

**GUSTAVO DA SILVEIRA**

**EFICIÊNCIA NUTRICIONAL EM FÓSFORO DE GENÓTIPOS  
DE CANA-DE-AÇÚCAR**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2013

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

S587e  
2013

Silveira, Gustavo da, 1982-

Eficiência nutricional em fósforo de genótipos de  
cana-de-açúcar / Gustavo da Silveira. – Viçosa, MG, 2013.  
vii, 64 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Márcio Henrique Pereira Barbosa.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Cana-de-açúcar - Melhoramento genético. 2. Cana-de-  
açúcar - Nutrição. 3. Absorção. 4. Eficiência. 5. Plantas -  
Efeito do fósforo. I. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Fitotecnia. Programa de Pós-Graduação em  
Genética e Melhoramento. II. Título.


CDD 22. ed. 633.612

GUSTAVO DA SILVEIRA

EFICIÊNCIA NUTRICIONAL EM FÓSFORO DE GENÓTIPOS  
DE CANA-DE-AÇÚCAR

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

APROVADA: 23 de abril de 2013.

  
Júlio César Lima Neves  
(Coorientador)

  
Rogério Faria Vieira

  
Luiz Antônio dos Santos Dias

  
Volmir Kist

  
Márcio Henrique Pereira Barbosa  
(Orientador)

A minha esposa **Clarissa** pelo amor, carinho, paciência e companheirismo durante toda esta etapa.

Aos meus pais **Nauro e Regina** por todo o amor, apoio e incentivo tornando tudo isto possível.

Aos meus irmãos **Roberta, Nauro Jr., Guilherme e Fernando** simplesmente por serem pessoas tão especiais.

**Dedico**

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Márcio Henrique Pereira Barbosa pelo apoio, amizade, ensinamentos e principalmente, por confiar no meu trabalho.

Ao pesquisador Rogério Faria Vieira pela disponibilidade e sugestões para o desenvolvimento do trabalho e também pelo incentivo à realização do meu treinamento no Roots Lab (PSU).

Ao professor Júlio pelos ensinamentos e sugestões na elaboração deste trabalho.

Ao Dr. Lynch por ter me recebido em seu Laboratório na PSU com muita dedicação e ter me proporcionado importantes aprendizados sobre avaliação de raízes.

Aos colegas Paulo Mafra e David Baffa pela amizade, pela ajuda no desenvolvimento dos trabalhos, pelos conhecimentos compartilhados e pelos momentos de descontração.

Ao colega Volmir pela amizade, disponibilidade e contribuições.

Aos estagiários e bolsistas do Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar (PMGCA) Igor, Cleverson, Alexandro, Sabrina e Jiliard pela amizade e grande contribuição nos trabalhos.

A todos os funcionários do CECA pela disponibilidade e ajuda na condução e desenvolvimento dos experimentos.

Aos demais colegas do PMGCA e todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

A Universidade Federal de Viçosa pela estrutura e pelos conhecimentos que aqui adquiridos.

Ao CNPq e CAPES pelo apoio financeiro.

E por fim, agradeço a Deus pelo dom da vida e por ter permitido que tudo isto acontecesse.

## **BIOGRAFIA**

Gustavo da Silveira, filho de Nauro da Silveira e Regina Bosenbecker da Silveira, nasceu em 10 de julho de 1982, em Pelotas (RS). Completou o Ensino Fundamental no Instituto de Educação Assis Brasil, em Pelotas (RS). Coursou o Ensino Médio no Colégio Santa Margarida, em Pelotas (RS) e ingressou, em junho de 2002, no curso de agronomia na Universidade Federal de Pelotas. Foi bolsista de iniciação científica no curso de agronomia de agosto de 2004 a fevereiro de 2007. Cumpriu seu estágio curricular obrigatório na Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola (COODETEC), sob orientação do pesquisador Dr. Volmir Sergio Marchioro, totalizando 540h, requisito para a conclusão do Curso de Agronomia da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM) da Universidade Federal de Pelotas (UFPEl). De 2007 a 2008 realizou seu mestrado em Agronomia na área de concentração em Fitomelhoramento, pelo Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA/FAEM/UFPEL), com orientação do Professor Dr. Fernando Irajá Félix de Carvalho. Em Março de 2009 ingressou no Doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento da Universidade Federal de Viçosa (PPGGM/UFV), tendo como orientador o Professor Dr. Márcio Henrique Pereira Barbosa. No ano de 2012 fez um estágio de cinco meses na Pennsylvania State University no “Root Lab” com orientação do Dr. Jonathan Lynch. Durante sua vida acadêmica, na qualidade de autoria ou coautoria publicou muitos resumos e 18 artigos científicos em periódicos.

# SUMÁRIO

RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	vii
1. Introdução Geral.....	1
1.1. Referências Bibliográficas.....	4
2. Eficiência de uso do fósforo em genótipos de cana-de-açúcar em resposta à sua disponibilidade no solo .....	7
2.1. Introdução.....	7
2.2. Material e Métodos.....	9
2.3. Resultados e Discussão.....	15
2.3.1. Classificação dos genótipos quanto à eficiência de produção de massa seca e responsividade à aplicação de P.....	16
2.3.2. Caracteres relacionados à eficiência de uso do P .....	19
2.3.2.1. Acúmulo de P nas plantas .....	19
2.3.2.2. Sistema radical e eficiência de absorção .....	22
2.3.2.3. Eficiência de utilização do P.....	26
2.4. Conclusões.....	29
2.5. Referências Bibliográficas.....	29
3. Efeitos da disponibilidade de fósforo em caracteres morfológicos e fisiológicos em cana-de-açúcar.....	33
3.1. Introdução.....	33
3.2. Material e Métodos.....	35
3.3. Resultados e Discussão.....	41
3.3.1. Massa da parte aérea seca e massa das raízes secas em resposta à disponibilidade de P no solo .....	42
3.3.2. Análise de Trilha na identificação dos caracteres relacionados à tolerância à baixa disponibilidade de P no solo .....	45
3.3.3. Eficiência de Absorção de P .....	46
3.3.4. Sistema radical: morfologia de raízes .....	48
3.3.4. Sistema radical: pelos radicais .....	51
3.3.5. Caráter morfológico e fisiológico da biomassa aérea .....	53
3.4. Conclusões.....	56
3.5. Referências Bibliográficas.....	56
4. Considerações Finais.....	63

## RESUMO

SILVEIRA, Gustavo da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Abril de 2013. **Eficiência nutricional em fósforo de genótipos de cana-de-açúcar.** Orientador: Márcio Henrique Pereira Barbosa. Coorientadores: Júlio César Lima Neves e Luiz Alexandre Peternelli.

A baixa disponibilidade de P em muitos solos de regiões tropicais é um dos principais fatores que limitam a produção agrícola. A aplicação de fertilizantes fosfatados é a maneira convencional para suprir a deficiência de P do solo, mas muitas vezes é ineficaz, pois o P fornecido pode ligar-se às frações do solo tornando-se indisponível para as plantas. Portanto, a melhoria da eficiência no uso do P pelas plantas é o método mais viável, menos oneroso e ambientalmente mais seguro. Este trabalho foi desenvolvido em duas partes. Na primeira objetivou-se identificar a existência de variabilidade genética em cana-de-açúcar para eficiência no uso de P, especificamente quanto à eficiência de absorção de P (EAP) e à eficiência de utilização de P (EUP). Para isto, conduziu-se um experimento em casa de vegetação em vasos de 30 L, durante um período de oito meses, com 23 genótipos e duas doses contrastantes de P (alto e baixo P). Foi possível identificar variabilidade para ambos os caracteres e agrupar os genótipos quanto à sua eficiência de absorção e utilização. Em condição de baixa disponibilidade de P, a EAP mostrou-se mais eficaz na discriminação dos genótipos. Em contrapartida, a EUP destacou-se em condição de alta disponibilidade. A segunda parte objetivou identificar caracteres morfológicos e fisiológicos da cana-de-açúcar relacionados à eficiência no uso do P. Foi conduzido um experimento com 19 genótipos em casa de vegetação por um período de três meses. Foram utilizados vasos de 9L com substrato e duas doses de P, alta e baixa. Os caracteres avaliados foram: área foliar, matéria seca da parte aérea, comprimento radical de três classes de raízes, pelos radicais, massa das raízes secas e taxa fotossintética. Observou-se variabilidade genética para todos os caracteres avaliados e estes responderam de forma diferenciada à disponibilidade de P no solo. Raízes finas e área foliar foram os caracteres que apresentaram maior relação com a tolerância ao estresse por baixo P. Concluiu-se que existe variabilidade genética em cana-de-açúcar na eficiência de uso do P. Logo, é possível selecionar genótipos tolerantes à baixa disponibilidade do nutriente e também que apresentam maior resposta produtiva com o seu incremento. A utilização de caracteres radicais pode ser promissora na seleção de genótipos superiores no uso do P.

## ABSTRACT

SILVEIRA, Gustavo da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April 2013. **Nutritional efficiency of phosphorus in sugarcane genotypes.** Adviser: Márcio Henrique Pereira Barbosa. Co-advisers: Júlio César Lima Neves and Luiz Alexandre Peternelli.

Low P availability is one of the major factors limiting crop production in tropical areas. Phosphate fertilizer application is the conventional method to alleviate P deficiency in the soil, but it is often inefficient because the P supplied can bind to soil particles and become unavailable to plants. Therefore, the improvement of P efficiency in crops would be more efficient, less expensive and environmentally safer. This work was developed considering these and involved two experiments. First, we attempted to identify genetic variability in sugarcane for P efficiency, taking into account P acquisition efficiency (PAE) and P utilization efficiency (PUE). Twenty-three sugarcane genotypes were cultivated in a greenhouse in 30 L pots with two P levels, high-P and low-P, for eight months. It was possible to identify genetic variation for PAE and PUE and measure the genotypes' performance as affected by these traits. In low P availability, PAE was more effective in discriminating among the genotypes. However, PUE was more effective in high P availability. The second experiment aimed to identify morphological and physiological sugarcane traits related to P-efficiency and was conducted in a greenhouse for three months. Nineteen sugarcane genotypes were cultivated in 9 L pots with two P levels, high-P and low-P. The measured traits were: leaf area, shoot and root dry weight, root length of three classes of roots, root hair, and photosynthetic rate. Genetic variation was detected for all traits. The traits had different effects on performance at high-P or low-P. Fine roots and leaf area were correlated with increased sugarcane performance in the low P condition. We concluded that there is genetic variation in sugarcane for P efficiency. Therefore, it is possible to select genotypes with increased phosphorus acquisition in low P soils, and increased phosphorus utilization efficiency in high P soils. Root traits, especially, may increase P efficiency.

## 1. Introdução Geral

A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) tem grande importância socioeconômica para o Brasil. É cultivada por pequenos, médios e grandes produtores rurais em áreas que totalizam mais de 8,5 milhões de hectares (CONAB, 2012). O país é o maior produtor mundial, com produção estimada em 595 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em 2013.

O Brasil apresenta grande diversidade edafoclimática entre regiões, o que permite a colheita de safras alternadas e a manutenção do mercado de cana-de-açúcar ativo praticamente o ano todo. Além disso, a cana e seus derivados são a segunda principal fonte de energia primária da matriz energética nacional - cerca de 18% da energia gerada no país provém de derivados da cana-de-açúcar (CONAB, 2012).

A RIDESA, Rede Interuniversitária para Desenvolvimento do Setor Sucroenergético do Brasil, é uma das grandes responsáveis por este potencial de produção. O modelo de gestão da rede envolve, entre outros aspectos, a parceria público-privada (Universidades-Usinas) para desenvolvimento de cultivares. Esta parceria tem apresentado resultados muito satisfatórios diante dos investimentos públicos e privados nas pesquisas, o que pode ser comprovado pela larga utilização das cultivares RB pelos produtores, correspondente a aproximadamente 60% da área cultivada com cana-de-açúcar no Brasil (Barbosa et al., 2012).

Apesar da elevada produção bruta de cana moída e do grande esforço dos programas de melhoramento em disponibilizar novas variedades, grande porcentagem dos canaviais apresenta produtividade muito abaixo do seu potencial, com estimativas de 70 t ha<sup>-1</sup> na safra de 2012/2013 (CONAB, 2012). Essa baixa produtividade se deve aos manejos inadequados dos canaviais e também à localização geográfica das regiões canavieiras. Muitos canaviais localizam-se no cerrado, onde os solos, em geral, são

altamente intemperizados, com grau médio a elevado de acidez, níveis tóxicos de alumínio e baixa disponibilidade de nutrientes, principalmente fósforo (P). Trabalhos têm mostrado que o potencial teórico de produção da cana-de-açúcar é de aproximadamente  $380 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (Waclawovsky et al., 2010), o que permite concluir que grande parte do seu potencial produtivo não está sendo completamente explorado, tanto em relação aos fatores genéticos quanto às práticas culturais.

Para alterar este panorama de baixa produtividade duas estratégias imediatas podem ser empregadas: 1) melhoria do ambiente através da aplicação de insumos agrícolas, principalmente nutrientes minerais, o que acarretará em custos de produção mais elevados, e 2) desenvolvimento de cultivares adaptadas e responsivas às regiões produtoras, o que certamente proporcionará maior equilíbrio ambiental devido à redução na utilização de produtos químicos e menor custo.

As variedades cultivadas de cana-de-açúcar são híbridos obtidos por criterioso trabalho de seleção e melhoramento genético entre as espécies conhecidas, fazendo com que características desejáveis sejam agrupadas através de cruzamentos controlados (Martins, 2004). Apesar do grande potencial apresentado pela RIDESA no desenvolvimento de novas cultivares, ainda existe uma carência no desenvolvimento de estratégias de melhoramento direcionadas para condições específicas, como as condições de estresse abiótico. Segundo Lynch (2012), a seca e a baixa fertilidade dos solos, agravada pela sua degradação, são os principais fatores que contribuem para restrição dos rendimentos das culturas, principalmente pelos pequenos produtores que possuem acesso limitado aos fertilizantes e irrigação.

Entre os nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas, o fósforo (P) é frequentemente limitante na maioria dos solos brasileiros. Desta forma, sua aplicação torna-se imprescindível para a obtenção de níveis adequados de produção. No entanto,

Vance e Chiou (2011) salientam que o P de rochas mineralizadas, que fornece cerca de 90% dos fertilizantes fosfatados utilizados na agricultura, pode ter seu pico de disponibilidade até 2030, em decorrência de sua aplicação continuada, resultando em custos de produção mais elevados principalmente em países em desenvolvimento.

Com isso, a utilização mais sustentável e equitativa do P e o desenvolvimento de plantas cultivadas eficientes no uso desse nutriente é uma necessidade para a sustentabilidade da agricultura (Bouwman et al. 2009, Cordell et al 2009, Richardson et al. 2011). Como os trabalhos sobre cana-de-açúcar *versus* eficiência de uso do P ainda são escassos, torna-se de extrema importância elucidar os mecanismos que aumentam a eficiência desta cultura à baixa disponibilidade do nutriente no solo.

Existem várias definições e discussões sobre como quantificar a eficiência do fósforo nas plantas. Alguns pesquisadores descrevem que a eficiência de uso do P corresponde à habilidade das plantas produzirem biomassa ou rendimento sobre determinada concentração de P disponível (Batten, 1992; Wissuwa et al., 2009; Wang et al., 2010). A eficiência de uso do P pode ser dividida em eficiência de aquisição (EAP) e eficiência de utilização de P (EUP). A EAP se refere à habilidade das plantas em absorver elemento do solo, enquanto a EUP é a habilidade para produção de biomassa usando o P absorvido. A contribuição da EAP e da EUP varia com a espécie e com as condições ambientais (Wang et al., 2010), porém o aumento da eficiência de uso do P pode ser alcançado melhorando-se a absorção e/ou utilização do nutriente (Manske et al., 2001; Parentoni e Júnior, 2008).

Vários caracteres morfológicos, fisiológicos e bioquímicos estão envolvidos na eficiência do uso de P nas culturas. Estes podem ser divididos em duas categorias quanto à importância em relação ao tipo de eficiência dos genótipos. Em relação à EAP, podem-se destacar como caracteres principais a morfologia do sistema radical e a

arquitetura das raízes e, como caracteres secundários, as simbioses radicais, os transportadores de Pi e os exsudados radicais. Para a EUP, têm-se como caracteres principais a retranslocação do P na planta, os transportadores de Pi e a atividade de fosfatases e, como caracteres secundários, a liberação do Pi vacuolar e as vias bioquímicas alternativas (Wang et al., 2010).

Segundo Vance et al. (2003), estratégias para melhorar a aquisição e utilização do P envolvem tanto o melhoramento tradicional como a biotecnologia, através de uma abordagem que depende de: (1) identificação de características ou genes que afetam potencialmente a aquisição e/ou a utilização do P; (2) identificação ou geração de variabilidade genética suficiente para os caracteres de interesse dentro do banco de germoplasma e (3) introgressão dos caracteres em genótipos superiores.

Neste contexto, a quantificação da variabilidade genética entre os genótipos de cana-de-açúcar em resposta ao estresse causado pelo fósforo e a avaliação de caracteres que podem ser utilizados pelos programas de melhoramento para a seleção de genótipos superiores na eficiência de uso do fósforo é fundamental. Sabendo que em cana-de-açúcar os estudos sobre a eficiência ao P ainda são pouco elucidados, a geração dessas informações é objetivo deste trabalho.

## **1.1. Referências Bibliográficas**

Barbosa, M.H.P.; Resende, M.D.V.R.; Dias, L.A.S.; Barbosa, G.V.S.; Oliveira, R.A.;

Paternelli, L.A.; Daros, E. Genetic improvement of sugar cane for bioenergy: the Brazilian experience in network research with RIDESA. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 2:87-98, 2012.

Batten, G.D. A review of phosphorus efficiency in wheat, *Plant Soil*, 146:163-168, 1992.

