

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**EFICIÊNCIA DE ABSORÇÃO E UTILIZAÇÃO
DE FÓSFORO EM BATATA CULTIVADA *in vitro***

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Gabriel Y Castro

**Santa Maria, RS, Brasil
2009**

**EFICIÊNCIA DE ABSORÇÃO E UTILIZAÇÃO
DE FÓSFORO EM BATATA CULTIVADA *in vitro***

por

Gabriel Y Castro

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, Área de Concentração em Produção Vegetal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Agronomia.**

Orientador: Prof. Fernando Teixeira Nicoloso

Santa Maria, RS, Brasil

2009

C355e Castro, Gabriel Y, 1982-
Eficiência de absorção e utilização de fósforo em batata cultivada *in vitro* / por Gabriel Y Castro ; orientador Fernando Teixeira Nicoloso. - Santa Maria, 2009.
52 f. ; il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, RS, 2009.

1. Agronomia 2. *Solanum tuberosum* 3. Batata 4. Fósforo 5. Eficiência de absorção e utilização 6. Índice de eficiência ao P I. Nicoloso, Fernando Teixeira, orient. II. Título

CDU: 633.937

Ficha catalográfica elaborada por
Luiz Marchiotti Fernandes – CRB 10/1160
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

© 2009

Todos os direitos autorais reservados a Gabriel Y Castro. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Rua Ângelo Strapazon, n. 388, Centro, Ijuí, RS, 98700-000

Fone (0xx)55 33325234; End. Eletr: gabrycastro@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-graduação em Agronomia**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**EFICIÊNCIA DE ABSORÇÃO E UTILIZAÇÃO
DE FÓSFORO EM BATATA CULTIVADA *in vitro***

elaborada por
Gabriel Y Castro

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Agronomia

Comissão Examinadora:

Fernando Teixeira Nicoloso, Dr.
(Presidente/Orientador)

Dilson Antônio Bisognin, Dr. (UFSM)

Etiane Caldeira Skrebsky, Dra. (UERGS)

Santa Maria, 26 de Fevereiro de 2009.

Dedico este trabalho
ao meu pai Castelo, à minha mãe Hilda,
aos meus irmãos Felipe e Letícia e
à minha Fabíola.
O amor de vocês me dá a força.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, meu pai e colega, minha mãe, meu mano e minha mana. Vocês deram o suporte e o incentivo necessário em absolutamente tudo.

Especial agradecimento à minha amada Fabíola, pela motivação, carinho e compreensão.

Agradeço ao meu orientador, Fernando, pelos ensinamentos, amizade e valioso exemplo.

Muito agradeço aos meus colegas do Laboratório de Biotecnologia Vegetal: Luciane Tabaldi, Liana, Nicéia, Denise, Júlia, Sibila, Jader, Dharmendra, Gabriel S., Vanessa, Joseila, Etiane, Renata e Jamile. Na 3133 a ajuda e companheirismo de vocês foram essenciais, desde a época da graduação.

Obrigado à Fabiane Antes do Laboratório de Análises Químicas, Industriais e Ambientais do Departamento de Química, pela cooperação.

Um obrigado ao professor Dilson pela co-orientação e também aos demais professores realmente comprometidos com a função no PPGA.

Aos colegas da Pós-graduação Maurício, Josuel, Carlos, Bernardo e Ivan, obrigado pelo companheirismo.

Agradeço aos colegas Agrônomos Franceschi, Rozalino, Didoné e Alan pela parceria fora de toda essa cadência, durante este período.

Sou grato à Universidade Federal de Santa Maria, pela estrutura; e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela bolsa de estudo.

E agradeço também às demais pessoas que participaram e contribuíram de alguma forma nesta minha trajetória.

