Fageria, N.K., Baligar, V.C. (2001) Improving nutrient use efficiency of annual crops in Brazilian acid soils for sustainable crop production. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(7-8), 1303-1319.
- Fageria, N.K., Baligar, V.C., Moreira, A., Portes, T.A. (2010) Dry bean genotypes evaluation for growth, yield components and phosphorus use efficiency. *Journal of Plant Nutrition*, 33(14), 2167-2181.
- Fan, M., Zhu, J., Richards, C., Brown, K.M., Lynch, J.P. (2003) Physiological roles for aerenchyma in phosphorus-stressed roots. *Functional Plant Biology*, 30(5), 493-506.
- Fantin, G.M., Sawazaki, E., Barros, B.C. (1991) Avaliação de genótipos de milho-pipoca quanto à resistência a doenças e à qualidade da pipoca. *Summa Phytopathologica*, 17 (2): 91-104.
- Fawole, I., Gabelman, W.H., Gerloff, G.C., Nordheim, E.V. (1982) Heritability of efficiency in phosphorus utilization (*Phaseolus vulgaris* L.) grown under phosphorus stress. *Journal of American Society for Horticultural Science*, Alexandria, v. 107, n.1, p. 94-97.
- Faquin, V. (2005) Nutrição mineral de plantas. Lavras: UFLA/Faepe.
- FAO (2009) Organização das Nações Unidas Para Alimentação e Agricultura –. Disponível em <<http://fas.fao.org/>>.
- Fernandes, C., Muraoka, T. (2002) Absorção de fósforo por híbridos de milho cultivados em solo de cerrado. *Scientia Agricola*, Piracicaba 59 (4) 781-787.
- Fidélis, R.R., Afferri, F.S., Peluzio, J.M., dos Santos, G.R., Lemus, E.A.E. (2008) Classificação de populações de milho quanto a eficiência e resposta ao uso de fósforo em solos naturais de cerrado. *Bioscience Journal*, Uberlândia 24 (3) 39-45.

- Fonseca, A.S., Thomazini, A., Bertossi, A. P. A., Amaral, J. F. T. (2013) Análise de crescimento e absorção de fósforo em alface. *Nucleus* (Ituverava. Online), v. 10, p. 7-13, 2013.
- Fox, R.H. (1978) Selection for phosphorus efficiency in corn. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v. 9, n. 1, p. 13-37.
- Freitas, I.L.J, Amaral Junior, A.T., Freitas Júnior, S.P., Cabral, P.D.S., Ribeiro, R.M., Goncalves, L.S.A. (2014) Genetic gains in the UENF-14 popcorn population with recurrent selection. *Genetics and Molecular Research*, v. 13, p. 518-527.
- Fritsche-Neto, R., Miranda, G.V., DeLima, R.O., Souza, L.V., Silva, J. (2010) Herança de caracteres associados à eficiência de utilização do fósforo em milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 45(5), 465-471.
- Furlani, A.M.C., Clark, R.B., Maranville, J.W., Ross, W.M. (1984) Sorghum genotype differences in phosphorus uptake rate and distribution in plant parts. *Journal of Plant Nutrition*, New York, 7(7):1113-1126.
- Furlani, A.M.C., Usberti Filho, J.A. (1990) Capim-colonião: eficiência na absorção e na utilização de fósforo em solução nutritiva. *Bragantia, Campinas*, v. 49, n. 2, p. 413-423.
- Furlani, A.M.C., Bataglia, O.C., Lima, M. (1985) Eficiência de linhagens de milho na absorção e utilização de fósforo em solução nutritiva. *Bragantia*, 44(1), 129-47.
- Furlani, A. M. C.; Lima, M.; Nass, L. L. (1998) Combining ability effects for P-efficiency characters in maize grown in low P nutrient solution. *Maydica, Bergamo*. 43 (3) 169-174.