- Bouwman, A.F.; Beusen, A.H.W.; Billen, G. Human alteration of the global nitrogen and phosphorus soil balances for the period 1970-2050. *Global Biogeochem Cycles* 23: GB0A04. doi:10.1029/2009GB003576, 2009.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. 3º Levantamento da Cana-de-Açúcar Dez/2012. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. – Brasília: Mapa/ACS, 2012.
- Cordell, D.; Drangert, J.O.; White, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environ Chang*, 19:292-305, 2009.
- Landell, M.G.A.; Pinto, L.R.; Creste, S.; Xavier, M.A.; Anjos, I.A.; Vasconcelos, A.C.; Bidóia, M.A.P.; Silva, D.N.; Silva, M.A. Seleção de novas variedades de cana-de-açúcar e seu manejo de produção. *Informações Agronômicas (Encarte Técnico)*, Piracicaba, 110:18-24, 2005.
- Lynch, J.P.; Brown, K.M. New roots for agriculture: exploiting the root phenome. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 367:1598-1604, 2012.
- Manske, G.G.B.; Ortiz-Monasterio, J.I.; Ginkel, M.; González, R.M.; Fischer, R.A.; Rajaram, S.; Vlek, P.L.G Importance of P uptake efficiency versus P utilization for wheat yield in acid and calcareous soils in Mexico, *European Journal of Agronomy*, 14:261-274, 2001.
- Richardson, A.E.; Lynch, J.P.; Ryan, P.R.; Delhaize, E.; Smith, F.A.; Smith, S.E.; Harvey, P.R.; Ryan, M.H.; Veneklaas, E.J.; Lambers, H.; Oberson, A.; Culvenor, R.A.; Simpson, R.J. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. *Plant Soil*, 349:121-156, 2011.
- Vance, C.P., Uhde-Stone, C., Allan, D.L. Phosphorus acquisition and use, critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 157:423–447, 2003.

Vance, C.P. e Chiou, T.J. Phosphorus Focus Editorial. *Plant Physiology*, 156:987-988, 2011.

Wang, X.; Shen, J.; Liao, H. Acquisition or utilization, which is more critical for enhancing phosphorus efficiency in modern crops? *Plant Science*, 179:302-306, 2010.

Wissuwa, M.; Mazzola, M.; Picard, C. Novel approaches in plant breeding for rhizosphere-related traits, *Plant Soil*, 321:409-430, 2009.

Waclawovsky, A.J.; Sato, P.M.; Lembke, C.G.; Moore, P.H.; Souza, G.M. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. *Plant Biotechnology Journal*, 8:263-276, 2010.

## **2. Eficiência de uso do fósforo em genótipos de cana-de-açúcar em resposta à sua disponibilidade no solo**

### **2.1. Introdução**

Quando insumos são relativamente baratos e facilmente disponíveis, é comum que se altere o ambiente para adequá-lo às necessidades das plantas, principalmente através de adubação química. A chamada agricultura sustentável, com menor consumo energético e ecologicamente correta, tem mudado este enfoque para o desenvolvimento de materiais genéticos tolerantes a ambientes com reduzida disponibilidade de nutrientes, ou seja, que apresentem produtividade satisfatória em condições de estresse. Sanches e Salinas (1981) referiram-se ao conceito “low input soil management technology”, utilizado principalmente nas regiões tropicais, como sendo aquele que busca associar cultivares mais adaptadas aos ambientes tropicais e que sejam capazes de atingir níveis razoáveis de produção (não necessariamente a máxima), com um mínimo de fertilizantes.

Segundo dados da FAO (2011), há uma expectativa de crescimento populacional de 35% até 2050, o que certamente vai acarretar em utilização de novas áreas agrícolas para produção de alimentos e, em maior escala, para produção de energia renovável (Godfray et al., 2010). No entanto, muitas destas áreas não apresentam condições ideais para o cultivo agrícola, apresentando principalmente baixa fertilidade dos solos, o que provocará um aumento na utilização de insumos, tornando as produções mais onerosas e trazendo problemas ambientais.

Dentre os nutrientes utilizados na agricultura, o fósforo (P) é essencial para o desenvolvimento das plantas. Este nutriente é fundamental em muitos processos metabólicos, tais como: transferência de energia, transdução de sinais, biossíntese de macromoléculas, fotossíntese, respiração, etc. A disponibilidade de P determina o

crescimento da planta e níveis subótimos deste nutriente podem levar a perdas na ordem de 5% a 15% dos rendimentos máximos (Shenoy e Kalagudi, 2005). A deficiência de P é mais crítica em solos de regiões tropicais e subtropicais e tem sido considerada uma das principais limitações da produção agrícola (Hinsinger, 2001).

A cultura da cana-de-açúcar tem apresentado expressiva expansão de sua área de cultivo no Brasil. Estimativas da safra 2012/13 ultrapassam 8,4 milhões de hectares plantados, um aumento de aproximadamente 2% em relação à safra passada (CONAB, 2013). Esse crescimento considerável nas áreas canavieiras compreende muitas regiões marginais, como o cerrado e as áreas de pastagens degradadas, caracterizadas em sua maioria, por solos intemperizados e de baixa fertilidade, principalmente com baixos teores de P.

Sendo o P um recurso mineral não renovável, onde as estimativas de reservas passíveis de exploração a baixos custos deverão se esgotar ainda este século, se ele continuar sendo utilizado no patamar atual (Murrel e Fixen, 2006), a obtenção de cultivares mais adaptadas aos ambientes com baixos níveis desse nutriente no solo, ou capazes de utilizar de maneira mais eficiente o fertilizante aplicado, seria então uma alternativa economicamente desejável, ambientalmente segura e socialmente adequada.

Para atingir este propósito, é necessário utilizar metodologias capazes de identificar genótipos contrastantes quanto à eficiência de uso de P. Existem várias definições e métodos para calcular a eficiência nutricional em P nas culturas. Uma dessas definições refere-se à capacidade das plantas produzirem biomassa ou grãos em determinadas condições de disponibilidade de P (Batten, 1992; Lynch, 1998; Wissuwa, 2009). A eficiência no uso de P pode ser dividida em eficiência de aquisição de P (EAP), que se refere à capacidade das plantas em absorver o P do solo, e eficiência de

utilização de P (EUP), que se refere à capacidade das plantas em produzir biomassa ou grãos utilizando o P absorvido (Wang, 2010).

Outro conceito importante refere-se à responsividade dos genótipos, isto é, a resposta dos genótipos à produção de biomassa ou ao rendimento de grãos com a aplicação do nutriente. Segundo Hammond et al. (2009), estratégias atuais de melhoramento permitem selecionar genótipos com elevadas respostas à aplicação de P. No entanto, não permitem selecionar para eficiência no uso de P. Isto se deve ao fato de que os programas de melhoramento utilizam, em sua maioria, condições ideais para o desenvolvimento das plantas. Desta forma, se o objetivo for selecionar genótipos superiores na eficiência de uso de P e/ou genótipos eficientes e responsivos, os melhoristas terão que utilizar estratégias alternativas em seus programas. Uma alternativa para contornar este problema é a utilização de ambientes contrastantes na disponibilidade de P de forma a possibilitar a identificação do comportamento dos genótipos nestes ambientes.

Diante do exposto, este trabalho teve por objetivos: 1) avaliar a variabilidade genética em cana-de-açúcar para as variáveis relacionadas à eficiência no uso de P; 2) identificar as variáveis mais importante na seleção de genótipos eficientes em baixa disponibilidade de P e quais são mais importante na seleção de genótipos responsivos à aplicação de P.

## **2.2. Material e Métodos**

### *Experimento Preliminar*

Para determinação das doses de P a serem utilizadas no experimento, foi realizado um estudo prévio em casa-de-vegetação segundo metodologia de Alvarez et al. (2000). A curva de resposta à aplicação de P foi obtida com as doses 20, 60, 120,

180, 240 e 300 mg de P dm<sup>-3</sup> de solo e três genótipos de cana-de-açúcar, RB937570, RB867515 e RB855536. As doses selecionadas foram: i) alta disponibilidade de P (alto P): que proporcionou a maior produção de parte aérea seca; ii) baixa disponibilidade de P (baixo P): que reduziu em aproximadamente 50% a produção da parte aérea seca. Portanto utilizou-se 20 mg dm<sup>-3</sup> de P para baixo P e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P para alto P. Essas doses foram aplicadas uma semana antes do plantio das mudas tendo como fonte o superfosfato triplo.

### *Experimento Principal*

O experimento foi conduzido no Centro de Pesquisa e Melhoramento da Cana-de-açúcar (CECA) da Universidade Federal de Viçosa, localizado em Oratórios – MG (latitude 20°25’S, longitude 42°48’W e 494m de altitude).

O ensaio foi realizado em casa de vegetação, com genótipos pertencentes ao Banco de Germoplasma do Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar PMGCA-UFV/RIDESA (Tabela 1).

**Tabela 1** - Genótipos de cana-de-açúcar utilizados no experimento e respectivos genitores

<b>Genótipos</b>	Genitor ♀	Genitor ♂	<b>Genótipos</b>	Genitor ♀	Genitor ♂
<b>RB008041</b>	SP84-2025	SP80-3280	<b>RB957610</b>	RB83102	?
<b>RB008340</b>	SP80-3280	?	<b>RB962962</b>	R327	?
<b>RB027053</b>	SP85-3877	RB855536	<b>RB965902</b>	RB855536	RB855453
<b>RB72454</b>	CP53-76	?	<b>RB966928</b>	RB855156	RB815690
<b>RB855156</b>	RB72454	TUC71-7	<b>RB977514</b>	SP80-1842	?
<b>RB855536</b>	SP70-1143	RB72454	<b>RB987917</b>	RB72454	CB45-3
<b>RB867515</b>	RB72454	?	<b>RB987935</b>	RB72454	RB83102
<b>RB925486</b>	RB855511	?	<b>RB988082</b>	RB83102	RB72454
<b>RB92579</b>	RB75126	RB72199	<b>RB99395</b>	RB867515	?
<b>RB928064</b>	SP70-1143	?	<b>SP80-1842</b>	SP71-1088	H57-5028
<b>RB93509</b>	RB72454	?	<b>SP81-3250</b>	CP70-1547	SP71-1279
<b>RB947520</b>	RB72454	SP70-1143			

? Genitor masculino desconhecido

Os tratamentos foram arrançados no esquema fatorial 2 (doses de P) x 23 (genótipos) e o delineamento adotado foi o de blocos completos casualizados com quatro repetições. A unidade experimental foi constituída por um vaso de 30 litros com uma planta, totalizando 184 vasos.

#### *Preparo do substrato e aplicação dos nutrientes*

O substrato utilizado (Tabela 2) foi composto de solo seco peneirado (peneira com malha de 4 mm) e areia lavada na proporção de 1:1. Foi aplicado calcário dolomítico na concentração de 2,5 g dm<sup>-3</sup> e em seguida submeteu-se o substrato a um período de incubação de 30 dias.

Os macros e micronutrientes fornecidos foram: 250 mg dm<sup>-3</sup> de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 150 mg dm<sup>-3</sup> de kcl, 80,0 mg dm<sup>-3</sup> S de (MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O, ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O, CuSO<sub>4</sub>), 0,81 mg dm<sup>-3</sup> de B (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>), 1,33 mg dm<sup>-3</sup> de Cu (CuSO<sub>4</sub>), 3,66 mg dm<sup>-3</sup> de Mn (MnCl<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O), 0,15 mg dm<sup>-3</sup> de Mo [(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>.4H<sub>2</sub>O)] e 4,0 mg dm<sup>-3</sup> de Zn (ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O).

**Tabela 2** – Análise química do substrato utilizado no experimento

pH	P	K	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Al <sup>+3</sup>	H+Al	SB	CTC (t)	CTC (T)
H <sub>2</sub> O	----- mg dm <sup>-3</sup> -----	-----	-----	-----	-----	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	-----	-----	-----
6,3	4,1	23	2,0	0,4	0,0	1,32	2,46	2,46	3,78

V	m	MO	P-rem	Zn	Fe	Mn	Cu	B
----- % -----	-----	dag kg <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	-----	-----	mg dm <sup>-3</sup> -----	-----	-----
65	0	1,9	41,1	1,6	249,3	67,0	1,0	0,2

\* Substrato: solo e areia (1:1). Extratores químicos utilizados: 1) para P, Na, K, Fe, Zn, Mn e Cu: Mehlich; 2) para Ca, Mg e Al: KCl 1,0M; 3) para H + Al: acetato de cálcio 0,5M a pH 7,0.

#### *Preparo das mudas e condução do experimento*

Partes de colmos de 3 cm com gemas dos genótipos (toletes) de cana-de-açúcar, foram plantados em bandeja contendo vermiculita (Figura 1), em agosto de 2011. Após

o período de incubação do solo, as plântulas mais vigorosas e homogêneas foram transplantadas para vasos (Figura 2). Durante o ensaio, o teor de água do solo foi mantido entre 60 e 80% da capacidade máxima de retenção por meio de um sistema de irrigação por gotejamento.



**Figura 1** – Corte e plantio dos toletes dos genótipos de cana-de-açúcar nas bandejas



**Figura 2** – Obtenção das mudas para plantio nos vasos e condução do experimento em casa-de-vegetação

### *Caracteres avaliados*

Após plantio para os vasos, as plantas perfilharam e se desenvolveram por sete meses até sua colheita, que ocorreu em março de 2012. No momento da colheita os colmos e as folhas (parte aérea) foram separados do sistema radical para mensuração da matéria fresca de cada parte da planta. Para obtenção das raízes, estas foram lavadas em água corrente com o auxílio de uma peneira para evitar perdas de tecido radical. Os

colmos e as folhas foram passados, separadamente, em uma forrageira elétrica. Após a cana triturada ser homogeneizada, uma amostra de 200 g dos colmos, folhas e raízes, foi seca em estufa com ventilação forçada a 70°C até atingir peso constante, para determinação dos seguintes caracteres:

- 1) Massa dos colmos secos (MCS) em  $\text{g planta}^{-1}$ ;
- 2) Massa das folhas secas (MFS) em  $\text{g planta}^{-1}$ ;
- 3) Massa da parte aérea seca (MAS), derivada da soma da MCS e MFS, em  $\text{g planta}^{-1}$ ;
- 4) Massa das raízes secas (MRS), em  $\text{g planta}^{-1}$ .

Amostras da massa seca dos colmos, folhas e raízes foram moídas e submetidas à análise do teor de P, colorimetricamente, através do método descrito por Braga e Defelipo (1974). Os caracteres relacionados à produção de massa seca e o conteúdo de P foram utilizados para derivar as seguintes medidas adicionais relacionadas à eficiência de absorção e utilização de P nas plantas:

- 5) Eficiência de Absorção de P (EAP), estimada de duas maneiras:
  - Índice de recuperação de P (IRP),  $\text{mg de P na planta g}^{-1}$  de P aplicado;
  - Razão de eficiência radical (RER),  $\text{mg de P na planta g}^{-1}$  MRS;
- 6) Acúmulo de P nos colmos (ACPC), nas folhas (ACPF) e raízes (ACPR), em mg;
- 7) Eficiência de utilização de P nos colmos (EUPC):  $\text{g}^2 \text{mg}^{-1}$ ;
- 8) Eficiência de utilização de P na parte aérea (EUPA):  $\text{g}^2 \text{mg}^{-1}$ ;

Os índices de EUPC e EUPA foram definidos como a razão entre a produção de matéria seca ao quadrado e a concentração de P, considerando os dados de colmos e parte aérea, respectivamente (Siddiqi e Glass, 1981).

Os dados da avaliação fenotípica foram submetidos à análise de variância (Tabela 3), segundo o modelo estatístico:

$$Y_{ijk} = m + B_k + G_i + P_j + GP_{ij} + E_{ijk}$$

onde;

m = média geral;

B<sub>k</sub> = efeito do bloco

G<sub>i</sub> = efeito do genótipo; considerado como fixo;

P<sub>j</sub> = efeito devido à dose de fósforo; considerado como fixo;

GP<sub>ij</sub> = efeito de interação genótipo x dose de P;

E<sub>ijk</sub> = erro aleatório;

**Tabela 3** - Esquema da análise de variância para o modelo fixo, em arranjo fatorial no delineamento de blocos casualizados

Fonte de Variação	GL	E(QM)	F
Bloco	3	$\sigma^2 + g\sigma_b^2$	
Genótipo (G)	22	$\sigma^2 + pr\phi_g$	QMG/QMR
Fósforo (P)	1	$\sigma^2 + gr\phi_p$	QMP/QMR
G x P	22	$\sigma^2 + r\phi_{gp}$	QMGP/QMR
Resíduo	135	$\sigma^2$	
Total	183		

$$\phi_g = \frac{\sum g_i^2}{I-1}, \phi_p = \frac{\sum p_j^2}{J-1}, \phi_{gp} = \frac{\sum (gp)_{ij}^2}{(I-1)(J-1)}$$

Diante da significância da interação G x P, foi realizado o desdobramento dos genótipos dentro de cada dose de P. As médias das variáveis foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Em seguida, foi realizada a correlação de Pearson. As análises estatísticas foram efetuadas com auxílio do *software* Genes (Cruz, 2006).

### 2.3. Resultados e Discussão

Os níveis de fósforo afetaram os caracteres com intensidade diferenciada, o que pode ser observado através dos efeitos significativos na interação G x P. Foi significativo também, o efeito de genótipos sobre todos os caracteres, demonstrando a existência de variabilidade genética. Quanto à precisão experimental, pode-se verificar que os coeficientes de variação apresentaram, em média, reduzida magnitude, variando de 6,9% para razão de eficiência radical (RER) até 14,4% para eficiência de utilização de P na parte aérea (EUPA) (Tabela 4).