*Resta esse sentimento de infância subitamente desentranhado
De pequenos absurdos, essa capacidade
De rir à toa, esse ridículo desejo de ser útil
E essa coragem para comprometer-se sem necessidade.
(...)*

*Resta esse constante esforço para caminhar dentro do labirinto
Esse eterno levantar-se depois de cada queda
Essa busca de equilíbrio no fio da navalha
Essa terrível coragem diante do grande medo, e esse medo
Infantil de ter pequenas coragens.*

Vinicius de Moraes

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-graduação em Agronomia
Universidade Federal de Santa Maria

EFICIÊNCIA DE ABSORÇÃO E UTILIZAÇÃO DE FÓSFORO EM BATATA CULTIVADA *in vitro*

AUTOR: GABRIEL Y CASTRO
ORIENTADOR: FERNANDO TEIXEIRA NICOLOSO
Local e Data da Defesa: Santa Maria, 26 de Fevereiro de 2009.

O estresse causado pela restrição de fósforo (P) às plantas é um dos principais fatores limitantes à produtividade das culturas. Alternativamente à aplicação de fertilizantes fosfatados, este obstáculo à produção vegetal pode ser vencido pelo desenvolvimento de plantas eficientes na absorção e utilização de P. O objetivo deste trabalho foi verificar diferença de comportamento para a eficiência de absorção e utilização de P, bem como a resposta à aplicação em 22 clones de batata (*Solanum tuberosum* e *S. microdontum*) cultivados *in vitro*, e relacionar quais características das plantas estão ligadas a estas habilidades. Aplicaram-se as concentrações de 10 e 100% da concentração padrão de P do meio MS. Determinaram-se variáveis de crescimento e acumulação de P, bem como índices de eficiência de absorção de P e de utilização de P nas raízes, na parte aérea e na planta. Foi verificada ampla variação no comportamento entre os clones de batata testados para eficiência de absorção e utilização de P. A produção de matéria seca juntamente com a acumulação de P foram fundamentais para elencar as diferenças na eficiência ao P entre os clones. Os índices de eficiência de utilização de P mostraram a mesma tendência entre os clones e tiveram relação inversa com a eficiência de absorção. As características de comprimento de raízes e da parte aérea e número de folhas emitidas foram de importância secundária à caracterização da eficiência ao P, estando associadas a somente alguns clones classificados como eficientes. A partição de matéria seca e do conteúdo de P entre raízes e parte aérea não foi relacionada à eficiência ao P em batata. Por outro lado, estas características corroboram com a exposição da variabilidade existente entre clones de batata em função do fornecimento de P. Através da construção de um diagrama para eficiência de utilização de P e resposta à aplicação para a produção de matéria seca de parte aérea, os clones foram classificados como eficientes e responsivos: SMIC148-A, SMIB106-7, SMIG227-2 e Michigan Purple; não-eficientes e responsivos: SMID040-4RY, SMIF313-3, SMIG145-1 e Macaca; não-eficientes e não-responsivos: *S. microdontum*, SMIJ319-7, SMIG274-3, SMIE040-6RY, SMIF212-3, SMIJ461-1 e Asterix; e eficientes e não-responsivos: SMINIA793101-3, SMIJ456-4Y, Dakota Rose, SMINIA00017-6, SMINIA90244-1, SMIJ319-1 e SMINIA97145-2. Estes resultados são indícios da existência de variabilidade genética e, por isso, consistem numa valiosa ferramenta ao melhoramento genético da batata quanto à eficiência de utilização de P e responsividade a adubação fosfatada.

Palavras-chave: batata; fósforo; eficiência de absorção e utilização; índice de eficiência ao P; *Solanum tuberosum*.

ABSTRACT

Master Dissertation
Programa de Pós-graduação em Agronomia
Universidade Federal de Santa Maria

PHOSPHORUS UPTAKE AND USE EFFICIENCY IN POTATO CULTIVATED *in vitro*

AUTHOR: GABRIEL Y CASTRO

ADVISER: FERNANDO TEIXEIRA NICOLOSO

Place and Date of Defense: Santa Maria, February 26th, 2009.