- Fukuda, T., Saito, A., Wasaki, J., Shinano, T., Osaki, M. (2007). Metabolic alterations proposed by proteome in rice roots grown under low P and high Al concentration under low pH. *Plant Science*. 172, 1157-1165.
- Gabelman, W.H., Gerloff, G.C. (1983) The search and interpretation of genetic controls that enhance plant growth under deficiency levels of a macronutrient. *Plant and Soil*, the hague, v.72p.335-350.
- Gaume, A., Machler, F., Leon, C.D., Narro, L., Frossard, E. (2001) Low P tolerance by maize genotypes: Significance of root growth, and organic acids and acid phosphate root exudation. *Plant Soil*. 228, 253–264.
- Gerhardt, I.F.S, Amaral Jr., A.T., Guimarães, L.J.M., Schwantes, I.A., Santos, A., Kamphorst, S. (2016) Variabilidade intraespecífico de linhagens S₇ de milho-pipoca para eficiência ao fósforo no solo. (*no prelo*). In *Maydica*.
- Gerloff, G.C. (1976) Plant efficiencies in the use of nitrogen, phosphorus, and potassium. p.161-173. In. Wright (ed.) *Plant adaptation to mineral stress in problem soils. Cornell Univ. Agric. Expa. Stn., Ithaca, NY.*
- Giacomini, S.G., Aita, C., Hübner, A.P., Lunkes, A., Guidini, E. Amaral, E.B. (2003) Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 38, p. 1097-1104.
- Gianello, C., Ernani, P.R. (1983) Rendimento de matéria seca de milho e alterações na composição química do solo pela incorporação de quantidades crescentes de cama de frangos, em casa de vegetação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas*, v. 7, p. 285-29.
- Goedert, W.J. (1987) *Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo.* São Paulo: Nobel. 422p.

- Goldstein, I.L. (1991) Training in work organizations. In: Dunnette & Hough (Orgs). *Handbook of Industrial and Organizational Psychology*. Palo Alto, California: Consulting Psych. p. 507-619.
- Gomes, J.F. (2016) Fósforo, a próxima guerra? Depois da água, claro!. In *portal Ecodebate Cidadania & Meio Ambiente*. ISSN 2446-9394. <http://www.ecodebate.com.br/2016/02/18/fosforo-a-proxima-guerra-depois-da-agua-claro-artigo-de-fabio-jose-gomes/>.
- Gonçalves, J.L.M., Firme, D.J., Novais, R.F., Ribeiro, A.C. (1985) Cinética de adsorção de fósforo em solos de cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 9(2), 107-111.
- Grant, C.A., Flaten, D.N., Tomaszewicz, D.J., Sheppard, S.C. (2001) A Importância do Fósforo No Desenvolvimento Inicial Da Planta. *Informações agronômicas* nº 95, setembro.
- Guimaraes, A. G.; Amaral Junior, A. T.; Vivas, M.; Lima, V. J.; Leite, J. T.; Pereira, M. G.; Scapim, C. A. (2016) ganho genético e avanços seletivos na população UNB-2U de milho-pipoca. *Ciência Rural* (no prelo).
- Guimaraes, L.J.M., Guimaraes, C.T., magalhaes, J.V., Parentoni, S.N., Mendes F.F. (2012) Breeding for aluminum tolerance.. In: Fritsche-Neto, R., Borém, A.. (Org.). *Plant Breeding for Abiotic Stress Tolerance*. 1ed.Berlin: Springer, p. 123-136.
- Guimaraes, L.J.M., Parentoni, S.N., Mendes F.F., Martins, A.O. (2011) Melhoramento visando à tolerância a estresses abióticos (melhoramento do milho para estresses abióticos). In: Cardoso, D.L., LUZ, L.N. da, Pereira, T.N.S. (Org.) *Estratégias em melhoramento de plantas*. Viçosa: Arka, v. 1, p. 39-53.
- Hallauer, A.R., Miranda, F. J.B., Carena, M.J. (2010) Quantitative genetics in *maize breeding*. 3rd ed., Springer, New York, 663p.