**Tabela 4** - Resumo da análise de variância dos efeitos de genótipos e níveis de P e da interação entre esses fatores em 23 genótipos de cana-de-açúcar em dois níveis de P

FV	GL	QM					
		MPAS	MCS	MFS	MRS	IRP	RER
Bloco	3	6905	16626	14716	168	609	3,2
Genótipo (G)	22	75046*	36305*	14078*	538*	80520*	9,1*
Fósforo (P)	1	1725170*	793919*	178490*	5937*	17620054*	288*
G x P	22	51192*	20499*	8337*	166*	63763*	3,4*
Resíduo	135	5236	3851	1640	105	1372	0,9
CV (%)		8,6	11,6	13,2	12,0	6,9	12,0

FV	GL	ACPC	ACPF	ACPR	EUPC	EUPA
Bloco	3	3281	12913	115	35904	24685
Genótipo (G)	22	16467*	22344*	125*	298776*	268590*
Fósforo (P)	1	1200564*	672463*	3497*	388965*	26659*
G x P	22	3146*	10409*	84*	199714*	190781*
Resíduo	135	1259	1353	15	16994	29040
CV (%)		12,4	11,5	9,7	12,4	14,4

\* = significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. Caracteres: massa da parte aérea seca (MPAS); massa dos colmos secos (MCS); massa das folhas secas (MFS); massa das raízes secas (MRS); índice de recuperação de P (IRP); razão de eficiência radical (RER); acúmulo de P nos colmos (ACPC); acúmulo de P nas folhas (ACPF); acúmulo de P nas raízes (ACPR); eficiência de utilização de P nos colmos (EUPC); eficiência de utilização de P na parte aérea (EUPA)

### **2.3.1. Classificação dos genótipos quanto à eficiência de produção de massa seca e responsividade à aplicação de P**

Comparações da massa da parte aérea seca (MAS) e massa dos colmos seca (MCS) foram inicialmente utilizadas para classificar os genótipos quanto à sua eficiência na produção de massa seca em baixa disponibilidade de P no solo, isto é, identificar aqueles genótipos mais ou menos tolerantes ao baixo P e também suas respostas ao aumento da disponibilidade de P no solo.

A utilização da variável colmos secos como critério de seleção deve-se ao fato de se tratar do principal produto de interesse na cana-de-açúcar, de onde é extraído o caldo para produção de etanol e açúcar. No entanto, com o advento de novas tecnologias, como produção de etanol celulósico (etanol de segunda geração), processo no qual será utilizado também o bagaço e as folhas de cana como matéria-prima na produção de etanol (Somerville et al., 2010), o conhecimento sobre a contribuição de cada parte da planta na produção de álcool é essencial para definição das partes da planta a serem melhoradas.

Em baixo P, formaram-se cinco grupos de massa da parte aérea seca e quatro de massa dos colmos secos e massa das folhas secas (MFS) (Tabela 5). Os genótipos RB008041, RB72454, RB92579 e SP80-1842 ficaram no grupo dos com maior MAS. Desses quatro, o RB008041 apresentou relativamente maior MFS. O RB957610 apresentou menor MAS que os outros genótipos, em razão, principalmente, da pequena MCS. Em seguida, também com baixa MAS, vieram os genótipos RB965902, RB966928, RB987935 e RB99395, com MSF semelhante à do genótipo RB967510.

Com alto P, houve significativo acréscimo na produção de massa da parte aérea seca, isto é, tanto de colmos como de folhas. Entretanto, ocorreu redução na variabilidade entre os genótipos, o que pode ser comprovado pela diminuição no

número de grupos formados para o caráter MAS. Essa diminuição da variabilidade pode ser considerada esperada, uma vez que as diferenças genotípicas tendem a ser expressas em decorrência da condição de estresse, pois o potencial genético de cada material responde de maneira mais diferenciada em condições não adequadas de suprimento nutricional. Lana et al. (2006) também verificaram que linhagens de feijão crescidas sob fornecimento insuficiente de P apresentam diferenças na produção de , em contraste às taxas de crescimento similares sob fornecimento adequado de P.

**Tabela 5** - Médias da massa da parte aérea seca (MAS), massa dos colmos secos (MCS) e massa das folhas secas (MFS) em 23 genótipos de cana-de-açúcar em dois níveis de fósforo

Genótipos	Baixo P			Alto P		
	MAS	MCS	MFS	MAS	MCS	MFS
	----- g planta <sup>-1</sup> -----					
RB008041	1001 a	595 a	406 a	1039 b	626 b	413 a
RB008340	687 c	413 c	274 c	834 c	552 c	282 c
RB027053	857 b	519 b	338 b	959 b	586 c	373 b
RB72454	908 a	573 a	336 b	985 b	643 b	342 b
RB835486	717 c	454 c	263 c	833 c	481 d	352 b
RB855156	724 c	467 b	258 c	915 b	583 c	332 b
RB855536	792 b	467 b	325 b	926 b	575 c	351 b
RB867515	796 b	505 b	291 b	1074 b	695 b	354 b
RB92579	882 a	551 a	332 b	955 b	621 b	334 b
RB928064	725 c	428 c	297 b	941 b	586 c	355 b
RB93509	619 d	362 c	258 c	933 b	575 c	359 b
RB947520	816 b	527 b	289 b	1013 b	643 b	370 b
RB957610	447 e	241 d	206 d	714 c	427 d	288 c
RB962962	813 b	559 a	254 c	1008 b	671 b	337 b
RB965902	625 d	404 c	221 d	1000 b	655 b	345 b
RB966928	606 d	435 c	171 d	942 b	626 b	316 c
RB977514	769 b	520 b	250 c	873 c	602 b	271 c
RB987917	713 c	477 b	236 c	748 c	519 c	229 c
RB987935	581 d	398 c	184 d	842 c	536 c	305 c
RB988082	777 b	444 c	333 b	835 c	518 c	316 c
RB99395	544 d	356 c	188 d	1309 a	852 a	458 a
SP80-1842	912 a	593 a	319 b	934 b	610 b	324 c
SP81-3250	797 b	496 b	301 b	976 b	623 b	354 b
Média	744	469	275	939	600	337
CV (%)	11,6	13,7	11,5	10,3	9,8	12,8

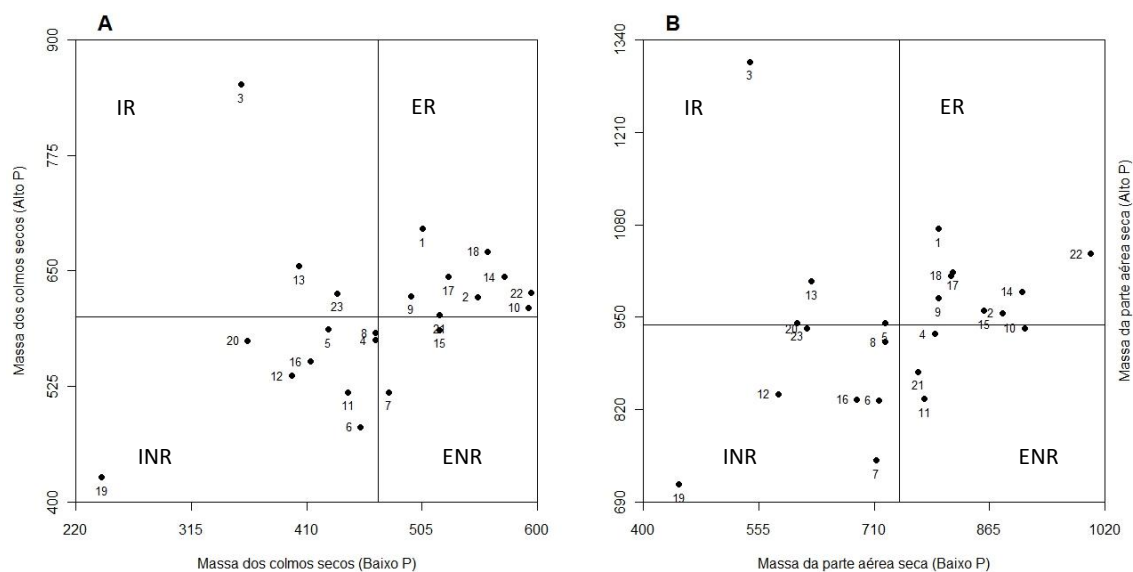
Valores seguidos pela mesma letra na coluna pertencem ao mesmo agrupamento de médias pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Baixo P = 20 mg dm<sup>-3</sup>; Alto P = 120 mg dm<sup>-3</sup>.

Em alto P, o genótipo RB99395 apresentou a maior MAS, com destaque para sua produção de MCS (Tabela 5). Os genótipos RB008041, RB72454, RB92579 e SP80-1842 também se destacaram em alto P, especialmente o RB008041. O genótipo RB957610 repetiu o baixo desempenho que teve em BP.

As diferenças significativas entre médias de MAS e formação de cinco grupos em condição de baixa disponibilidade de P favorece a identificação de indivíduos tolerantes ao estresse nutricional, pois mostra que genótipos com capacidade produtiva semelhante, em adequada disponibilidade do nutriente, variam amplamente em solos com suprimento deficiente. Essa condição é desejável para a seleção dos genótipos tolerantes ao baixo P no solo (Buso e Bliss, 1988; Oliveira et al., 1999).

De acordo com os resultados obtidos, os genótipos foram classificados em quatro grupos quanto à eficiência de produção de MCS e MAS e responsividade à aplicação de P (Figura 3): i) eficientes responsivos (ER), com alta produção de massa seca em baixo P e resposta à adubação com P; ii) ineficientes responsivos (IR), com baixa produção de massa seca em baixo P e resposta à adubação com P; eficientes não responsivos (ENR), com alta produção de massa seca em baixo P, mas sem resposta à adubação com P; ineficientes não responsivos (INR), com baixa produção de massa seca em baixo P e sem resposta à adubação com P (Fageria e Baligar, 1997).

A distribuição dos genótipos nos quadrantes foi semelhante tanto para MAS como para MCS. Os genótipos com comportamento diferenciado na produção de colmos secos e parte aérea seca foram: RB92579, altamente responsivo à aplicação do nutriente, mas com baixa eficiência; RB957610, que se mostrou ineficiente e não responsivo; RB008041, RBSP801842 e RB72454, que apresentaram certa resposta à aplicação de P e obtiveram bom desempenho em baixa disponibilidade do nutriente, principalmente na produção de MCS.



**Figura 3** – Classificação dos genótipos de cana-de-açúcar à eficiência de produção de massa seca e resposta a aplicação de fósforo. ER: eficientes responsivos; IR: ineficientes responsivos; ENR: eficientes não responsivos; INR: ineficientes não responsivos. Os quadrantes foram obtidos com base nas médias de massa de colmos secos (Figura A) e massa da parte aérea seca (Figura B) em baixo P ( $20 \text{ mg dm}^{-3}$ ) e alto P ( $120 \text{ mg dm}^{-3}$ ). Genótipos: 1-RB008041, 2-RB008340, 3-RB027053, 4-RB72454, 5-RB835486, 6-RB855156, 7-RB855536, 8-RB867515, 9-RB92579, 10-RB928064, 11-RB93509, 12-RB947520, 13-RB957610, 14-RB962962, 15-RB965902, 16-RB966928, 17-RB977514, 18-RB987917, 19-RB987935, 20-RB988082, 21-RB99395, 22-SP80-1842, 23-SP81-3250

### 2.3.2. Caracteres relacionados à eficiência de uso do P

#### 2.3.2.1. Acúmulo de P nas plantas

A subdivisão do acúmulo de P por partes da planta permite identificar a eficiência de translocação interna dos nutrientes pelos genótipos. Além disso, os dados do acúmulo de P possibilita o conhecimento da quantidade de P que será removida do ambiente em razão da colheita das plantas. Isto é, aquelas porções da planta que serão removidas do campo, como os colmos em cana-de-açúcar, irão remover consigo o P acumulado nelas. Diante do exposto, a identificação de genótipos capazes de acumular

mais P nas raízes e nas folhas ao invés dos colmos e manter elevada produtividade podem ser de grande importância na sustentabilidade do sistema.

**Tabela 6-** Médias do acúmulo de P nos colmos, folhas e raízes (ACPC, ACPF, ACPR) em 23 genótipos de cana-de-açúcar em dois níveis de fósforo

Genótipos	Baixo P			Alto P								
	ACPC	ACPF	ACPR	ACPC	ACPF	ACPR						
----- mg planta <sup>-1</sup> -----												
RB008041	268,54	b	416,69	a	41,72	a	375,51	b	497,36	a	44,67	c
RB008340	174,05	d	233,18	e	38,59	b	371,27	b	293,11	c	41,46	c
RB027053	259,69	b	330,51	c	41,11	a	437,38	a	391,40	b	40,17	d
RB72454	258,37	b	363,99	b	38,59	b	399,54	b	392,60	b	44,66	c
RB835486	146,59	e	275,97	d	25,44	c	312,09	c	450,92	a	36,93	d
RB855156	197,85	d	219,47	e	35,43	b	332,99	c	357,39	b	43,68	c
RB855536	217,22	c	300,11	d	36,30	b	431,72	a	379,40	b	46,34	b
RB867515	214,19	c	247,00	e	41,33	a	366,52	b	369,73	b	44,77	c
RB92579	262,60	b	282,09	d	28,52	c	385,63	b	375,56	b	47,86	b
RB928064	147,75	e	282,08	d	37,80	b	381,67	b	430,28	a	60,11	a
RB93509	108,46	e	239,55	e	32,29	c	302,50	c	395,21	b	48,97	b
RB947520	277,27	b	281,07	d	36,79	b	450,40	a	471,13	a	44,40	c
RB957610	125,85	e	195,47	f	29,93	c	276,20	c	357,25	b	49,35	b
RB962962	223,61	c	263,38	d	30,81	c	315,79	c	432,85	a	37,17	d
RB965902	147,74	e	171,58	f	36,01	b	324,41	c	363,15	b	40,73	d
RB966928	217,52	c	179,87	f	28,67	c	407,39	a	387,43	b	37,48	d
RB977514	218,98	c	242,73	e	42,28	a	388,99	b	288,70	c	43,19	c
RB987917	238,64	c	229,61	e	34,40	b	363,11	b	241,59	c	42,87	c
RB987935	198,07	d	155,36	g	35,88	b	361,52	b	339,45	b	36,70	d
RB988082	188,28	d	291,17	d	38,23	b	323,74	c	330,13	b	43,78	c
RB99395	142,35	e	141,00	g	32,83	c	382,34	b	436,53	a	50,59	b
SP80-1842	312,08	a	349,90	b	42,08	a	411,09	a	373,95	b	49,65	b
SP81-3250	198,28	d	299,74	d	38,15	b	357,87	b	417,28	a	48,18	b
Média	206,26		260,50		35,79		367,81		381,41		44,51	
CV (%)	13,04		7,06		9,13		11,43		12,17		10,1	

Valores seguidos pela mesma letra na coluna pertencem ao mesmo agrupamento de médias pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Baixo P = 20 mg dm<sup>-3</sup>; Alto P = 120 mg dm<sup>-3</sup>.

Em média, ocorreu maior acúmulo de P nas raízes em relação à parte aérea (colmos e folhas) em baixo P no solo (7,4% em comparação aos 5,7% acumulados em condições de alto P) (Tabela 6). Esse resultado é esperado, pois plantas em condições de

estresse por baixa disponibilidade de P tendem a reter o nutriente para manter o crescimento das raízes. Resultados semelhantes foram encontrados por Araújo et al. (2000) em genótipos de feijoeiro. O acúmulo de P nas raízes variaram de 25 a 42 mg planta<sup>-1</sup> em baixo P e de 37 a 60 mg planta<sup>-1</sup> em alto P. No genótipo RB928064 houve maior ACPR em alto P e intermediário em baixo P.

Em relação ao ACPC e ACPF, de forma geral os genótipos acumularam mais P nas folhas que nos colmos em ambas as condições de disponibilidade de P (Tabela 6). Esta é uma característica importante no sistema de cultivo sem queima da cana, pois grande quantidade de palha permanecerá no campo promovendo a ciclagem dos nutrientes e melhorando o ambiente de cultivo.

Em baixo P, ocorreu grande variação entre os genótipos, com formação de cinco e sete grupos de ACPC e ACPF, respectivamente (Tabela 6). RB008041, RB72454 e SP80-1842 formaram o grupo superior no acúmulo de P, com média de 284 mg planta<sup>-1</sup> nos colmos e 381 mg planta<sup>-1</sup> nas folhas. O grupo inferior foi formado pelos genótipos RB93509, RB957610, RB965902 e RB99395, com médias de 131 e 187 mg planta<sup>-1</sup> de ACPC e ACPF, respectivamente.

Em alto P, ocorreu a formação de três grupos para ACP, tanto nos colmos como nas folhas. As médias dos grupos, em ordem decrescente, foram: 427, 376 e 312 mg planta<sup>-1</sup> para ACPC, e 448, 370 e 247 mg planta<sup>-1</sup> para ACPF. Estes resultados indicam que em condições ideais para o desenvolvimento das plantas ocorre redução na variabilidade do acúmulo de P entre os genótipos e na alocação do nutriente entre os órgãos da parte aérea.

Não foi possível indicar genótipos com comportamento ideal, isto é, aqueles que apresentem elevada produtividade com menor acúmulo de P nos colmos e maior nas folhas e raízes.

### **2.3.2.2. Sistema radical e eficiência de absorção**

Apesar de ter ocorrido incremento na produção da massa de raízes secas (MRS) com o aumento do nível de P, este incremento foi mais sutil quando comparado à MAS. A média de produção da MRS dos genótipos em baixo e alto P foi de 80 e 91 g planta<sup>-1</sup> (Tabela 7), respectivamente. Segundo Marchner (1995, 2012), o aumento ou manutenção do crescimento radical em condições de deficiência de nutrientes no solo, são mecanismos encontrados em muitas espécies vegetais, os quais intensificam a adaptação às condições de estresses nutricionais através de maior alocação de biomassa para as raízes.