Phosphorus (P) restriction to plants is one of major limiting factors for crop productivity. Alternatively to application of P-containing fertilizer, this obstacle to the vegetal production can be surmounted by developing of efficient plants in P-uptake and use. The objective of this work was to verify if there is behavior difference for P-uptake and use efficiency and response to P-supply in 22 potato clones (*Solanum tuberosum* e *S. microdontum*) cultivated *in vitro*, as well as to report which characteristics of the plants are related to this ability. Concentrations of 10 and 100% of the concentration of P in standard MS medium were applied. Growth parameters and P-accumulation were determined and P-uptake and use efficiency indexes in roots, shoot and plant were calculated. A wide behavior variation among tested potato clones for P-uptake and use efficiency was found. Dry matter production and P-accumulation had together a fundamental role to show the differences in P-efficiency among clones. P-use efficiency indexes showed same trend among clones and had an inverse relation with the uptake efficiency. The characteristics of root and shoot length and leaf number had secondary importance to the characterization of P-efficiency, and these were associated with only a few clones classified as efficient. Dry matter and P content distribution between root and shoot was not related with P-efficiency in potato. Moreover, these characteristics corroborate the exposure of the variability among potato clones according to the supply of P. Potato clones were classified using P-use efficiency index under low P and response to P-supply for shoot dry matter production: efficient-responsive: SMIC148-A, SMIB106-7, SMIG227-2 and Michigan Purple; non-efficient-responsive: SMID040-4RY, SMIF313-3, SMIG145-1 and Macaca; non-efficient-non-responsive: *S. microdontum*, SMIJ319-7, SMIG274-3, SMIE040-6RY, SMIF212-3, SMIJ461-1 and Asterix; and efficient-non-responsive: SMINIA793101-3, SMIJ456-4Y, Dakota Rose, SMINIA00017-6, SMINIA90244-1, SMIJ319-1 and SMINIA97145-2. These results are a valuable tool for genetic improvement of potato to P-use efficiency and response to P-supply.

Key words: potato; phosphorus; uptake and use efficiency; P-efficiency index; *Solanum tuberosum*.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Classificação de 22 clones de batata cultivados *in vitro* quanto à eficiência de utilização de P (EUPPA) sob baixo nível de P e resposta à aplicação para a produção de matéria seca de parte aérea: eficiente e responsivo (ER); não-eficiente e responsivo (NER); não-eficiente e não-responsivo (NENR); eficiente e não-responsivo (ENR).38

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Duração do período de cultivo dos 22 clones de batata (<i>Solanum tuberosum</i> L. e <i>S. microdontum</i> Bitter) utilizados nos experimentos de cultivo <i>in vitro</i>	23
TABELA 2 - Produção de matéria seca (MS) de raízes, da parte aérea e do total da planta e a relação entre matéria seca de raízes e parte aérea (R/PA) de 22 clones de batata cultivados <i>in vitro</i> sob baixo e alto nível de P.	27
TABELA 3 - Comprimento total de raízes, número de folhas e comprimento da parte aérea de 22 clones de batata cultivados <i>in vitro</i> sob baixo e alto nível de P.....	30
TABELA 4 - Conteúdo acumulado de P na matéria seca de raízes, da parte aérea e do total da planta e a relação entre os conteúdos de P nas raízes e parte aérea (P_R/P_{PA}) de 22 clones de batata cultivados <i>in vitro</i> sob baixo e alto nível de P.....	32
TABELA 5 - Eficiências de absorção de P (EAP), utilização de P nas raízes (EUPR), na parte aérea (EUPPA) e na planta (EUPP) de 22 clones de batata cultivados <i>in vitro</i> sob baixo e alto nível de P.....	34