- Hallauer, A; Carena, M.J. (2009) Maize Breeding. In: Cereals. ed.: Carena, M.J. Springer. 425p.
- Hallauer, A.R. (2001) Specialty corns. CRC Press, 496p.
- Hammond, J.P., Broadley, M.R., White, P.J. (2004) Genetic responses to phosphorus deficiency. *Annals of Botany*, 94(3), 323-332.
- He, Z.L., Wu, J., O'Donnell, A.G., Syers, J.K. (1997) Seasonal responses in microbial biomass carbon, phosphorus and sulphur in soils under pasture. *Biology and Fertility of Soils*, 24(4), 421-428.
- Hermans, C., Hammond, J.P., White, P.J., Verbruggen. N. (2006) How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation. *Trends in Plant Science*, Oxford, v. 11, p. 1360-1385.
- Hipólito, L.P.T., Abreu, M.G., Oliveira, B.C.F.S. Ribeiro, C.A.G., Guimarães, C.T., Pastina, M.M., Souza, S.M. (2014) Caracterização do Sistema Radicular de Genótipos de Milho do Painel da Embrapa Milho e Sorgo em Solução Nutritiva Visando à Eficiência da Aquisição de Fósforo. *xxx congresso nacional de milho e sorgo*, Salvador- BA.
- 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(9), 2369-2387.
- Hochmuth, G.J., Gabelman, W.H., Gerloff, G.C. (1985) A gene affecting tomato root morphology. *HortScience*, v.20, n.6, p.1099-1101.
- Hoseney, R.C., Zeleznak, K., Abdelrahman, A. (1983) Mechanism of Popcorn popping. *Jornal of Cereal Science I*, 43-52.

- Horst, W.J., Abdou, M., Wiesler, F. (1993) Genotypic differences in phosphorus efficiency of wheat. *Plant and Soil*, 155(1), 293-296.
- IFA. (2009) Associação Internacional da Indústria de Fertilizantes. Disponível em:<http://fertilizer.org/ifa/content/view/full11423>.
- Jamjod, S., Mann, C.E., Rerkasem, B. (1993) Combining ability of the response to boron deficiency in wheat. In: Randall, P.J., Delhaize, E., Richards, R.A., eds. *Genetic aspects of plant mineral nutrition*. Netherlands, Kluwer Academic Publishers, p.359-361.
- Konietzny, U., Greiner, R. (2002) Molecular and catalytic properties of phytate-degrading enzymes (phytases). *International Journal of Food Science and Technology*, Oxford, v. 37, p. 791- 812.
- Leal, J.R., Velloso, A.C.X. (1973) Dessorção do fosfato adsorvido em latossolos sob vegetação de cerrado. II. Reversibilidade da isoterma de adsorção de fosfato em relação ao pH da solução em equilíbrio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.8, p.89- 92.
- Lindgren, D.T., Gabelman, W.H., Gerloff, G.C. (1977) Variability of phosphorus uptake and translocation in *Phaseolus vulgaris* L. under phosphorus stress. *Journal American Society for Horticultural Science*, 102.
- Li, K., Xu, C., Li, Z., Zhang, K., Yang, A., Zhang, J. (2008) Comparative proteome analyses of phosphorus responses in maize (*Zea mays* L.) roots of wild-type and a low-P-tolerant mutant reveal root characteristics associated with phosphorus efficiency. *The Plant Journal*. 55, 927-939.
- Li, M, Guo, X, Zhang, M., Wang, X., Zhang G., Tian, Y., Wang, Z. (2010) Mapping QTLs for grain yield and yield components under high and low phosphorus treatments in maize (*Zea mays* L.). *Plant Science*, 178, 454 - 462.