Alguns trabalhos têm mostrado elevada correlação entre a eficiência ao baixo P e elevada produção de MRS em algumas culturas de importância agrônômica (Wissuwa et al., 2001; Fujita et al., 2004; Aziz et al., 2005). No entanto, isto não ocorreu neste estudo, o que pode ser observado pelo valor negativo e não significativo da correlação entre MRS e MAS (-0,39) (Tabela 8). Este resultado é devido à pequena variabilidade na MRS entre os genótipos, com formação de apenas dois grupos, com médias que variaram de 69 a 84 g planta<sup>-1</sup> entre o grupo inferior e o superior na produção de MRS, respectivamente (Tabela 7).

Isto indica que a contribuição da MRS foi semelhante para todos os genótipos e, com isto, outros caracteres devem estar relacionados com a eficiência de uso do P. Muitos estudos têm mostrado que características morfológicas e fisiológicas do sistema radical melhoram a eficiência de absorção de nutrientes possibilitando uma maior adaptação das plantas a ambientes com estresse abióticos (Lynch, 2007).

**Tabela 7** - Médias da massa das raízes secas (MRS), do índice de recuperação de P (IRP) e da razão de eficiência radical (RER) em 23 genótipos de cana-de-açúcar em dois níveis de fósforo

Genótipos	Baixo P			Alto P		
	MRS	IRP	RER	MRS	IRP	RER
	--- g ---	----- mg g <sup>-1</sup> -----		--- g ---	----- mg g <sup>-1</sup> -----	
RB008041	88 a	1212 a	8,3 a	90 b	255 a	10,2 c
RB008340	81 a	743 e	5,5 c	87 b	196 c	8,2 d
RB027053	82 a	1052 b	7,7 a	89 b	241 b	9,8 c
RB72454	86 a	1143 a	8 a	94 a	232 b	9,0 c
RB835486	69 b	747 e	6,7 b	74 b	222 b	11,0 b
RB855156	74 b	755 e	6,1 c	80 b	204 c	9,3 c
RB855536	91 a	923 c	6,1 c	93 a	238 b	9,4 c
RB867515	92 a	838 d	5,5 c	100 a	217 c	7,9 d
RB92579	71 b	955 c	8,1 a	100 a	225 b	8,3 d
RB928064	90 a	779 e	5,3 d	115 a	242 b	7,6 d
RB93509	82 a	634 f	4,7 d	99 a	207 c	7,6 d
RB947520	81 a	992 b	7,4 b	99 a	268 a	9,8 c
RB957610	71 b	585 g	5,1 d	85 b	190 c	8,2 d
RB962962	78 a	863 d	6,8 b	87 b	218 c	9,3 c
RB965902	85 a	592 g	4,3 d	90 b	202 c	8,2 d
RB966928	60 b	710 e	7,1 b	68 b	231 b	12,5 a
RB977514	80 a	840 d	6,4 c	86 b	200 c	8,4 d
RB987917	69 b	838 d	7,8 a	86 b	180 c	7,6 d
RB987935	79 a	649 f	5,0 d	82 b	205 c	9,1 c
RB988082	90 a	863 d	5,8 c	96 a	194 c	7,4 d
RB99395	69 b	527 g	4,6 d	107 a	242 b	8,2 d
SP80-1842	84 a	1173 a	8,4 a	90 b	232 b	9,4 c
SP81-3250	80 a	894 d	6,7 b	96 a	229 b	8,6 d
Média	80	839	6,4	91	220	8,9
CV (%)	12,3	6,0	13,0	11,9	7,3	11,0

Valores seguidos pela mesma letra na coluna pertencem ao mesmo agrupamento de médias pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Baixo P = 20 mg dm<sup>-3</sup>; Alto P = 120 mg dm<sup>-3</sup>.

Outro resultado importante foi a correlações negativas e não significativa entre MRS e índice de recuperação de P (IRP), sendo essa igual a -0,43 (Tabela 8). Isto corrobora que a eficiência de absorção de P em cana-de-açúcar não está diretamente relacionada com a produção bruta de raízes e sim com outros caracteres mais específicos. Estudos têm mostrado que a produção de diferentes classes de raízes (principalmente raízes finas), o estímulo ao crescimento de pelos radicais, a associação

com micorrizas, o incremento na expressão de transportadores de alta afinidade com o P e a exsudação de ácidos orgânicos no solo são mecanismos que podem aumentar a eficiência de absorção de P (EAP) nas plantas (Raghothama, 1999; Vance et al., 2003; Ramaekers et al., 2010).

**Tabela 8** – Correlação de Pearson entre massa da parte aérea seca (MAS), massa das raízes secas (MRS), índice de recuperação de P (IRP), razão da eficiência radical (RER), eficiência de utilização de P nos colmos (EUPC) e eficiência de utilização de P aérea (EUPA) em 23 genótipos de cana-de-açúcar em dois níveis de fósforo em casa de vegetação

Caráter	MAS	MRS	IRP	RER	EUPC	EUPA
MAS	1	-0,398	0,882**	0,801*	0,137	0,632
MRS	0,574	1	-0,434	-	-0,069	-0,112
IRP	-0,061	-0,113	1	-	-0,326	0,194
RER	-0,523	-	-	1	-0,176	0,197
EUPC	0,922**	0,525	-0,438	-0,628	1	-
EUPA	0,919**	0,505	-0,428	-0,608	-	1

\*\* , \* : Significativo a 1 e 5% de probabilidade, pelo teste t.  
 – variáveis derivadas. Diagonal superior refere-se à avaliação em baixo P (20 mg dm<sup>-3</sup>) e a diagonal inferior em alto P (120 mg dm<sup>-3</sup>).

Para mensurar a eficiência de absorção de P do solo existem vários indicadores que podem ser utilizados. Neste trabalho, foram estimados dois índices para determinar a absorção de fósforo, índice de recuperação de P (IRP) e razão de eficiência radical (RER).

O IRP foi obtido pela relação entre o acúmulo de P total na planta e a quantidade de P aplicado. Segundo Araújo (2000), esse índice permite uma comparação preliminar de genótipos, mas não elucida os mecanismos responsáveis pela maior eficiência de absorção de P. O IRP apresentou correlação positiva e significativa (0,88) com a produção de massa da parte aérea seca em baixa disponibilidade de P (Tabela 8). Por isso, o IRP tem grande importância no incremento da eficiência dos genótipos em baixo P. Em contraste, em alto P, não houve correlação significativa entre MAS e IRP (-0,06).

A RER é outro indicador utilizado para determinar a eficiência de absorção de P e corresponde à razão entre o conteúdo de P na biomassa e comprimento, área ou massa do sistema radical. Esse índice tem como vantagem a possibilidade de indicar quais os mecanismos responsáveis pela eficiência de absorção (Araújo, 2000). Neste trabalho, RER foi mensurada pela razão entre conteúdo de P total na planta e MRS.

Em baixa disponibilidade de P, a RER também apresentou correlação positiva e significativa (0,80) com MAS (Tabela 8). Com o aumento da dose de fósforo, RER obteve correlação negativa e de magnitude mediana (-0,52) com a MAS, indicando que a eficiência das plantas em absorver o P do solo pode se traduzir em aumento de produtividade até determinada quantidade de nutriente absorvido. Alguns estudos indicam que pode ocorrer queda na produção de biomassa por toxicidade de P, pois algumas espécies não apresentam mecanismos efetivos para evitar os “consumos de luxo”, consumos acima do necessário (Grundon, 1972). No entanto, os resultados deste estudo parecem estar mais relacionados às características intrínsecas dos genótipos, isto é, sua própria capacidade de produção, pois a dose de P aplicada, a princípio, não é suficientemente alta para causar toxicidade na cultura.

Para eficiência de absorção de P em alto P (Tabela 7), não ocorreu grande variabilidade entre os genótipos, pois foram formados três grupos de IRP e quatro grupos de RER. A razão de eficiência radicular, como mostrado na análise de correlações, não influencia a produção de biomassa, possivelmente por o fósforo não ser um fator limitante nestas condições.

No ambiente com reduzido P, a distribuição dos genótipos para IRP ocorreu com formação de sete grupos enquanto apenas quatro grupos foram formados para RER (Tabela 7). Os genótipos RB008041, RB72454 e SP80-1842, podem ser classificados como os mais eficientes na absorção de P, por terem se alocado no grupo de

desempenho superior considerando tanto o IRP quanto o RER. Os genótipos RB93509, RB957610, RB965902, RB987935 e RB99395 alocaram-se nos grupos inferiores na absorção de P. Estes resultados ratificam a importância deste caráter no aumento da eficiência de produção dos genótipos de cana-de-açúcar em ambientes com deficiência de P. Aqueles genótipos que apresentaram maior MAS e/ou MCS foram os que obtiveram desempenho superior também na EAP. Segundo Wissuwa et al. (2009), grandes avanços na obtenção de cultivares eficientes no uso do P envolveram a exploração da EAP.

### **2.3.2.3. Eficiência de utilização do P**

A concentração de P em determinado órgão da planta não garante necessariamente a utilização deste elemento para produção de biomassa aérea. Assim, a estimativa da eficiência de utilização de P (EUP) é de grande valia na classificação ou seleção de genótipos superiores.

Apesar da importância na identificação de genótipos contrastantes quanto à eficiência de utilização de P, alguns pesquisadores têm questionado sua eficácia. Um dos motivos é o baixo progresso que tem sido obtido na identificação de genótipos superiores com a utilização da EUP (Rose et al., 2011). Outro motivo é o grande número de índices apresentados na literatura, que aliado à falta de uma definição única, pode trazer confusão na escolha de qual índice é o mais adequado a ser utilizado.

Pode-se observar que ocorreu pequena redução tanto na eficiência de utilização de P nos colmos (EUPC) como na eficiência de utilização de P na parte aérea (EUPA) com o incremento do teor de P (Tabela 9).

Ocorreu a formação de quatro grupos para EUPC em baixo P. Os genótipos RB008041, RB835486 e RB962962 foram alocadas no grupo com média superior (1386

$\text{g}^2 \text{mg}^{-1}$ ) e RB957610, situou-se no grupo com média inferior ( $464 \text{ g}^2 \text{mg}^{-1}$ ). Os demais genótipos compuseram os grupos intermediários. Para EUPA, a distribuição dos grupos foi semelhante à ocorrida em EUPC, no entanto, a variação entre os genótipos foi menor, com formação de apenas três grupos. O genótipo RB967510 ficou novamente no grupo inferior ( $624 \text{ g}^2 \text{mg}^{-1}$ ); RB93509, RB965902, RB966928, RB987917 e RB99395 no intermediário ( $1026 \text{ g}^2 \text{mg}^{-1}$ ); os demais genótipos compuseram o grupo superior ( $1290 \text{ g}^2 \text{mg}^{-1}$ ).

Na condição de alto P, houve formação de quatro grupos para ambos os índices (Tabela 9). De forma geral, os genótipos se alocaram nos mesmos grupos, tanto para EUPC como para EUPA. Pode-se destacar o genótipo RB99395 com índice muito superior aos demais,  $1921 \text{ g}^2 \text{mg}^{-1}$  (EUPC), em comparação a  $1373$ ,  $996$  e  $771 \text{ g}^2 \text{mg}^{-1}$  de média dos demais grupos. Essa superioridade na EUP apresentada pelo RB99395 pode ser uma das explicações por sua grande resposta ao aumento na disponibilidade de P, visto que este teve baixa RER e valores intermediários na absorção e acúmulo de P. A EUPC e EUPA apresentaram elevadas magnitudes de correlação ( $0,92$ ) com MAS (Tabela 8), comprovando que este índice pode ser eficiente na seleção de genótipos superiores na utilização deste nutriente em condições ideais de suprimento de P.

No entanto, a EUP não apresentou relação com a tolerância ao estresse pela baixa disponibilidade de P, tendo em vista a baixa correlação entre EUPC e EUPA com a MAS ( $0,14$  e  $0,63$  respectivamente) (Tabela 8). Segundo Rose et al. (2011), a variabilidade genética para EAP pode confundir o ranqueamento dos genótipos para EUP, pois genótipos com alta EAP sofrem uma menor taxa de estresse, resultando em menor EUP. Os resultados encontrados neste trabalho confirmam essa hipótese, devido à baixa correlação entre os índices de eficiência de absorção (IRP e RER) e os índices de eficiência de utilização (EUPC e EUPA) (Tabela 8).

**Tabela 9** - Médias da eficiência de utilização de P nos colmos (EUPC) e da eficiência de utilização de P na parte aérea (EAPA) em 23 genótipos de cana-de-açúcar em dois níveis de fósforo

Genótipos	Baixo P		Alto P	
	EUPC	EAPA	EUPC	EAPA
	----- g <sup>2</sup> mg <sup>-1</sup> -----			
RB008041	1332,2 a	1466,3 a	1043,1 c	1239,0 c
RB008340	1032,8 c	1184,2 a	824,1 d	1058,2 c
RB027053	1058,0 c	1251,0 a	789,0 d	850,9 d
RB72454	1220,9 b	1331,9 a	1039,6 c	1229,3 c
RB835486	1428,8 a	1220,0 a	745,0 d	915,8 d
RB855156	1111,5 b	1261,7 a	1026,0 c	1242,7 c
RB855536	1030,1 c	1218,5 a	768,8 d	1060,9 c
RB867515	1202,4 b	1382,4 a	1328,1 b	1572,0 b
RB92579	1164,8 b	1432,8 a	1021,0 c	1226,2 c
RB928064	1265,1 b	1232,7 a	905,9 c	1105,5 c
RB93509	1205,1 b	1113,0 b	1098,2 c	811,9 d
RB947520	1004,5 c	1194,4 a	919,2 c	1117,9 c
RB957610	464,0 d	624,1 c	662,3 d	811,9 d
RB962962	1397,5 a	1361,0 a	1440,0 b	1376,5 c
RB965902	1124,1 b	1000,9 b	1350,2 b	1512,9 b
RB966928	892,7 c	942,9 b	966,6 c	1129,3 c
RB977514	1256,7 b	1312,0 a	936,6 c	1128,6 c
RB987917	954,6 c	1093,6 b	741,0 d	925,9 d
RB987935	815,8 c	966,8 b	807,1 d	1023,2 c
RB988082	1056,8 c	1270,1 a	833,6 d	1085,4 c
RB99395	889,7 c	1044,1 b	1920,9 a	2098,0 a
SP801842	1133,4 b	1260,2 a	908,7 c	1112,0 c
SP813250	1239,2 b	1275,6 a	1090,7 c	1252,5 c
Média	1099,2	1193,1	1007,2	1169,0
CV (%)	12,9	10,9	11,9	14,2

Valores seguidos pela mesma letra na coluna pertencem ao mesmo agrupamento de médias pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Baixo P = 20 mg dm<sup>-3</sup>; Alto P = 120 mg dm<sup>-3</sup>.

Para Wang et al. (2010), a relativa importância entre a EAP e a EUP depende da disponibilidade de P no solo. Estes autores relatam que a EAP é mais importante quando o suplemento de P no solo é baixo e a EUP mais importante quando o solo é bem suprido com o nutriente. Em solos com baixa disponibilidade de P, genótipos mais eficientes na utilização de P, isto é, aqueles que conseguem manter níveis adequados de produtividade mesmo com reduzidas concentrações internas de P, são considerados

muito promissores. Assim, o incremento para ambas as características, EAP e EUP, em diferentes condições de suplemento de P, parece ser a estratégia mais adequada para os programas de melhoramento obterem genótipos superiores.

## **2.4. Conclusões**

Há variabilidade genética tanto para eficiência de aquisição como para eficiência de utilização de fósforo.

Os genótipos apresentam resposta diferenciada para os índices de eficiência de uso de fósforo em relação à sua disponibilidade no solo. O índice de recuperação de P e a razão de eficiência radical foram mais importantes na discriminação dos genótipos em baixa disponibilidade de P, enquanto que a eficiência de utilização de P nos colmos e eficiência de utilização de P na parte aérea se destacaram em alto P.

É possível indicar genótipos como potenciais genitores para estudo futuros da herança da eficiência de absorção e da eficiência de utilização de fósforo.

## **2.5. Referências Bibliográficas**

Alvarez, V. Determinação e uso do fósforo remanescence. Boletim informativo [S.I], 25:1, 2000.

Araújo, A.P.; Teixeira, M.G.; Almeida, D.L. Growth and yield of common bean cultivars at two soil phosphorus levels under biological nitrogen fixation. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 35:4:809-817, 2000.

Aziz, T.; Pahrnatuttah, M.; Maqsood, A.; Mansoor, T. Differences in phosphorus absorption, transport and Utilization by twenty rice (*oryza sativa* L.) Cultivars. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 42:8-15, 2005.

- Batten, G.D. A review of phosphorus efficiency in wheat. *Plant Soil*, 146:163-168, 1992.
- Braga, J.M.; Defelipo, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. *21:113:73-85*, 1974.
- Buso, G.S.C.; Bliss, F.A. Variability among lettuce cultivars grown at two levels of available phosphorus. *Plant and Soil*, Dordrecht, 111:1:67-73, 1988.
- CONAB, 2013 - Companhia Nacional de Abastecimento. 4º Levantamento da Cana-de-Açúcar em Abril/2013. <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=>.
- Cruz, C.D.; Regazzi, Carneiro, P.C.S. Modelos Biométricos Aplicados ao Melhoramento Genético. Viçosa – UFV, volume 2, 585p, 2006.
- FAO, 2011. FAOSTAT database. <http://faostat3.fao.org/home/index.html>.
- Fageria, N.K.; Baligar, V.C. Upland rice genotypes evaluation for phosphorus use efficiency. *Journal of Plant Nutrition*, 20:4/5:499-509, 1997.
- Fujita, K.; Kai, Y.; Takayanagi, M.; El-Shemy, H.; Adu-Gyamfi, J.J.; Mohapatra, P.K. Genotypic variability of pigeonpea in distribution of photosynthetic carbon at low phosphorus level. *Plant Science*, 166:641-649, 2004.
- Godfray, H.C.J.; Beddington, J.R.; Crute, I. R.; Haddad, L.; Lawrence, D.; Muir, Pretty, J.; Robinson, S.; Thomas, S.M. ; Toulmin, C. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People, *Science*, v.327, p.812-818, 2010.
- Grundon, N.P. Mineral Nutrition of some Queensland heath plants. *Journal of Ecology*, 60:171-181, 1972.
- Hammond, J.P.; Broadley, M.R.; White, P.J.; King, G.J.; Bowen, H.C.; Hayden, R. Meacham, M.C.; Mead, A.; Overs, T.; Spracklen, W.P.; Greenwood, D.J. Shoot yield drives phosphorus use efficiency in *Brassica oleracea* and correlates with root architecture traits. *Journal of Experimental Botany*, 60:7:1953-1968, 2009.