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE A - Concentrações dos componentes nos meios de cultivo utilizados nos experimentos com 22 clones de batata.....	50
APÊNDICE B - Concentração de P na matéria seca da parte aérea e de raízes de 22 clones de batata cultivados <i>in vitro</i> sob baixo e alto nível de P.....	51
APÊNDICE C - Eficiência de utilização de P sob baixo nível de P e resposta à aplicação na produção de matéria seca de raízes (A) e da planta (B) de 22 clones de batata cultivados <i>in vitro</i>	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos	13
1.1.1 Objetivo geral	13
1.1.2 Objetivos específicos.....	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 Batata	14
2.2 Fósforo	17
2.3 Eficiência de absorção e utilização	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1 Cultivo in vitro	22
3.2 Parâmetros de crescimento	23
3.3 Determinação do conteúdo de P	24
3.4 Determinação dos índices de eficiência e classificação dos clones	24
3.5 Análise estatística	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1 Análise do crescimento	26
4.2 Acumulação de P	31
4.3 Índices de eficiência	33
4.4. Classificação dos clones quanto à eficiência de utilização e resposta ao P	36
5 CONCLUSÕES	40
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1 INTRODUÇÃO

A batata é a planta tuberífera mais cultivada no mundo, constituindo uma das mais importantes fontes de energia na alimentação humana, sendo a hortaliça de maior expressão em produção no Brasil (IBGE, 2008). Apesar de sua grande importância econômica, a pesquisa sobre nutrição mineral em batata no país é bastante incipiente.

Para o normal crescimento e desenvolvimento das plantas é necessária uma boa disponibilidade de nutrientes. Em solos de característica predominantemente ácida, como no Estado do Rio Grande do Sul, o fósforo (P) é um dos nutrientes que tem sua disponibilidade reduzida. Em função disso, basicamente duas medidas podem ser tomadas para a manutenção da produção vegetal. A primeira e usualmente mais difundida é o uso de corretivos no solo e o aumento nas doses de fertilizantes fosfatados. A estratégia alternativa seria o desenvolvimento de genótipos de plantas (plantas eficientes ao P) com maior habilidade de crescer e produzir sob condições de solo deficientes em P (WISSUWA et al., 2002; YAN et al., 2004).

Os métodos de cultivo convencionalmente utilizados para a produção de batata caracterizam-se pelo uso indiscriminado de quantidades inadequadas de fertilizantes. A desinformação acerca da aplicação de quantidades ajustadas às variadas situações de cultivo gera também a sujeição dos bataticultores a interesses comerciais (FREIRE, 2003). Deste modo, a aplicação de grandes volumes de fertilizantes na bataticultura é muito frequente (VALE, 2003). Em situações de plantios que empregam quantidades reduzidas às usuais, a falta de informação sobre a eficiência vegetal aos nutrientes também prejudica o desenvolvimento da cultura.

Portanto, a identificação de genótipos de batata e mecanismos determinantes nas plantas à eficiência ao P, que engloba a aquisição e utilização deste nutriente, torna-se requisito imprescindível aos programas de melhoramento genético, uma vez que o aproveitamento do potencial adaptativo de genótipos às condições adversas de fertilidade do solo apresenta-se como solução mais viável. Assim, a justificativa do presente trabalho de pesquisa é reforçada, pela elevação nos custos

de produção e o desperdício de insumos. Já, no aspecto ambiental, essa situação significa a redução de recursos naturais não renováveis que originam esses insumos (MOURA et al., 2001), além de potencializar a contaminação dos cursos d'água.

No entanto, para o emprego do melhoramento vegetal é essencial encontrar uma variabilidade genética útil e suficiente, sendo necessário um número razoavelmente grande de genótipos para classificação (OZTURK et al. 2005). Consequentemente, é de grande importância o uso de sistemas experimentais que otimizem em tempo, espaço e controle das condições experimentais a avaliação das plantas. Uma adequada opção é apresentada pelo cultivo *in vitro*.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi verificar diferença de comportamento para a eficiência de absorção e utilização de P em 22 clones de batata cultivados *in vitro*.