- Ma, Z., Baskin, T.I., Brown, K.M., Lynch, J.P. (2003) Regulation of root elongation under phosphorus stress involves changes in ethylene responsiveness. *Plant Physiology*, 131(3), 1381-1390.
- Machado, C.T.T.; Furlani, A.M.C.; Machado, A. T. (2001) Índices de eficiência de variedades locais e melhoradas de milho ao fósforo. *Bragantia, Campinas*, 60 (3) 225-238.
- Majerowicz, N., Pereira, J.M., Medici, L.O., Bison, O., Pereira, M.B., Santos Júnior, U.M. (2002) Estudo da eficiência de uso do nitrogênio em variedades locais e melhoradas de milho. *Revista Brasileira de Botânica*, 25(02), 129-136.
- Marcante, N.C., Muraoka, T., Bruno, I.P., Camacho, M.A. (2016) Phosphorus uptake and use efficiency of different cotton cultivars in savannah soil (Acrisol). *Acta Scientiarum. Agronomy*, 38(2), 239-247.
- Martins, I. D., Tomaz, M.A., Amaral, J.F.T.,C., Rodrigues, W.N. Colodetti, T.V., Brinate, S.V.B. (2013) Alterações morfológicas em clones de cafeeiro conilon submetidos a níveis de fósforo. *Scientia Plena*, v. 9, p. 1-11.
- Martins, L.D., tomaz, M.A., Amaral, j.F.T., Laviola, B.G., Borcate, M. (2010) Desenvolvimento inicial de mamona e pinhão-mansão em solo submetido a diferentes corretivos e doses de fósforo. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 5, p. 143-150, 2010.
- Mattar, E.P.L., Frade, J., Elízio, F., Oliveira, E. de. (2013) Cinza de osso, fósforo e cálcio para agricultura 1ª ed *Versão digital* ,25 p.
- Mendes, F.F., Guimarães, L.J.M., Souza, J.C., Guimarães, P.E.O., Pacheco, C.A. P., Machado, J.R D.A., Meirelles, W.F., Silva. A.R., Parentoni, S.N. (2012) Adaptability and stability of maize varieties using mixed model methodology. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 12(2), 111-117.

- Mendes, F.F., Guimarães, L.J.M., Souza, J.C., Guimarães, P.E.O., Magalhaes, J, V., Garcia, A.A.F., Parentoni, S.N., Guimaraes, C.A.T. (2014) Genetic Architecture of Phosphorus Use Efficiency in Tropical Maize Cultivated in a Low-P Soil. *Crop Science*, v. 054, p. 1-9.
- Missaoui, A. M. e Young, J. (2016) Genetic gain from selection and potential for improving alfalfa phosphorus uptake and removal from soils heavily amended with poultry litter. *Euphytica*, 1-12.
- Moura, W. D. M., Casali, V.W.D., Cruz,C.D., Lima, P.D. (1999) Divergência genética em linhagens de pimentão em relação à eficiência nutricional de fósforo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34(2), 217-224.
- Moura, W.M., Lima, P.C., Casali, V.W.D., Pereira, P.R.G., Cruz, C.D. (2001) Eficiência nutricional para fósforo em linhagens de pimentão. *Horticultura Brasileira*, 19(3), 306-312.
- Mundim, G.B., Viana, J.M.S., Maia, C. (2013) Early evaluation of popcorn inbred lines for phosphorus use efficiency. *Plant Breeding* 132, 613-619.
- Murrel, T.S., Fixen, P.E. (2006) Improving fertilizer P effectiveness: challenges for the future. In: *Proceedings of 3rd International Symposium on Phosphorus Dynamics in the Soil-Plant Continuum*, Uberlândia, Minas Gerais, Brazil, May 14-19. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, p. 150-151, 2006.
- Nassery, H. (1970) Phosphate absorption by plants from habitats of different phosphate status. *New Phytologist*, v.69, n.1, p.197-203.
- Nehring, R. (2016) Yields of Dreams: Marching West and the Politics of Scientific Knowledge in the *Brazilian Agricultural Research Corporation* (Embrapa).
- Neto, A. P., Favarin, J. L., Hammond, J. P., Tezotto, T., Couto, H. T. (2016) Analysis of Phosphorus Use Efficiency Traits in Coffea Genotypes Reveals

Coffea arabica and *Coffea canephora* Have Contrasting Phosphorus Uptake and Utilization Efficiencies. *Frontiers in Plant Science*, 7.