- Hinsinger, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant Soil*, 237:173-195, 2001.
- Lana, R.M.Q.; Júnior, L.A.Z.; Correia, N.M.; Ângela Maria Quintão Lana, A.M.Q. Variabilidade entre genótipos de feijoeiro na eficiência no uso do fósforo. *Ciência Rural*, 36:3, 2006.
- Lynch, J.P. The role of nutrient-efficiency crops in modern agriculture. *Journal of Crop Production*, 1:2:241-264, 1998.
- Lynch, J.P. Roots of the second green revolution. *Australian Journal of Botany*, 55:493-512, 2007.
- Marschner, H. *Mineral Nutrition of Higher Plants* (2nd edn), Academic Press. 1995.
- Marschner, H. *Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd edn), Academic Press, 2012.
- Murrel, T.S.; Fixen, P.E. Improving fertilizer P effectiveness: challenges for the future. In: *Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Symposium on Phosphorus Dynamics in the Soil-Plant Continuum*, Uberlândia, Minas Gerais, Brazil, Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, p. 150-151, 2006.
- Oliveira, V.R.; Casali, V.W.D.; Pereira, P.R.G.; Cruz, C.D.; Pires, N.M. Tolerância de genótipos de pimentão ao baixo teor de fósforo no solo. *Bragantia*, 58:1:125-139, 1999.
- Raghothama, K G. Phosphate acquisition. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 50:665-93, 1999.
- Ramaekers, L.; Remans, R.; Rao, I.; Blair, M.; Vanderleyden, J. Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants. *Field Crop Research*, 117:169-176, 2010.
- Rose, T.J.; Rose, M.T.; Pariasca-Tanaka, J.; Heuer, S.; Wissuwa, M. The frustration with utilization: why have improvements in internal phosphorus utilization

- efficiency in crops remained so elusive? *Frontiers in Plant Science*, 2:73:1-5, 2011.
- Sanchez, P.A.; Salinas, J.G. Low-input technology for managing oxisols and ultisols in tropical America. *Advances in Agronomy*, 34:279-406, 1981.
- Shenoy, V.V.; Kalagudi, G.M. Enhancing plant phosphorus use efficiency for sustainable cropping. *Biotechnology Advances*, 23:501-513, 2005.
- Siddiqui, M.Y.; Glass, A.D.M. Utilization index: A modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. *Journal of Plant Nutrition*, 4:289-302, 1981.
- Somerville, C.; Youngs, H.; Taylor, C.; Davis, S.C.; Long, S.P. Feedstocks for Lignocellulosic Biofuels. *Science*, 329:790-792, 2010.
- Vance, C.P., Uhde-Stone, C., Allan, D.L. Phosphorus acquisition and use, critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 157:423-447, 2003.
- Wang, X.; Shen, J.; Liao, H. Acquisition or utilization, which is more critical for enhancing phosphorus efficiency in modern crops? *Plant Science*, 179:302-306, 2010.
- Wissuwa, M.; Ae, N. Genotypic variation for tolerance to phosphorus deficiency in rice and the potential for its exploitation in rice improvement. *Plant Breeding*, 120:43-48, 2001.
- Wissuwa, M.; Mazzola, M.; Picard, C. Novel approaches in plant breeding for rhizosphere-related traits. *Plant Soil*, 321:409-430, 2009.

### **3. Efeitos da disponibilidade de fósforo em caracteres morfológicos e fisiológicos em cana-de-açúcar**

#### **3.1. Introdução**

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma importante cultura perene, cultivada em mais de 90 países de regiões tropicais e subtropicais para a produção, principalmente, de açúcar e etanol. O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, seguido pela Índia, China e Tailândia, e responde por cerca de 45% da produção mundial de etanol (FAO, 2011). Apesar de sua elevada produção bruta, a produtividade dos canaviais brasileiros, com média de 70 t ha<sup>-1</sup>, ainda é reduzida se comparada ao seu potencial de produtividade teórica de 380 t ha<sup>-1</sup> (Waclawovsky et al., 2010). Esta baixa produtividade pode ser atribuída, entre outros fatores, à localização das áreas agrícolas, como em regiões do cerrado e pastagens degradadas, caracterizadas por solos intemperizados, de baixa fertilidade e/ou elevada acidez.

A baixa fertilidade do solo, especialmente a baixa disponibilidade de fósforo (P), tem sido uma séria restrição para a produção agrícola, especialmente em países em desenvolvimento (Lynch e Brown, 2008). Segundo Vance e Chiou (2011), cerca de 90% dos fertilizantes fosfatados utilizados na agricultura provém do P de rochas mineralizadas. Sendo recursos naturais não renováveis, sua disponibilidade máxima pode se limitar até 2030 em custos de produção mais elevados.

Para alterar este cenário, a utilização mais sustentável e equitativa do P e o desenvolvimento de plantas tolerantes à baixa disponibilidade de P no solo, isto é, com maior capacidade de aquisição e/ou mais eficientes na utilização do P, é uma necessidade para a sustentabilidade da agricultura (Bouwman et al. 2009, Cordell et al 2009, Richardson et al. 2011). Em cana-de-açúcar, os mecanismos de eficiência à baixa disponibilidade deste nutriente são desconhecidos ou pouco elucidados, o que tem

dificultado o contínuo desenvolvimento de variedades adaptadas às diferentes regiões canavieiras.

Trabalhos desenvolvidos em outras culturas como feijão, soja e milho têm comprovado a importância do sistema radical em relação à tolerância a estresses ambientais. Segundo Lynch (2005) e Lynch e Brown (2006), a arquitetura do sistema radical (ASR) determina a distribuição espacial das raízes das plantas no solo, e por isso é extremamente importante para a aquisição dos recursos minerais. A ASR é determinada pelo alongamento, ramificação e orientação das distintas classes de raízes ao longo do tempo.

A utilidade dos caracteres da ASR no melhoramento genético de plantas tem sido amplamente demonstrada em trabalhos com eficiência de fósforo (Lynch, 2007). Vários destes caracteres melhoram o crescimento superficial das raízes e também a eficiência de absorção e uso do fósforo (Lynch e Brown, 2001), incluindo o enraizamento adventício (Miller et al., 2003; Ochoa et al., 2006), comprimento e densidade de pelos radicais (Yan et al., 2004) e o ângulo de crescimento da raiz (Liao et al., 2001; Liao et al., 2004).

Os custos metabólicos para a exploração do solo pelo sistema radical das plantas podem exceder 50% da produção diária de fotossíntese (Lambers et al., 2002). Com isto, em solos com certas deficiências nutricionais, plantas que adquirem maiores recursos com um menor custo metabólico tendem a ser mais produtivas. Um dos mecanismos para a redução dos custos radicais é a alocação de maior biomassa para classes de raízes que possuem uma menor demanda metabólica, como as raízes laterais (mais finas) e os pelos radicais.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi identificar variabilidade genética da cana-de-açúcar em caracteres morfológicos e fisiológicos envolvidos na eficiência ao

estresse por baixa disponibilidade de P no solo, visando à utilização dessas informações nos programas de melhoramento para o aumento da produtividade e sustentabilidade do setor.

## **3.2. Material e Métodos**

### *Localização*

O experimento foi conduzido em casa de vegetação climatizada localizada no Campo Experimental Diogo Alves de Melo pertencente ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG (latitude 20°45'20''S, longitude 42°52'50''W e 640 m de altitude). A avaliação dos caracteres radicais envolvidos na resposta ao estresse foi desenvolvida no Laboratório de Fitopatologia da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (Unidade Regional EPAMIG Zona da Mata/Viçosa) em Viçosa, MG.

### *Material Vegetal*

Foram avaliados 19 genótipos de cana-de-açúcar (Tabela 10) oriundos do Banco de Germoplasma do Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar (PMGCA) RIDESA/UFV. Estes genótipos são variedades comerciais ou que apresentam importância nos blocos de cruzamento do PMGCA da RIDESA.

### *Delineamento experimental*

O experimento foi constituído de duas doses de P, correspondentes às condições de alto e baixo P e 19 genótipos de cana-de-açúcar. Os tratamentos foram arrançados no esquema fatorial 2 x 19 e o delineamento adotado foi o de blocos completos casualizados com três repetições. A unidade experimental foi constituída por vaso

cilíndrico de PVC (15 cm de diâmetro por 50 cm de altura) com 9 dm<sup>3</sup> de substrato, totalizando 114 vasos.

**Tabela 10** - Genótipos de cana-de-açúcar utilizados no experimento e respectivos genitores

<b>Genótipos</b>	Genitor ♀	Genitor ♂	<b>Genótipos</b>	Genitor ♀	Genitor ♂
<b>RB92579</b>	RB75126	RB72199	<b>RB855156</b>	RB72454	TUC71-7
<b>RB966928</b>	RB855156	RB815690	<b>RB027053</b>	SP85-3877	RB855536
<b>RB987935</b>	RB72454	RB83102	<b>RB93509</b>	RB72454	?
<b>RB928064</b>	SP70-1143	?	<b>RB008041</b>	SP84-2025	SP80-3280
<b>RB99395</b>	RB867515	?	<b>SP80-1842</b>	SP71-1088	H57-5028
<b>RB988082</b>	RB83102	RB72454	<b>RB947520</b>	RB72454	SP70-1143
<b>SP81-3250</b>	CP70-1547	SP71-1279	<b>RB72454</b>	CP53-76	?
<b>RB937570</b>	SP70-1143	RB72454	<b>RB988137</b>	RB72454	RB83102
<b>RB977514</b>	SP80-1842	?	<b>RB957610</b>	RB83102	?
<b>RB008340</b>	SP80-3280	?			

? Genitor masculino desconhecido

#### *Preparo das mudas e condução do experimento*

Para a obtenção das mudas, colmos dos genótipos em estudo foram padronizados em relação ao diâmetro, posicionamento da gema em relação ao colmo (foram utilizadas somente gemas da parte central e superior) e tamanho da gema dentro de cada genótipo. Posteriormente, os colmos foram cortados em partes de aproximadamente 3 cm contendo uma gema (tolete).

Em novembro de 2012, as mudas foram plantadas em bandejas contendo areia lavada. As bandejas foram diariamente irrigadas com água deionizada até a germinação das gemas. Após 20 dias, as plântulas germinadas foram selecionadas quanto à uniformidade e transferidas para os vasos de PVC.

O substrato foi formado pela mistura de 12,5% de solo, 37,5% de vermiculita e 50% de areia lavada (Tabela11). A utilização desse substrato foi importante para a avaliação do sistema radical pela facilidade de sua remoção durante a coleta das raízes,

boa estruturação e retenção de água. O solo foi utilizado para possibilitar adsorção do P, não permitindo assim, que o nutriente ficasse prontamente disponível para a planta (Maia et al., 2011), à semelhança do que ocorre em condições normais de cultivo comercial.

Para a escolha das doses contrastantes de P foi realizado um estudo preliminar, segundo a metodologia proposta por Alvarez et al. (2000). As doses utilizadas foram: 20 mg dm<sup>-3</sup> para o baixo P e 200 mg dm<sup>-3</sup> para o alto P. O nutriente foi aplicado na forma de superfosfato triplo e misturado em todo o substrato.

**Tabela 11** - Análise química do substrato utilizada no experimento

pH	P	K	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Al <sup>+3</sup>	H+Al	SB	CTC (t)	CTC (T)
H <sub>2</sub> O	----- mg dm <sup>-3</sup> -----		----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----						
5,8	3,4	22	0,58	0,42	0,0	1,15	2,79	3,29	7,01
V	m	MO	P-rem	Zn	Fe	Mn	Cu	B	
---- % ---		dag kg <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	----- mg dm <sup>-3</sup> -----					
31	0	1,2	43,2	1,1	149,5	32,4	0,4	0,0	

\* Substrato: solo, vermiculita e areia. Extratores químicos utilizados: 1) para P, Na, K, Fe, Zn, Mn e Cu: Mehlich; 2) para Ca, Mg e Al: KCl 1,0M; 3) para H + Al: acetato de cálcio 0,5M a pH 7,0.

Os demais nutrientes foram adicionados via solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1938) modificada para estudos de deficiência, de acordo com Passos (1996), sem a adição de P e com 1,0M Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O; 1,0M MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O; 0,5M K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 0,32 mM CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O; 46,0 mM H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>; 0,073 mM (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>; 9,1 mM MnCl<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O; 0,76 mM ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O e 38,0 mM Fe- EDTA. Foi aplicada a quantia de 200 ml vaso<sup>-1</sup> dessa solução nutritiva a cada dois dias. Nos demais dias, os vasos foram irrigados com água deionizada de forma a manter o substrato em torno de 70% da capacidade de campo controlada por meio de pesagem dos vasos em intervalos de quatro dias.

As plantas foram colhidas 60 dias após o seu plantio nos vasos de PVC, período no qual as raízes principais (raízes derivadas dos perfilhos da planta) já estavam bem estabelecidas e as raízes do tolete apresentavam pouca influência no crescimento da planta. No momento da colheita, a parte aérea (colmos e folhas) foi separada do sistema radical para mensuração de sua matéria fresca. Para obtenção das raízes, estas foram lavadas em água corrente com o auxílio de uma peneira para evitar perdas de tecido radical. Logo após, as raízes principais foram separadas das raízes dos toletes, sendo somente as principais analisadas. Os caracteres avaliados são apresentados a seguir.

*Avaliação de caracteres morfológicos e fisiológicos do comportamento de genótipos de cana-de-açúcar em resposta ao estresse por P*

1. *Massa da parte aérea seca (MAS) em gramas por planta (g)*: a parte aérea das plantas foi pesada para obtenção da matéria fresca, seca em estufa com circulação forçada de ar a 70°C até atingir massa constante e em seguida pesada para a determinação da MAS.

2. *Massa das raízes secas (MRS) em gramas por planta (g)*: as raízes foram pesadas para obtenção da matéria fresca. Uma amostra de aproximadamente 70% do sistema radical foi secada em estufa a 70°C e em seguida pesada para a determinação da MRS.

Para mensuração dos caracteres morfológicos do sistema radical (pelos radicais e comprimento radical), uma amostra de aproximadamente 30% do volume fresco foi extraída no sentido do comprimento e armazenada em solução de etanol 70% até o momento da avaliação.

3. *Pelos Radicais (PR)*: três raízes representativas do sistema radical foram utilizadas para avaliação dos PR. Como o sistema radical da cana-de-açúcar ainda é pouco estudado, não existem trabalhos relatando a presença ou não de PR em seu sistema radical. Diante disto, o primeiro passo foi identificar a presença de pelos nas raízes e a existência de variabilidade entre os genótipos estudados. A identificação foi feita

através de um método visual simples, atribuindo-se notas em uma escala de 0 a 5, correspondente à total ausência de pelos radicais (0) e à maior densidade e comprimento de pelos (5), segundo metodologia proposta por Vieira et al. (2007). Os genótipos obtidos como padrões foram: RB72454 (maior produção de PR) e RB928064 (menor produção de PR) em condição reduzida de fósforo.

4. *Comprimento radical*: o restante da amostra reservada do sistema radical foi empregado para quantificação do comprimento radical dentro de diferentes classes de diâmetro (d). As raízes foram divididas em três classes: raízes finas (RF;  $d < 0,25$  mm), raízes intermediárias (RI;  $0,25 < d < 1,5$  mm) e raízes principais (RP;  $d > 1,5$  mm). O comprimento radical foi aferido em metros de raízes por planta (m), utilizando scanner acoplado a um computador contendo o software WinRHIZO Pro 2007a (Régent Instruments Inc., Canadá), de acordo com protocolo descrito por Wenzl et al. (2006).

5. *Eficiência de absorção de fósforo (EAP)*: depois de mensuradas, amostras da MAS e MRS foram moídas e submetidas à análise de P, colorimetricamente, através do método descrito por Braga e Defelipo (1974).  $EAP = \text{mg P na planta g}^{-1} \text{ P aplicado}$ , conforme proposto por Hirel et al (2007).

6. *Área foliar (AF) por planta (cm<sup>2</sup>)*: a área foliar de cada planta foi mensurada utilizando um medidor portátil, modelo CI-203 Portable Laser Area Meter, CID Inc., USA.

7. *Análise da taxa fotossintética (TFS) em  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$* : realizada utilizando um sistema de determinações da concentração de gases no infravermelho (IRGA, Li-Cor - Li6400 XT), conforme metodologia descrita por Flexas et al. (2007). As mensurações foram realizadas na folha +1 entre 9 e 14 horas em dias ensolarados, conforme Sato et al. (2010). A determinação da folha a ser utilizada, seguiu a classificação de *Kuijper* descrita por Cheavegatti-Gianotto et al. (2012).