1.1.2 Objetivos específicos

Verificar a resposta à aplicação de P em 22 clones de batata cultivados *in vitro* para a produção de matéria seca, e relacionar quais características das plantas estão ligadas a eficiência e resposta à aplicação deste nutriente.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Batata

A batata é uma planta dicotiledônea, pertencente à família Solanaceae, gênero *Solanum*, o qual contém mais de 2.000 espécies. Destas, são conhecidas cerca de 200 espécies silvestres e 20 cultivadas. Entre as cultivadas, a mais importante economicamente produzida no mundo é a espécie *Solanum tuberosum* ssp. *tuberosum* (HAWKES, 1993). As espécies silvestres têm grande importância em programas de melhoramento pela sua variabilidade (FORTES; PEREIRA, 2003). O centro de origem da batata é localizado próximo da fronteira entre Peru e Bolívia. Foi introduzida na Europa no século XVI, sendo hoje um dos alimentos mais difundidos no mundo (FILGUEIRA, 2003).

É uma das mais importantes culturas, superada em produção total apenas pelo trigo, milho e arroz. A produção mundial no ano de 2007 foi de aproximadamente 321,7 milhões de toneladas, numa área cultivada de 19,3 milhões de hectares (FAO, 2008). No Brasil, é a hortaliça mais importante, com uma área de plantio de 147,8 mil ha e rendimento médio de 24,03 t ha⁻¹, no ano de 2007. Os estados responsáveis por mais de 95% da produção nacional são Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Rio Grande do Sul, Bahia e Santa Catarina (IBGE, 2008).

O Estado do Rio Grande do Sul, em comparação com a média do país, tem menor produtividade, sendo em 2007 de 15,92 t ha⁻¹ (IBGE, 2008); e a área plantada, que neste mesmo ano foi de 24,3 mil ha, vem se reduzindo há décadas. O motivo para estes resultados pode ser atribuído, entre outros fatores, pelo padrão nacional de consumo, pois é verificada uma crescente demanda no consumo de produtos industrializados, sendo muito baixo o fornecimento desta matéria-prima pelo Estado; e também pela preocupação dos consumidores com os resíduos de agroquímicos, levando-os a buscar outros produtos (FIOREZE, 2003). Outra razão para tal rendimento são as características gerais do cultivo, como o uso de batata-mente de baixa qualidade (SOUZA et al., 1999). Pereira (2003) aponta a falta de

cultivares adaptadas às condições da região uma das principais causas dessa situação.

Embora o padrão nacional priorize a batata de película branca, no Estado do Rio Grande do Sul, predominam cultivares de película rosa, sendo as principais a Macaca, a Asterix e a Baronesa (FIOREZE, 2003). Na década de 90, a Baronesa era a cultivar mais plantada no Estado, apresentando rusticidade e alta estabilidade de produção (PEREIRA et al., 2003). Atualmente a cultivar Macaca é uma das mais difundidas e apreciadas no Estado (PEREIRA, 2003) e, assim como a Baronesa, possui aptidão para a mesa (BISOGNIN, 1996). A cultivar Asterix vem apresentando crescimento em área plantada possivelmente pela aceitação nas indústrias de processamento (FIOREZE, 2003). Em comum estas cultivares são suscetíveis ou de baixa resistência à requeima (*Phytophthora infestans*) e à pinta-preta (*Alternaria solani*) (PEREIRA et al., 2003). Assim, o melhoramento genético vem buscando fontes de resistência. No caso da requeima, a espécie diplóide *Solanum microdontum* Bitter é uma das melhores fontes (BISOGNIN; DOUCHES, 2002), na qual a resistência em alguns acessos já foi mapeada (BISOGNIN et al., 2005).