Nielsen, K.I., Eshel, A., Lynch, J.P. (2010) The effect of phosphorus availability on the carbon economy of contrasting common bean genotypes. *Journal of Experimental Botany*, London, v. 52, p. 329-339.

Novais, R.F., Smyth, T.J. Nunes, F.N. (2007) Fósforo. Fertilidade do solo. Viçosa, MG, *Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, p.471-550.

Novais, R.F. Barros, N.F. (1997) Sustainable agriculture and forestry production systems on acid soils: *Phosphorus as a case-study*. In: Moniz, A.C., Furlani, A.M.C., Schaffert, R.E., Fageria, N.K., Rosolem, C.A., Cantarella, H., eds. *Plant-soil interactions at low pH: Sustainable agriculture and forestry production*. Viçosa, MG, *Brazilian Soil Science Society*, p.39-51.

Oliveira, A.D., Lourenço, S., Goedert, W.J. (1982) Adubação fosfatada no Brasil. Brasília: *Embrapa-DID*.

ONU (2015) *Organização das Nações Unidas*, in: <http://www.onu.org.br/>.

Pacheco, C.A.P.; Gama, E.P.; Guimarães, P.E.O.; Santos, M.X.; Ferreira, A.S. (1998) Estimativas de parâmetros genéticos nas populações CMS-42 e CMS-43 de milho de pipoca. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. v. 33, p.1995-2001.

Parentoni, S. N.; Mendes F. F. ; Guimaraes, L. J. M. . Breeding for phosphorus use efficiency.. In: Fritsche-Neto, R.; Borém, A.. (2012) *Plant breeding for abiotic stress tolerance*.. 1ed.Berlin: *Springer* v. , p. 65-85.

Parentoni, S.N., Mendes, F.F., Guimarães, L.J.M. (2011) Melhoramento para eficiência no uso de P. In: Fritsche-Neto, R., Borém, A. (Ed.) *Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos*. Visconde do Rio Branco: *Suprema*. p. 250-255.

- Parentoni, S.N., De Souza JR., C.L. DE Carvalho Alves, V.M., Gama, E.E.G., Coelho, A.M., De Oliveira, A.C., Guimarães, P.E.O., Guimarães, C.T., Vasconcelos, M.J.V., Patto Pacheco, C.A., Meirelles, W.F., DE Magalhães, J.V., Moreira Guimarães, L.J., Da Silva, A.R., Ferreira Mendes, F., Schaffert, R.E. (2010) Inheritance and breeding strategies for phosphorus efficiency in tropical maize (*Zea Mays* L.). *Maydica*. 55:01-15.
- Parentoni, S.N. (2008) *Estimativas de efeitos gênicos de diversos caracteres relacionados à eficiência e resposta ao fósforo em milho tropical*. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba – SP. 207 p.
- Parentoni, S.N., Souza, C.L. (2008) Phosphorus acquisition and internal utilization efficiency in tropical maize genotypes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 43, n. 7, p. 893-901.
- Paul, E.A., Clark, F.E. (1996) Soil microbiology and biochemistry. 2. ed. *California: Academic Press*. cap. 7, p. 158-179.
- Pereira, M.G., Amaral Junior, A.T. (2001) Estimation of genetic components in popcorn based on the nested design. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, (1): 3-10.
- Perin, A., Guerra, J.G.M., Teixeira, M.G., Pereira, M.G. Fontana, A. (2002) Efeito da cobertura viva com leguminosas herbáceas perenes na agregação de um Argissolo. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:713-720.
- Perry, M.W. D'Antuono, M.F. (1989) Melhoria de rendimento e características associadas de algumas cultivares de trigo de primavera australianos introduzidas entre 1860 e 1982. *Aus. J. Agric. Res.* 40 , 457-472.
- Peters, J. B. (2005) Wisconsin Procedures for Soil Testing, Plant Analysis and Feed & Forage Analysis: *Plant Analysis*.