Os dados da avaliação fenotípica foram submetidos à análise de variância (Tabela 12), segundo o modelo estatístico:

$$Y_{ijk} = m + B_k + G_i + P_j + GP_{ij} + E_{ijk}$$

onde;

m = média geral;

B<sub>k</sub> = efeito do bloco

G<sub>i</sub> = efeito do genótipo; considerado como fixo;

P<sub>j</sub> = efeito devido à dose de fósforo; considerado como fixo;

GP<sub>ij</sub> = efeito de interação genótipo x dose de P;

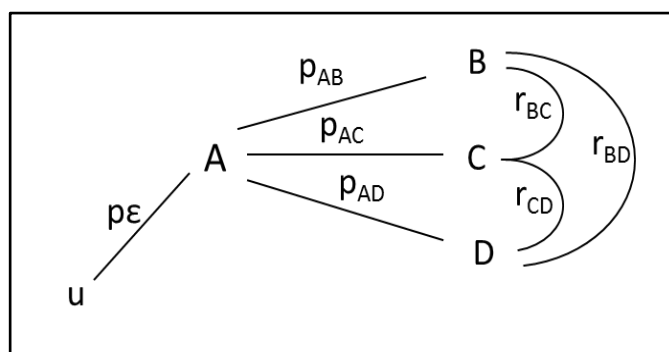
E<sub>ijk</sub> = erro aleatório;

**Tabela 12** - Esquema da análise de variância para o modelo fixo, em arranjo fatorial no delineamento de blocos casualizados

Fonte de Variação	GL	E(QM)	F
Bloco	2	$\sigma^2 + g\sigma_b^2$	
Genótipo (G)	18	$\sigma^2 + pr\phi_g$	QMG/QMR
Fósforo (P)	1	$\sigma^2 + gr\phi_p$	QMP/QMR
G x P	18	$\sigma^2 + r\phi_{gp}$	QMGP/QMR
Resíduo	74	$\sigma^2$	
Total	113		

$$\phi_g = \frac{\sum g_i^2}{I-1}, \phi_p = \frac{\sum p_j^2}{J-1}, \phi_{gp} = \frac{\sum (gp)_{ij}^2}{(I-1)(J-1)}$$

Os caracteres mensurados foram submetidos a um agrupamento de médias pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade e análise de correlações de Pearson para determinar as relações entre os caracteres envolvidos na resposta ao estresse. Em seguida, efetuou-se análise de trilha (Figura 4) para avaliar a importância relativa dos efeitos diretos e indiretos dos caracteres sobre a variável matéria da parte aérea seca (Cruz et al., 2004). As análises estatísticas foram efetuadas com auxílio do *software* Genes (Cruz, 2006).



**Figura 4** - Diagrama causal ilustrativo dos efeitos das variáveis explicativas (B, C e D) e residual (u) sobre a variável dependente A.

### 3.3. Resultados e Discussão

**Tabela 13** – Resumo da análise de variância dos efeitos de genótipos e níveis de P e da interação entre esses fatores em 19 genótipos de cana-de-açúcar em dois níveis de P

FV	GL	QM				
		MAS	MRS	RF	RI	RP
Bloco	2	0,33	0,39	3,61	0,04	0,02
Genótipo (G)	18	10,35*	6,79*	96,17*	4,60*	0,44*
Fósforo (P)	1	95,83*	503,66*	6483,19*	352,95*	19,75*
G x P	18	5,75*	5,44*	31,58*	3,00*	0,16*
Resíduo	74	0,94	0,89	4,09	0,25	0,01
CV (%)		15,82	17,12	14,96	15,53	12,60

FV	GL	EAP	PR	AF	TFS
Bloco	2	46,55	0,11	18673,58	74,27
Genótipo (G)	18	622,26*	2,28*	52152,94*	65,86*
Fósforo (P)	1	183,36*	24,64*	5177976,31*	681,25*
G x P	18	229,09*	0,70*	20379,44*	17,37*
Resíduo	74	21,98	0,15	4671,94	7,09
CV (%)		11,37	17,19	15,44	9,87

\* = significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. Caracteres: massa da parte aérea seca (MAS); massa das raízes secas (MRS); comprimento radical para três classes de raízes: raízes finas (RF), raízes intermediárias (RI) e raízes principais (RP); eficiência de absorção de fósforo (EAP); pelos radicais (PR); área foliar (AF) e taxa fotossintética (TFS)

Os efeitos principais e suas interações foram significativos para todos os caracteres (Tabela 13). Com isto, foi feito o desdobramento da análise para testar os efeitos de genótipos dentro de cada dose de P. Houve diferença significativa em todos

os caracteres para as duas doses de P estudadas, indicando que diferenças nos teores do nutriente no solo afetam os caracteres avaliados. Estes resultados sugerem a existência de variabilidade genética útil para ser explorada entre os genótipos estudados.

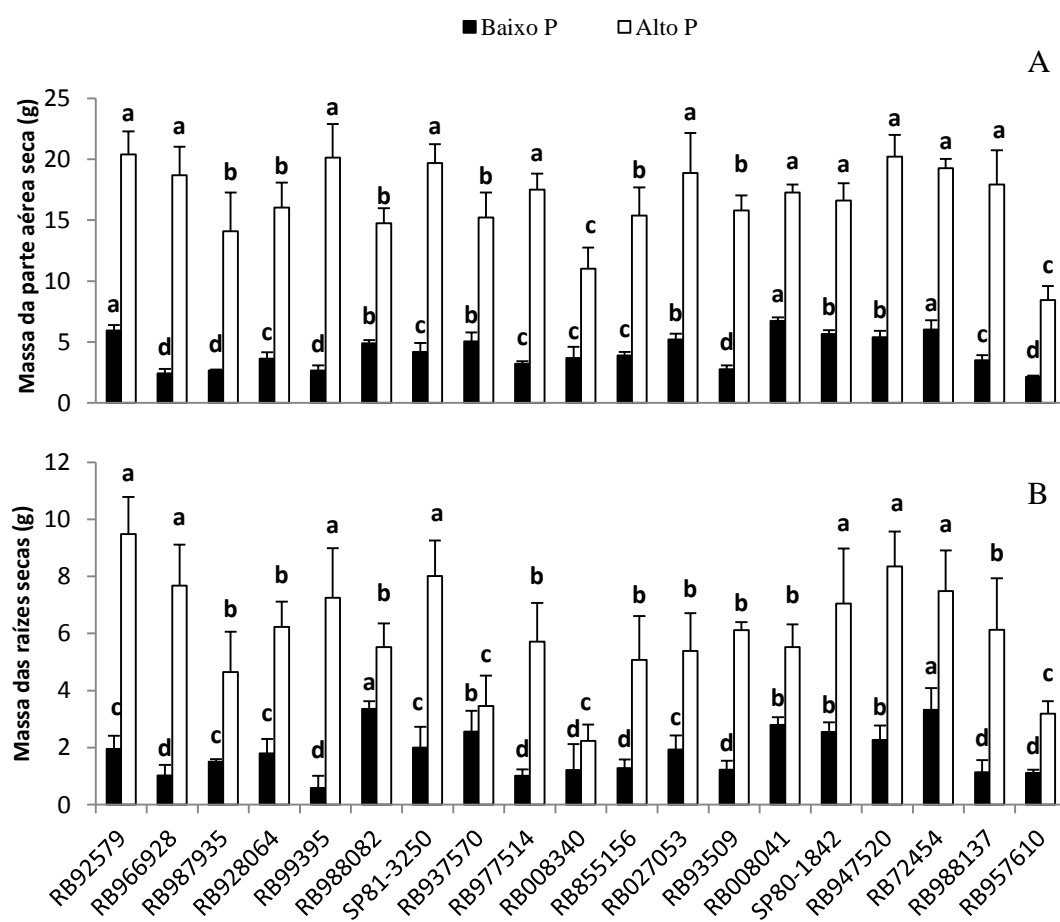
### **3.3.1. Massa da parte aérea seca e massa das raízes secas em resposta à disponibilidade de P no solo**

Tanto para massa da parte aérea seca (MAS) como para massa das raízes secas (MRS) ocorreu um incremento considerável na produção nos 19 genótipos em resposta ao aumento da dose P. No entanto, houve larga variabilidade genotípica. A média de produção de MAS (16,70 g) e MRS (6,04 g) em alto nível de P foi aproximadamente quatro vezes superior à média em baixo nível de P respectivamente (Figura 5).

Apesar de ocorrer redução na MRS com a diminuição da disponibilidade de P (Figura 5B), esta foi menos afetada em comparação à MAS. Isto pode ser explicado pela maior translocação de fotoassimilados para o sistema radical, intensificando a produção de novas raízes. Segundo Marschner (1995 e 2012), as plantas em condições de estresse nutricional alocam maior proporção de sua biomassa para o sistema radical em consequência de alterações metabólicas na parte aérea e de ajuste de transporte de carboidratos para as raízes.

Considerando a produção de massa da parte aérea seca em alto P, ocorreu a formação de três grupos (Figura 5A): i) RB008340 e RB957610 foram significativamente inferiores em resposta à aplicação do P, com produção de 11,02 g e 8,45 g, respectivamente; ii) RB987935, RB928064, RB988082, RB937570, RB855156 e RB93509 apresentaram comportamento intermediário, com produção média de 15,21 g e iii) RB92579, RB966928, RB99395, SP81-3250, RB977514, RB027053,

RB008041, SP80-1842, RB947520, RB72454 e RB988137 apresentaram produção superior, com média de 18,78 g de MAS.



**Figura 5** – Médias da massa da parte aérea seca (Figura A) e da massa das raízes secas (Figura B) em 19 genótipos de cana-de-açúcar em dois níveis de fósforo. Valores seguidos pela mesma letra, em cada nível de P, pertencem ao mesmo agrupamento de médias pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. As barras representam o desvio padrão da média (n=3). Baixo P = 20 mg dm<sup>-3</sup>; Alto P = 200 mg dm<sup>-3</sup>.

Este comportamento superior de alguns genótipos em resposta à aplicação de P é um caráter de grande interesse para a produtividade da cultura e sustentabilidade do setor, uma vez que o insumo agrícola aplicado é aproveitados com maior eficiência pelas plantas. A identificação de genótipos eficientes no uso dos nutrientes é, portanto, objetivo fundamental em programas de melhoramento, visando disponibilizar aos

produtores cultivares que alcancem produtividade mais elevada em condições ideais de disponibilidade dos nutrientes.

Para massa da parte aérea seca em baixo P, ocorreu a formação de quatro grupos (Figura 5A). Os genótipos RB92579, RB008041 e RB72454 foram alocados no grupo com maior produtividade (média de 6,24 g), sendo consideradas como os mais tolerantes ao baixo teor do nutriente. Os genótipos RB966928, RB987935, RB93509 e RB957610 formaram o grupo dos genótipos menos produtivos (média de 2,53 g), sendo, portanto, mais sensíveis à baixa disponibilidade do nutriente.

Os demais genótipos formaram dois grupos intermediários. RB988082, RB937570, RB027053, SP80-1842 e RB947520, com média de 5,24 g, foram consideradas como moderadamente tolerantes e os genótipos RB928064, SP81-3250, RB977514, RB008340, RB855156 e RB988137 com média de 3,69 g como moderadamente sensíveis. Apesar dos genótipos estudados não representarem toda a variabilidade genética do germoplasma, os resultados mostram que é possível selecioná-los quanto à tolerância à baixa disponibilidade de fósforo (Figura 6).



**Figura 6** - Variabilidade na produção de parte aérea e de raízes dos genótipos RB008041 (A e B) e RB99395 (C e D). As plantas à direita de cada imagem estavam em baixo P e as à esquerda em alto P.

### **3.3.2. Análise de Trilha na identificação dos caracteres relacionados à tolerância à baixa disponibilidade de P no solo**

Apesar da produção de matéria seca ser um dos principais caracteres utilizados para identificação de genótipos tolerantes a estresses ambientais este é um fator quantitativo e altamente influenciado pelo ambiente. Assim, a seleção direta para este caráter pode ser dificultada e acarretar em erros na predição do potencial do genótipo. Deste modo, a identificação de caracteres de fácil mensuração, alta herdabilidade e que tenham relação direta ou indireta com a produtividade são imprescindíveis para se alcançar êxito em programas de melhoramento.

Segundo Vance et al. (2003), plantas expostas à deficiência de P podem ativar uma série de mecanismos que resultam em aumento de sua tolerância. A identificação destes mecanismos é fundamental para seleção de genótipos superiores. Muitos trabalhos têm mostrado caracteres de importância quando o objetivo é selecionar genótipos tolerantes ao estresse por P no solo, tais como as características morfológicas do sistema radical (Lynch, 1995) e a eficiência no uso do P (Wang et al., 2010).

Além da determinação das magnitudes e direções das correlações entre caracteres, o conhecimento da contribuição direta e/ou indireta de um caráter sobre uma variável de interesse é importante na escolha da metodologia a ser utilizada em um programa de melhoramento. Na Tabela 14 são apresentadas as vias de associação direta e indireta dos caracteres que apresentaram maior correlação com a MAS. Todos os caracteres analisados apresentaram correlações positivas e significativas com MAS. Considerando os outros caracteres, as estimativas de correlação variaram de 0,741 a 0,941 para raízes finas (RI) e área foliar (AF), respectivamente. Resultados semelhantes foram encontrados por Aziz et al. (2005) em arroz, com correlações positivas e significativas entre MAS e os caracteres MRS (0,70) e eficiência de absorção de P (0,82).

**Tabela 14** - Estimativa dos efeitos diretos e indiretos sobre massa da parte aérea seca, dos caracteres relacionados à eficiência de produção em baixa disponibilidade de fósforo no solo

<b>Caráter</b>	<b>MRS</b>	<b>AF</b>	<b>EAP</b>	<b>RF</b>	<b>RI</b>	<b>r</b>
<b>MRS</b>	<b>0,088</b>	0,239	0,317	0,162	-0,005	0,825
<b>AF</b>	0,075	<b>0,279</b>	0,355	0,162	-0,005	0,941
<b>EAP</b>	0,068	0,243	<b>0,407</b>	0,153	-0,004	0,889
<b>RF</b>	0,076	0,242	0,333	<b>0,187</b>	-0,006	0,879
<b>RI</b>	0,071	0,212	0,289	0,174	<b>-0,006</b>	0,741
<b>R<sup>2</sup></b>						0,884

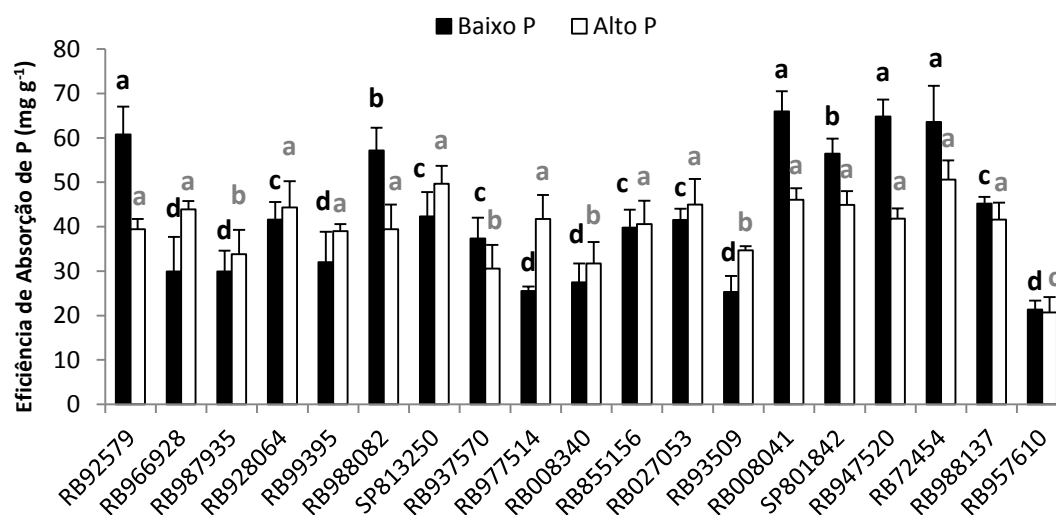
Diagonal principal representa os efeitos diretos sobre massa da parte aérea seca e os demais valores representam os efeitos indiretos. MRS = massa das raízes secas; AF = área foliar; EAP = eficiência de absorção de P; RF = raízes finas; RI = raízes intermediárias. Análise feita em baixo nível de P; R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinação; r = coeficiente de correlação de Pearson.

Neste trabalho, podem-se destacar a EAP (0,407), AF (0,279) e RF (0,187) como os caracteres que apresentaram maior relação direta com a produtividade de massa da parte aérea seca da cana-de-açúcar (Tabela 14). Tais resultados indicam que a utilização desses, contribui na seleção de genótipos tolerantes ao baixo teor de P no solo. Os resultados da análise de trilha indicam que os caracteres relacionados ao sistema radical da cana-de-açúcar apresentam grande influência no nível de tolerância dos genótipos ao estresse por baixa disponibilidade de P.

### 3.3.3. Eficiência de Absorção de P

Para o caráter EAP (Figura 7), na condição de alta disponibilidade de P, a diferença entre os genótipos foi estatisticamente significativa, mas apresentou pequena variação em valores absolutos (média de 39,0 mg g<sup>-1</sup>), com exceção do RB957610, com desempenho significativamente inferior (20,7 mg g<sup>-1</sup>). Houve um acréscimo na eficiência de absorção, para a maioria dos genótipos, com a redução do nível de P, resultando na formação de quatro grupos: os genótipos RB92579, RB008041, RB

947520 e RB72454 foram alocadas no grupo superior, com média de 63,8 mg g<sup>-1</sup>, já RB966928, RB987935, RB99395, RB977514, RB008340, RB93509 e RB957610 alocaram-se no grupo inferior, com média de 27,4 mg g<sup>-1</sup>. Os demais genótipos formaram dois grupos intermediários.



**Figura 7** - Eficiência de absorção de fósforo em 19 genótipos de cana-de-açúcar em dois níveis de fósforo. Valores seguidos pela mesma letra, em cada nível de P pertencem ao mesmo agrupamento de médias pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. As barras representam o desvio padrão da média (n=3). Baixo P = 20 mg dm<sup>-3</sup>; Alto P = 200 mg dm<sup>-3</sup>.

Os resultados confirmam uma consistente relação entre EAP e a tolerância dos genótipos ao estresse por baixo P, pois os genótipos classificados como tolerantes e sensíveis, alocaram-se nos grupos mais eficientes e menos eficientes na absorção de P, respectivamente. Segundo Wissuwa et al. (2009), a maioria dos avanços no melhoramento para tolerância ao estresse causado pela baixa disponibilidade de P em culturas de importância agrônômica têm envolvido a exploração da EAP. A principal estratégia para incrementá-la é a maximização da exploração do solo através da proliferação e extensão do sistema radical das plantas, preferencialmente por raízes metabolicamente mais eficazes e com maior capacidade na absorção do nutriente (Lynch e Ho, 2005).

### **3.3.4. Sistema radical: morfologia de raízes**

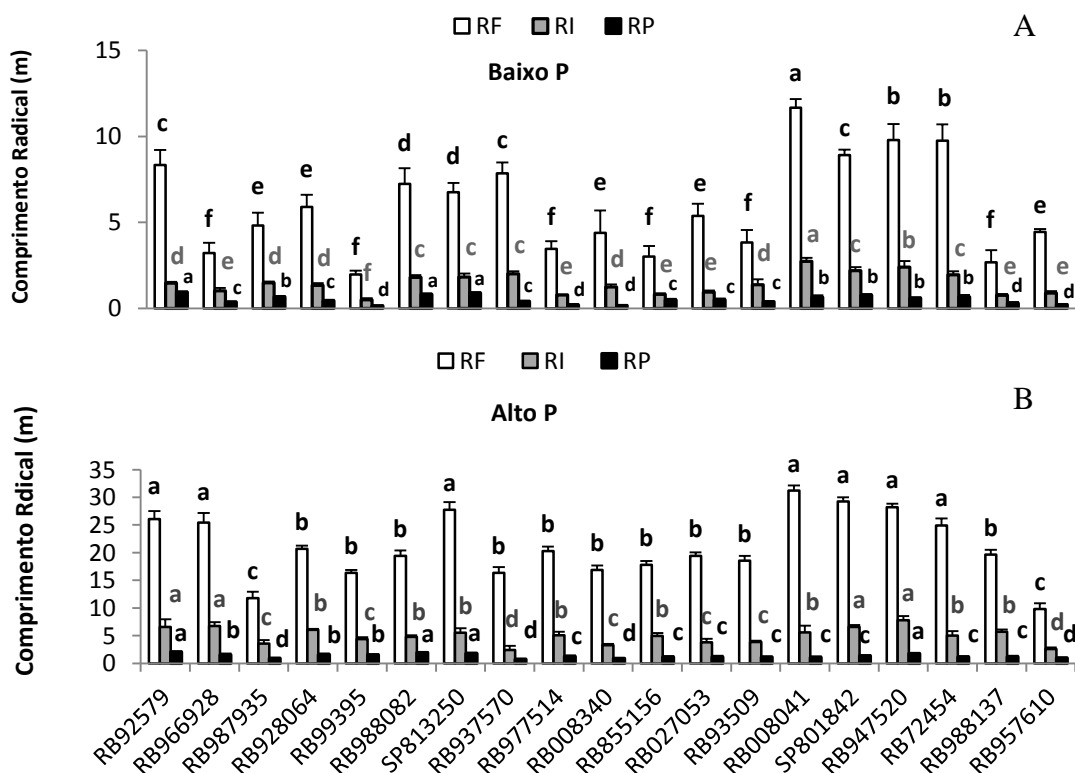
A arquitetura do sistema radical, incluindo a formação de diferentes classes de raízes, é uma característica importante para incrementar a eficiência das culturas na aquisição do P. O estudo e a classificação do sistema radical da cana-de-açúcar é incipiente e necessita de atualização. Smith et al. (2005) relataram a existência de três tipos funcionais de raízes conforme a planta se desenvolve, sendo elas:

- i) “raízes suporte”, que emergem da base do perfilho jovem, são mais grossas e responsáveis pelo suporte da planta;
- ii) “raízes superficiais”, formadas por raízes mais finas e altamente ramificadas que se estendem lateralmente pela camada superficial do solo, responsáveis pela absorção de água e nutrientes;
- iii) “raízes cordão”, compostas por um aglomerado de raízes mais profundas.

Esta classificação é baseada em trabalhos antigos, com a utilização de cultivares de cana-de-açúcar antigas. Smith et al. (2005) citando o trabalho de Blackburn, (1984) descrevem que esta arquitetura do sistema radical pode não ser muito comum na realidade (não se manifestar nas cultivares modernas), pois a distinção entre as raízes superficiais e de suporte podem ser muito sutis e os sistemas de raízes cordão muito raros.

Sendo assim, este trabalho permitiu acessar o sistema radical da cana-de-açúcar, fornecendo novas informações sobre as classes de raízes que o constituem e parâmetros morfológicos de crescimento. Houve incremento nas três classes com o aumento do nível de P (Figura 8). Ocorreu maior variabilidade entre os genótipos na condição de baixo P, com destaque para RF e RI. Estes resultados estão de acordo com os descritos por Hodge (2004 e 2009). Segundo esse autor, a baixa disponibilidade de P no solo

altera a distribuição do crescimento entre os vários tipos de raízes, especialmente aquelas mais eficientes na aquisição do mineral.



**Figura 8** - Comprimento radical de três classes de raízes: raízes finas (RF;  $d < 0,25$  mm), raízes intermediárias (RI;  $0,25 < d < 1,5$  mm) e raízes principais (RP;  $d > 1,5$  mm) em 19 genótipos de cana-de-açúcar em dois níveis de P. Valores seguidos pela mesma letra, em cada classe de raiz, pertencem ao mesmo agrupamento de médias pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. As barras representam o desvio padrão da média ( $n=3$ ). Baixo P =  $20 \text{ mg dm}^{-3}$  (Figura A); Alto P =  $200 \text{ mg dm}^{-3}$  (Figura B). d = diâmetro das classes das raízes.

A diferença de crescimento foi três vezes maior em RF e RI e duas vezes maior em RP com o aumento na dose de P (Figura 8B), com médias iguais a 21,1; 5,0 e 1,3 (Alto P) e 6,0; 1,5 e 0,5 (Baixo P) metros para RF, RI e RP, respectivamente. Em baixa disponibilidade de P (Figura 8A), ocorreu a formação de seis grupos relativos à produção de raízes finas, com destaque para o clone RB008041 (11,7 m de comprimento), seguida pelos genótipos RB947520 e RB72454 (9,8 m). Os genótipos RB966928, RB99395 e RB93509, classificados como não tolerantes ao baixo P, tiveram

baixo rendimento na produção de RF, com 3,2; 1,9 e 3,8 m de comprimento, respectivamente.

A maior produção de RF resulta em grandes benefícios para as plantas, principalmente quando cultivadas em ambientes com estresse por baixos teores de nutrientes. Raízes finas possuem uma maior área de contato com o solo, proporcionando maiores taxas de absorção dos nutrientes com um menor custo metabólico para a planta (Lynch e Brown, 2006; Lynch 2007).

Em *Arabidopsis thaliana* e algumas cultivares de Brássica, foi observada alta ramificação do sistema radical, com redução das raízes primárias e aumento do número e comprimento das raízes laterais, em baixa disponibilidade de P (López-Bucio et al., 2003; Pérez-Torres et al., 2008; Akthar et al., 2008). Em milho, Zhu e Lynch (2004) relatam que alguns genótipos apresentam aumento no número e comprimento de raízes laterais, enquanto outros apresentam diminuição desses caracteres. Os genótipos com aumento ou manutenção do desenvolvimento das raízes laterais têm capacidade superior para adquirir P e manter seu crescimento. Os resultados encontrados neste trabalho concordam com os resultados obtidos por esses autores, demonstrando a importância do sistema radical, principalmente das raízes mais finas, no aumento da aquisição do P e conseqüentemente, na maior tolerância à condição de estresse.

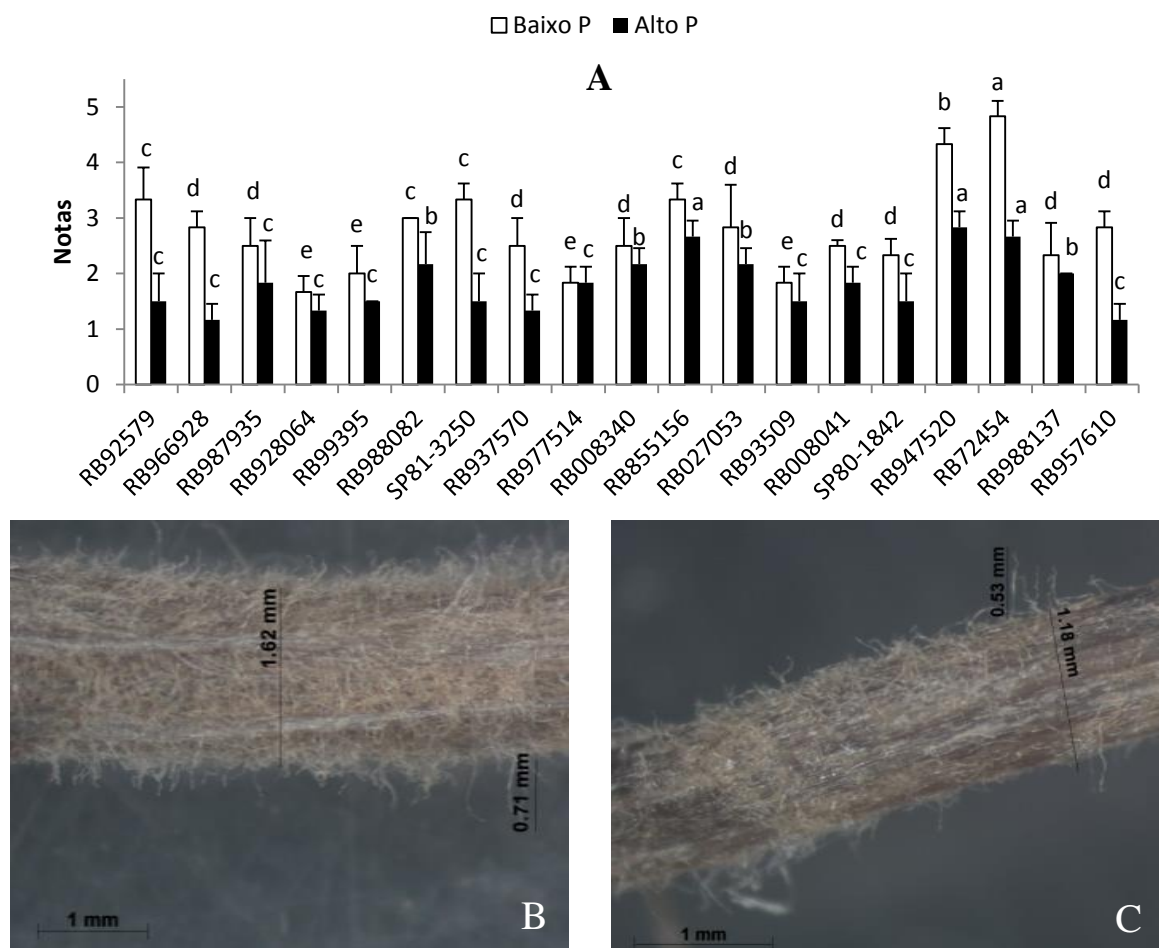
As RI (Figura 8A) foram compostas basicamente por raízes laterais, com diâmetro entre 0,25 e 1,5 mm. No entanto, houve redução em sua produção em baixo P quando comparadas com as RF. Na condição de estresse, espera-se que a planta mobilize recurso energético para a produção de raízes mais eficientes na absorção do nutriente. A produção das RI variou de 0,5 (RB99395) a 2,4 m de comprimento (RB008041). Essa classe de raízes não apresentou efeito significativo sobre a eficiência dos genótipos ao estresse por P, o que pode ser comprovado por seu efeito direto

negativo com a MAS (-0,006) (Tabela 14). Também houve ausência de correlação entre RP e MAS, apesar da variabilidade manifestada pelos genótipos nesta classe de raízes. Esses resultados podem ser explicados pela diminuição da eficiência das RI em absorver o nutriente e também pelo aumento do gasto energético da planta para produção dessas raízes. Raízes intermediárias e principais, por se tratarem de raízes com maior diâmetro, necessitam de maiores recursos para produção de sua biomassa, além de possuírem menor capacidade de absorção de nutrientes.

### **3.3.4. Sistema radical: pelos radicais**

Outro caráter comum à adaptação das plantas ao baixo P é o estímulo do crescimento dos pelos radicais (Lynch, 2007). Não existem, porém, estudos relatados desta característica em cana-de-açúcar. Nesse trabalho, objetivou-se identificar a existência ou não de pelos nas raízes de cana. Uma vez identificada a presença, buscou-se determinar a existência de variabilidade entre os genótipos e a resposta destes à aplicação de P.

Houve variabilidade genética entre os genótipos nas duas doses de P (Figura 9A), com redução significativa de pelos radicais em resposta ao aumento da dose. Em *Arabidopsis*, Bates e Lynch (1996) relatam a ocorrência de incremento tanto na densidade como no comprimento dos pelos radicais com a redução do nível de P. Com a redução do teor de P, a variação entre os genótipos foi mais pronunciada, com formação de cinco grupos distintos quanto à presença de pelos radicais (Figura 9A). Os genótipos RB947520 e RB72454 foram aqueles com maiores notas, 4,5 e 5,0, respectivamente e RB928064, RB99395, RB977514 e RB93509 formaram o grupo inferior, com notas variando de 1,5 a 2,0 (Figura 9 A, B e C).



**Figura 9** – (A) Pelos radicais em 19 genótipos de cana-de-açúcar em dois níveis de P. Valores seguidos pela mesma letra, em cada nível de P, pertencem ao mesmo agrupamento de acordo com o teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. As barras representam o desvio padrão da média (n=3). Baixo P = 20 mg dm<sup>-3</sup>; Alto P = 200 mg dm<sup>-3</sup>. Notas: 0, ausência de pelos radicais; 5, maior densidade e comprimento dos pelos radicais; 1-4, densidade e comprimento intermediário de pelos radicais. (B) = RB72454, e (C) = RB928064, genótipos considerados padrões para densidade e comprimento de pelos radicais, em baixo nível de P.

Trabalhos com diferentes espécies têm demonstrado elevada relação entre genótipos eficientes ao P e alta concentração de pelos nas raízes (Yan et al., 1995; Gahoonia and Nielsen, 1997 e 1998; Narang et al., 2000; Yan et al., 2004). Entretanto, isto não ocorreu em todos os genótipos neste trabalho. O genótipo RB008041, considerado tolerante e altamente eficiente na absorção de P, apresentou baixa densidade de pelos radicais. Isso se explica pela sua alta capacidade de produção de raízes finas, o que proporciona um efeito compensatório, devido as RF possuírem função semelhante à dos pelos radicais na absorção de nutrientes.

Segundo Lynch (2007), variações genotípicas no comprimento e densidade de pelos radicais na cultura do milho e do feijão são controladas por diversos locos de características quantitativas (QTLs), sugerindo que esses caracteres podem ser selecionados em programas de melhoramento por meio da seleção assistida por marcadores bem como através da seleção fenotípica direta.

### **3.3.5. Caráter morfológico e fisiológico da biomassa aérea**

O aumento do nível de P influenciou significativamente a área foliar (AF) e taxa fotossintética (TFS), proporcionando incremento nos dois caracteres (Tabela 15). Em média, a AF em alto P foi aproximadamente três vezes superior a AF em baixo P, indicando que este caráter é altamente influenciado pela disponibilidade do P no solo. Resultados semelhantes foram relatados para outras culturas (Halsted e Lynch, 1996; Chiera et al., 2002; Fujita et al., 2004; Chaudhary et al., 2008). Na condição de alto P ocorreu a formação de três grupos, com configurações, em geral, semelhantes às apresentadas para MAS (Figura 5A). A exceção ocorreu com o genótipo RB988137, que alocou-se no grupo de menor AF, apesar de pertencer ao grupo dos genótipos com maior produção de parte aérea seca.

Em baixa disponibilidade de P, houve maior variabilidade entre os genótipos, com formação de quatro grupos. Os genótipos RB008041, RB947520 e RB72454 obtiveram as maiores áreas foliares. Os genótipos mais tolerantes ao baixo P tenderam a apresentar maior AF (a exemplo da RB72454) e maior MAS, como demonstrado pela elevada magnitude de correlação (0,941) e pelo efeito direto positivo (0,279) da AF sobre MAS (Tabela 14). Em contrapartida, os genótipos menos tolerantes ao baixo P, RB966928, RB987935, RB99395, RB93509 e RB957610, apresentaram também, menor área foliar.

**Tabela 15** - Médias da área foliar (AF) em cm<sup>2</sup> e taxa fotossintética (TFS) em  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  em 19 genótipos de cana-de-açúcar em dois níveis de fósforo

Genótipos	Baixo P		Alto P	
	AF	TFS	AF	TFS
RB92579	281,95 b	29,43 a	772,50 a	30,19 b
RB966928	144,69 d	30,01 a	758,22 a	32,19 b
RB987935	168,62 d	22,40 b	691,76 a	25,07 c
RB928064	252,64 c	30,29 a	802,70 a	32,42 b
RB99395	150,42 d	26,70 a	719,02 a	32,29 b
RB988082	300,23 b	34,52 a	628,34 b	38,63 a
SP813250	228,11 c	30,14 a	639,57 b	34,58 b
RB937570	305,78 b	29,23 a	840,56 a	33,84 b
RB977514	222,96 c	26,39 a	714,64 a	33,59 b
RB008340	213,22 c	16,47 c	473,82 c	29,10 b
RB855156	242,74 c	27,52 a	536,76 c	36,29 a
RB027053	260,94 b	30,83 a	756,54 a	35,56 a
RB93509	171,46 d	24,66 b	515,01 c	35,90 a
RB008041	394,51 a	29,10 a	783,37 a	31,55 b
SP801842	279,93 b	27,76 a	617,30 b	33,06 b
RB947520	332,25 a	25,44 b	878,43 a	27,38 c
RB72454	372,87 a	31,32 a	765,40 a	36,07 a
RB988137	225,38 c	23,81 b	504,04 c	30,74 b
RB957610	138,35 d	29,59 a	387,74 c	31,38 b
Média	246,68	27,66	672,93	32,62
CV (%)	12,77	10,54	12,32	10,95

Valores seguidos pela mesma letra na coluna pertencem ao mesmo agrupamento de médias pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Baixo P = 20 mg dm<sup>-3</sup>; Alto P = 120 mg dm<sup>-3</sup>.