- Quaggio, J.A., Mattos JR., D. Cantarella, H. (2006) Fruit yield and quality of sweet orange affected by nitrogen, *phosphorus and potassium fertilization in tropical soil*. *Fruits*, 61:293- 302.
- Rao, C.R. (1952) *Advanced Statistical Methods in Biometric Research*. *John Wiley Sons*, New York, 390p.
- Raboy, V. (2001) Seeds for a better future: 'low phytate' grains help to overcome malnutrition and reduce pollution. *Trends in Plant Science*, 6: 458-462.
- Rangel, R.M., Amaral Júnior, A.T., Gonçalves, L.S.A., Freitas Júnior, S.P., Candido, L.S. (2011) Análise biométrica de ganhos por seleção em população de milho-pipoca de quinto ciclo de seleção recorrente. *Revista Ciência Agronômica*, v.42, p.473-481.
- Rangel, R. M. (2009) Análise biométrica na população UENF de milho pipoca sob seleção recorrente (Doctoral dissertation, *Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas)*–Campos dos Goytacazes–RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense–UENF, 104p).
- Ribeiro, R. M., Amaral Junior, A. T., Gonçalves, L., S., A., Candido, L., S. ; SILVA, T. R.C., Pena, G.F. (2012) Genetic progress in the UNB-2U population of popcorn under recurrent selection in Rio de Janeiro, Brazil. *Genetics and Molecular Research*, v. 11, p. 1417-1423.
- Rotili, E.A., Fidelis, R.R., Santos, M.M., Barros, H.B., Pinto, L.C. (2010) Eficiência do uso e resposta à aplicação de fósforo de cultivares de arroz em solos de terras altas. *Bragantia*, Campinas, 69(3), 705-710.
- Rotili, E.A., Fidelis, R.R., dos Santos, M.M., de Castro Neto, M.D., Kichel, E., Cancellier, E. L. (2015) Eficiência no uso de fósforo de variedades de arroz cultivadas em solos de várzea irrigada. *Ceres*, 57(3).

- Santos, F.S., Amaral Junior, A.T., Freitas Junior, S.P., Rangel, M.R., Pereira, M.G. (2007) Predição de ganhos genéticos por índices de seleção na população de milho-pipoca UNB-2U sob seleção recorrente. In: *Bragantia*, Campinas, 66(3):389-396.
- Sawazaki E. (2001) A cultura do milho pipoca no Brasil. *O Agrônomo* 1: 11-13.
- Scott, A.J., Knott, M.A. (1974) Cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. *Biometrics, North Carolina*, v.30, n.3, p.507-12.
- Schenck, M.K., Barber, S.A. (1980) Potassium and phosphorus uptake by corn genotypes grown in the rape field as influenced by root characteristics. *Plant and Soil, the Hague*. v. 54, p. 65-76.
- Shortall, J.G., Liebhardt. W.C. (1975) Yield and growth of corn as affected by poultry manure. *J. Environ. Qual.* 4:186-191.
- Silva, W.J., Vidal, B.C., Martins, M.E.Q., Vargas, H., Pereira, A.C., Zerbetto, M., Miranda, L.C.M. (1993) What makes popcorn pop. *Nature, London*, v. 362, p. 417.
- Silva, D.A.D., Esteves, J.A.D.F., Gonçalves, J.G.R., Azevedo, C.V.G., Ribeiro, T., Chiorato, A.F., Carbonell, S.A.M. (2016) Evaluation of common bean genotypes for phosphorus use efficiency in Eutrophic Oxisol. *Bragantia*, (AHEAD).
- Souza, S.M., Gomes, E.A., Souza, F.A., Vasconcelos, M.J.V. (2010) Importância da morfologia radicular na eficiência da aquisição de fósforo. Sete Lagoas : Embrapa Milho e Sorgo, 33 p. (Documentos / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1518- 4277; 105).
- Souza L.V., Miranda, G.V., Galvão, J.C.C., Eckert, F.R., Mantovani, E.E., Lima, R.O., Guimarães, L.J.M. (2008) Genetic control of grain yield and nitrogen use

efficiency in tropical maize. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 43, p. 1517-1523.