Segundo Lynch et al. (1991), uma das mais precoces e mais pronunciadas resposta à deficiência de P é o decréscimo na produção de matéria seca, especialmente no número e tamanho das folhas. Chaudhary et al. (2008), em trabalho realizado com a cultura da soja, indicaram que a seleção para incremento na absorção de P e área foliar podem ser utilizadas para melhorar a tolerância dos genótipos em ambientes com baixa disponibilidade do nutriente. Além disso, esses autores ressaltam que a identificação das bases fisiológicas de adaptação das culturas para condições de baixo P através do desenvolvimento foliar, como as taxas fotossintéticas, pode acelerar o processo de seleção nos programas de melhoramento, com vistas ao incremento de produtividade em

ambientes com baixos teores de P. Isso se deve ao fato de que a limitação de P pode reduzir diretamente a fotossíntese através de efeitos sobre o desenvolvimento da área foliar e da capacidade fotossintética por unidade de área foliar (Radin e Eidenbock, 1984).

Diante da grande importância do fósforo na cadeia fotossintética, foi feita a mensuração da assimilação líquida de CO<sub>2</sub>, a qual é uma forma indireta de calcular a taxa fotossintética nas plantas. O incremento na taxa fotossintética foi estatisticamente significativo, mas não apresentou elevada magnitude, com médias iguais a 27,9 e 32,6  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  nas doses alta e baixa, respectivamente (Tabela 15). Este resultado discorda de outros trabalhos conduzidos em outras espécies, cujas taxas fotossintéticas foram muito sensíveis ao teor de P (Fredeen et al., 1989; Yong-fu et al., 2006; Chaudhary et al., 2008). Fujita et al. (2004), relatam que o processo de fotossíntese é altamente influenciado pelas alterações ambientais. A pequena influência do teor de P sobre a taxa fotossintética nos genótipos de cana-de-açúcar pode ser devida ao metabolismo C4 da espécie, o qual é menos afetado por alterações ambientais (Halsted e Lynch, 1996).

Não houve relação entre TFS e tolerância ao baixo P. A variabilidade genética entre os genótipos em baixo P foi relativamente baixa, com formação de apenas três grupos. O grupo superior foi composto por quatorze genótipos e apresentou taxa média de 29,8  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; o grupo intermediário foi formado por três genótipos e apresentou taxa média de 23,8  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e o grupo inferior foi composto apenas pelo genótipo RB008340, com taxa fotossintética de 16,5  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Estes resultados demonstram que, apesar da fotossíntese ser afetada pela dose de P, esta variável não deve ser utilizada como critério de seleção para tolerância ao baixo P em cana-de-açúcar.

### 3.4. Conclusões

Existe variabilidade genética para todos os caracteres estudados em ambos os níveis de fósforo.

Os caracteres área foliar, eficiência de absorção de fósforo e comprimento das raízes finas apresentam relação direta com a tolerância à baixa disponibilidade de fósforo no solo.

Este trabalho permite que alguns genótipos sejam utilizados como possíveis genitores para estudo futuros da herança de caracteres relacionados com a tolerância à baixa disponibilidade de fósforo no solo.

### 3.5. Referências Bibliográficas

- Akthar, M.S.; Oki, Y.; Adachi, T. Genetic variation in phosphorus acquisition and utilization efficiency from sparingly soluble P-sources by Brassica cultivars under P-stress environment. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 194:380-392, 2008.
- Aziz, T.; Pahrnatuttah, M.; Maqsood, A.; Mansoor, T. Differences in phosphorus absorption, transport and Utilization by twenty rice (*oryza sativa* l.) Cultivars. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 42:8-15, 2005.
- Alvarez, V. Determinação e uso do fósforo remanescente. *Boletim informativo [S.I.]*, 25:1, 2000.
- Bates, T.R.; Lynch, J.P. Stimulation of root hair elongation in *Arabidopsis thaliana* by low phosphorus availability. *Plant, Cell and Environment*, 19:529-538, 1996.
- Blackburn, F. Sugar-cane. New York, Longman, 414 p, 1984.

- Bouwman, A.F.; Beusen, A.H.W.; Billen, G. Human alteration of the global nitrogen and phosphorus soil balances for the period 1970-2050. *Global Biogeochem Cycles* 23: GB0A04. doi:10.1029/2009GB003576, 2009.
- Braga, J.M.; Defelipo, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. *21:113:73-85*, 1974.
- Chaudhary, M.I.; Adu-Gyamfi, J.J.; Saneoka, H.; Nguyen, N.T.; Suwa, R.; Kanai, S.; El-Shemy, H.A.; Lightfoot, D.A.; Fujita, K. The effect of phosphorus deficiency on nutrient uptake, nitrogen fixation and photosynthetic rate in mashbean, mungbean and soybean. *Acta Physiologiae Plantarum*, 30:4:537-544, 2008.
- Cheavegatti-Gianotto, A.; Abreu, H.M.C.; Arruda, P. et al. Sugarcane (*Saccharum X officinarum*): A Reference Study for the Regulation of Genetically Modified Cultivars in Brazil. *Tropical Plant Biology*, 4:62-89:2011.
- Chiera, J.; Thomas, J.; Rufty, T. Leaf initiation and development in soybean under phosphorus stress. *Journal of Experimental Botany*, 53:368:473-481, 2002.
- Cordell, D.; Drangert, J.O.; White, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environ Chang*, 19:292-305, 2009.
- Cruz, C.D.; Regazzi, A.J.; Carneiro, P.C.S. Modelos Biométricos Aplicados ao Melhoramento Genético. Viçosa - UFV, 480p, 2004.
- Cruz, C.D. Programa genes: aplicativo computacional em genética e estatística. Viçosa: UFV 648p, 2006.
- FAO, 2011. FAOSTAT database. <http://faostat3.fao.org/home/index.html>.
- Flexas, J.; Diaz-Espejo, A.; Galmés, J.; Kaldenhoff, R.; Medrano, H.; Ribas-Carbo, Rapid, M. Variations of mesophyll conductance in response to changes in CO<sub>2</sub> concentration around leaves. *Plant Cell Environ*. 30:10:1284-98, 2007.

- Fredeen, A.L.; Rao, I.M.; Terry, N. Influence of phosphorus nutrition on growth and carbon partitioning in *Glycine max*. *Plant Physiology*, 89:225-230, 1989.
- Fujita, K.; Kai, Y.; Takayanagi, M.; El-Shemy, H.; Adu-Gyamfi, J.J.; Mohapatra, P.K. Genotypic variability of pigeonpea in distribution of photosynthetic carbon at low phosphorus level. *Plant Science*, 166:641-649, 2004.
- Gahoonia, T.S.; Nielsen, N.E. Variation in root hairs of barley cultivars doubled phosphorus uptake from soil. *Euphytica*, 98:177-182, 1997.
- Gahoonia, T.S.; Nielsen, N.E. Direct evidence on participation of root hairs in Phosphorus ( $^{32}\text{P}$ ) uptake from soil. *Plant and Soil*, 198:147-152, 1998.
- Halsted, M.; Lynch, J.P. Phosphorus responses in C3 and C4 species, *Journal of Experimental Botany*, 47:497-505, 1996.
- Hinsinger, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant Soil*, 237:173-195, 2001.
- Hirel, B.; Le Gouis, J.; Ney, B.; Gallais, A. 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 Experimental Botany*, 58:2369-2387, 2007.
- Hoagland, D.R.; Arnon, D.I. The water culture method for growing plants without soil. Berkely, CA: California Agriculture Experiment Station, 1938.
- Hodge, A. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *New Phytologist*, 162:9-24, 2004.
- Hodge, A. Root decisions. *Plant Cell Environment*, 32:628-640, 2009.

- Lambers, H.; Atkin, O.; Millenaar, F.F. Respiratory patterns in roots in relation to their functioning, p. 521-552. In: Y. Waisel, A. Eshel, and K. Kafkaki (eds.). *Plant Roots, the Hidden Half*. Marcel Dekker, Inc, New York, New York, 2002.
- Liao, H.; Rubio, G.; Yan, X.L.; Cao, A.Q.; Brown, K.M.; Lynch, J.P. Effect of phosphorus availability on basal root shallowness in common bean. *Plant and Soil*, 232:69-79, 2001.
- Liao, H.; Yan, X.L.; Rubio, G.; Pedraza, F.; Beebe, S.; Lynch, J.P. Genetic mapping of basal root gravitropism and phosphorus acquisition efficiency in common bean. *Functional Plant Biology*, 31:1-12, 2004.
- López-Bucio, J.; Cruz-Ramírez, A.; Herrera-Estrella, L. The role of nutrient availability in regulating root architecture. *Current Opinion in Plant Biology*, 6:280-287, 2003.
- Lynch J, Lauchli A, Epstein E. Vegetative growth of the common bean in response to phosphorus nutrition. *Crop Science* 31:2:380-387, 1991.
- Lynch, J.P. Root Architecture and plant productivity. *Plant Physiology*, 109:7-13, 1995.
- Lynch, J.P. Root architecture and nutrient acquisition. In: H. BassiriRad (ed.). *Nutrient Acquisition by Plants. An Ecological Perspective*. Springer-Verlag, Heidelberg. 147-183, 2005.
- Lynch, J.P.; Ho, M.D. Rhizoeconomics. Carbon costs of phosphorus acquisition. *Plant Soil*, 269:45-56 ,2005. Lynch, J.P.; Brown, K.M. Whole-plant adaptations to low phosphorus availability In: Huang, B. (Ed.), *Plant–Environment Interactions*. CRC Press Inc., Boca Raton, 209-242, 2006.
- Lynch, J.P. Roots of the second green revolution. *Australian Journal of Botany*, 55:493-512, 2007.

- Lynch, J.P.; Brown, K.M. Root strategies for phosphorus acquisition. In PJ White, JP Hammond, eds, *The Ecophysiology of Plant-Phosphorus Interactions*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, p.83–116, 2008.
- Maia, C.; Dovale, J.C.; Fritsche-Neto, R.; Cavatte, P.C.; Miranda, G.V. The difference between breeding for nutrient use efficiency and for nutrient stress tolerance, *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 11:270-275, 2011.
- Marschner, H. *Mineral Nutrition of Higher Plants* (2nd edn), Academic Press. 1995.
- Marschner, H. *Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd edn), Academic Press, 2012.
- Miller, C.R.; Ochoa, I.; Nielsen, K.L.; Beck, D.; Lynch, J.P. Genetic variation for adventitious rooting in response to low phosphorus availability: potential utility for phosphorus acquisition from stratified soils. *Functional Plant Biology*, 30:973-985, 2003.
- Narang, R.A.; Bruene, A.; Aitmann, T. Analysis of phosphate acquisition efficiency in *Arabidopsis* accessions. *Plant Physiology*, 124:1786-1799, 2000.
- Ochoa, I.E.; Blair, M.W.; Lynch, J.P. QTL analysis of adventitious root formation in common bean under contrasting phosphorus availability. *Crop Science*, 46:1609-1621, 2006.
- Passos, L.P. *Métodos analíticos e laboratoriais em fisiologia vegetal*. Coronel Pacheco: EMBRAPA, 1996.
- Pérez-Torres, C.; López-Bucio, J.; Cruz-Ramírez, A.; Ibarra-Laclette, E.; Dharmasiri, S.; Estelle, M.; Herrera-Estrella, L. Phosphate availability alters lateral root development in *Arabidopsis* by modulating auxin sensitivity via a mechanism involving the TIR1 auxin receptor. *The Plant Cell*, 20:3258-3272, 2008.
- Radin, J.W.; Eidenbock, M.P. Hydraulic conductance as a factor limiting leaf expansion of phosphorus-deficient cotton plants. *Plant Physiology*, 75:372-377, 1984.

- Ramaekers, L.; Remans, R.; Rao, I.; Blair, M.; Vanderleyden, J. Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants. *Field Crop Research*, 117:169-176, 2010.
- Richardson, A.E.; Lynch, J.P.; Ryan, P.R.; Delhaize, E.; Smith, F.A.; Smith, S.E.; Harvey, P.R.; Ryan, M.H.; Veneklaas, E.J.; Lambers, H.; Oberson, A.; Culvenor, R.A.; Simpson, R.J. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. *Plant Soil*, 349:121-156, 2011.
- Sato, A.M.; Tiago A. Catuchi, T.A.; Ribeiro, R.V.; Souza, G.M. The use of network analysis to uncover homeostatic responses of a drought-tolerant sugarcane cultivar under severe water deficit and phosphorus supply. *Acta Physiologiae Plantarum*, 32:1145-1151, 2010.
- Shen, J.; Yuan, L.; Zhang, J.; Li, H.; Bai, Z.; Chen, X.; Zhang, W.; Zhang, F. Phosphorus dynamics: From soil to plant. *Plant Physiology*, 156:997-1005, 2011.
- Smith, D.M.; Inman-Bamber, N.G.; Thorburn, P.J. Growth and function of the sugarcane root system, *Field Crops Research*, 92:169-183, 2005.
- Vance, C.P., Uhde-Stone, C., Allan, D.L. Phosphorus acquisition and use, critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 157:423-447, 2003.
- Vance, C.P. e Chiou, T.J. Phosphorus Focus Editorial. *Plant Physiology*, 156:987-988, 2011.
- Vieira, R.F.; Jochua, C.N.; Lynch, J.P. Method for evaluation of root hairs of common bean genotypes, *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 42:9:1365-1368, 2007.
- Waclawovsky, A.J.; Sato, P.M.; Lembke, C.G.; Moore, P.H.; Souza, G.M. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. *Plant Biotechnology Journal*, 8:263-276, 2010.

- Yan, X.L.; Liao, H.; Beebe, S.E.; Blair, M.W.; Lynch, J.P. QTL mapping of root hair and acid exudation traits and their relationship to phosphorus uptake in common bean. *Plant and Soil*, 265: 17-29, 2004.
- Wang, L.; Liao, H.; Yan, X.; Zhuang, B.; Dong, Y. Genetic variability for root hair traits as related to phosphorus status in soybean. *Plant and Soil* 261:77-84, 2004.
- Wang, X.; Shen, J.; Liao, H. Acquisition or utilization, which is more critical for enhancing phosphorus efficiency in modern crops? *Plant Science*, 179:302-306, 2010.
- Wenzl, P.; Arango, A.; Chaves, A.L.; Buitrago, M.E.; Patino, G.M.; Miles, J.; Rao, I.M. A greenhouse method to screen Brachiaria grass genotypes for aluminum resistance and root vigor. *Crop Science*, 46:2:968-973, 2006.
- Wissuwa, M.; Mazzola, M.; Picard, C. Novel approaches in plant breeding for rhizosphere-related traits, *Plant Soil*, 321:409-430, 2009.
- Yan, X.; Liao, H.; Beebe, S.E.; Blair, M.W.; Lynch, J.P. QTL mapping of root hairs and acid exudation traits and their relationship to phosphorus uptake in common bean. *Plant Soil*, 265:17-29, 2004.
- Yong-fu, L.; An-cheng, L.; Hassan, M.J.; Xing-hua, W. Effect of Phosphorus Deficiency on Leaf Photosynthesis and Carbohydrates Partitioning in Two Rice Genotypes with Contrasting Low Phosphorus Susceptibility. *Rice Science*, 13:4:283-290, 2006.
- Zhu J.; Lynch, J.P. The contribution of lateral rooting to phosphorus acquisition efficiency in maize (*Zea mays* L.) seedlings. *Functional Plant Biology*, 31:949-958, 2004.

#### **4. Considerações Finais**

Este trabalho foi realizado em Viçosa/MG utilizando genótipos de cana-de-açúcar pertencentes ao Banco de Germoplasma do Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar (PMGCA) RIDESA/UFV e teve como objetivos: i) determinar a existência de variabilidade genética para caracteres relacionados a eficiência no uso de P em alta e baixa disponibilidade deste nutriente; ii) identificar caracteres morfológicos e fisiológicos relacionados a eficiência no uso de P; iii) classificar os genótipos quanto sua eficiência de produção em baixa disponibilidade de P e iv) classificar os genótipos quanto sua resposta produtiva com o aumento da disponibilidade de P.

*As principais conclusões do trabalho foram:*

- 1) Existe variabilidade genética entre os genótipos para eficiência no uso de fósforo (eficiência de absorção de P) e (eficiência de utilização de P) assim como para maioria dos caracteres avaliados.
- 2) O comportamento dos genótipos difere em relação à disponibilidade de P.
- 3) Em baixa disponibilidade de P, a eficiência de absorção de P é mais efetiva na discriminação dos genótipos superiores em produção de massa seca comparada a eficiência de utilização de P. O contrário ocorre em alta disponibilidade de P.
- 4) Área foliar e comprimento de raízes finas apresentam alta correlação com eficiência de produção em baixo P, o que demonstra a utilidade destes caracteres na seleção indireta de genótipos tolerantes ao estresse por baixo P nos solos.
- 5) A taxa fotossintética é reduzida com a diminuição no nível de P, no entanto, não ocorre relação entre a taxa fotossintética e eficiência de produção de massa seca.

- 6) Utilização de metodologias para seleção precoce para eficiência de produção em cana-de-açúcar parece ser viável, pois a composição dos grupos na produção de massa da parte aérea seca foi semelhante em ambos os experimentos.
- 7) Os genótipos RB008041, RB72454, RB92579 e SP80-1842 são os que apresentam maior tolerância à baixa disponibilidade de P no solo.
- 8) Os genótipos RB957610, RB966928, RB93509, RB987935 e RB99395 são os mais sensíveis à baixa disponibilidade de P no solo.
- 9) A variedade RB99395 apresenta maior resposta na produção de massa seca aérea com o incremento do P.