Stangel, P.J. (1984) World nitrogen situation—trends, outlook, and requirements. *Nitrogen in Crop Production*, (nitrogenincropp), 23-54.

Steel, R.G.D., and Torrie, J.H. (1980) Principles and Procedures of Statistics. 2nd ed. New York: McGraw-Hill.

Stevenson, F.J. (1994) Humus Chemistry: genesis, composition, reactions. 2. ed. New York: *John Wiley*, 1994. 496 p.

Taiz, L, Zeiger, E. (2013) Fisiologia vegetal. 5.ed. Porto Alegre: *Artmed*,. 918p.

USDA. USDA Agricultural Projections. Disponível em: <http://www.ers.usda.gov/publications/oce081> . Acesso em: fevereiro de 2016.

Van de Wiel, C.C., van der Linden, C.G., Scholten, O.E. (2016) Improving phosphorus use efficiency in *agriculture: opportunities for breeding*. *Euphytica*, 207(1), 1-22.

Von Pinho, R.G., Brugnera, A., Pacheco, C.A.P., Gomes, M.D.S. (2010) Estabilidade de cultivares de milho-pipoca em diferentes ambientes, no Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 2(01).

Vittorazzi, C., Amaral Jr., A.T., Guimarães, A.G., Viana, A.P., Lima e Silva, F.H., Pena, G.F., Daher, R.F., Pereira, M.P.G. (2016) Indices estimated using reml/blup and introduction of a super-trait for the comparative selection of c8 progenies for recurrent selection in popcorn (*no prelo*). *In Crop Science*.

Wang, X., Shen, J., Liao, H. (2010) Acquisition or utilization, which is more critical for enhancing phosphorus efficiency in modern cropss. *Plant Science*, 179(4), 302-306.

- Wang, Z.C., Liu, J.M., Zhu, A., Li, W.J., Shen, Y.C. (1984) A preliminary study on the biology of the Chinese surf clam (*Macra chinensis*) in Yalu River Estuary. *Journal of Fisheries of China*, 8, 33-44.
- Whiteaker, G., Gerloff, G.C., Gabelman, W.H., Lindgren, D. (1976) Intraspecific differences in growth of beans at stress levels of phosphorus. *J. Am. Soc. Hort. Sci*, 101(4), 472-475.
- Willier, J.G., e Brunson, A.M. (1927) Factors affecting the popping quality of popcorn. *Journal of Agricultural Research*, 35(7), 615-624.
- Wieneke, J. (1990) Phosphorus efficiency and phosphorus remobilization in two sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cultivars. *Plant and Soil*, 123(2), 139-145.
- Yao, Y., Sun, H., Xu, F., Zhang, X., Liu, S. (2011) Comparative proteome analysis of metabolic changes by low phosphorus stress in two *Brassica napus* genotypes. *Planta*, 233, 523–537.
- Yun, S.J., Kaepler, S.M. (2001) Induction of maize acid phosphatase activities under phosphorus starvation. *Plant and Soil*, 237(1), 109-115.
- Zhang, D; Cheng, H; Geng, L; Kan, G; Cui, S; Meng, Q; Gai, J; Yu, D. (2009) Detection of quantitative trait loci for phosphorus deficiency tolerance at soybean seedling stage. *Euphytica*, 167 (3), 313-322.
- Zhu, J Mickelson, S.M., Kaepler, S.M., Lynch, J.P. (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*, Berlin 113 (1) 1-10.