Outros clones também têm sido estudados quanto à produtividade e à qualidade de tubérculos com qualidade para processamento industrial (BISOGNIN et al., 2008). Estes autores verificaram entre os clones estudados que SMINIA793101-3 apresentou a maior produtividade de tubérculos, mas com características inaceitáveis pela indústria de processamento. Os clones SMIC148-A, SMIJ456-4Y e SMIJ461-1 apresentaram produtividade similar à da cultivar Asterix, porém superaram em qualidade de tubérculo a cultivar Asterix e o clone SMINIA793101-3.

Diversas variáveis condicionam o desempenho da planta de batata. Dentre as manipuláveis pelo homem, o manejo nutricional é um dos mais importantes (WESTERMANN; DAVIS, 1992). Do mesmo modo, os nutrientes são fundamentais no crescimento e desenvolvimento da batata. Embrapa (1999) relatou que os fertilizantes representam o segundo maior custo na produção da batata, aproximadamente 15%, após os custos com batata-semente (35%). No entanto, os fertilizantes têm especial importância, pois, além dos custos, influenciam o custo e a qualidade da semente produzida.

Bregagnoli et al. (2004) verificou que cultivares de batata possuem respostas diferentes entre si para a absorção de nutrientes, o que confere papel fundamental à obtenção de matéria-prima de qualidade e alta produtividade. Apesar das diferenças

genéticas, os elementos nutritivos absorvidos em maiores quantidades pela cultura da batata seguem uma tendência: potássio e nitrogênio primeiramente, seguidos do cálcio, enxofre, fósforo e magnésio (PREZOTTI et al., 1986). As exigências nutricionais variam conforme o estágio de desenvolvimento da batata. No caso do nitrogênio, potássio, magnésio e enxofre, o máximo de absorção ocorre entre 40 e 50 dias após a emergência; enquanto que para fósforo e cálcio isto ocorre durante todo o ciclo (TAVARES et al., 2002).

No Estado do Rio Grande do Sul, os solos onde se cultiva batata variam quanto às características físicas e químicas. No que diz respeito à fertilidade, em geral, possuem acidez elevada, com teores tóxicos de alumínio e manganês, e baixos teores dos nutrientes fósforo, cálcio e magnésio (FREIRE, 2003). Mesmo tolerando uma acidez moderada no solo, a batata apresenta decréscimos de produção em solos com pH abaixo de 5,0 pela própria ação da acidez e devido à diminuição da disponibilidade de nutrientes e aumento da disponibilidade de alumínio trocável (CASTRO, 1983). Tabaldi et al. (2007) observaram que concentrações crescentes de alumínio em solução nutritiva causam estresse oxidativo em clones de batata, podendo prejudicar vários componentes celulares, principalmente nos clones sensíveis a este metal. Por outro lado, valores de pH acima de 5,5 favorecem a ocorrência da bactéria *Streptomyces scabies*, causadora da sarna-comum (LORIA et al., 1997). Assim, foi estabelecido para a cultura da batata no Estado a aplicação de calcário para atingir pH 5,5 (COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RIO GRANDE DO SUL/SANTA CATARINA – CQFS-RS/SC, 2004).

Outra medida possível para a correção e manutenção da produção em solos cultivados com batata é a aplicação de fertilizantes. Em relação à correção com fósforo, a prática pode ser conduzida mediante análise do solo, que interpreta o teor deste nutriente conforme o teor de argila. As recomendações para a correção dos solos com os menores teores de fósforo, indicadas pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC (2004), são de aplicar 280 e 360 Kg de P_2O_5 ha⁻¹, respectivamente para expectativas de rendimentos menores e maiores que 20 t ha⁻¹. Para cultivos subsequentes, aplicar 120 e 140 Kg de P_2O_5 ha⁻¹, conforme a expectativa de rendimento.

A busca pela melhoria dos procedimentos que envolvem o desenvolvimento da cultura da batata tem estimulado a pesquisa. Muitos destes estudos são

realizados através de técnicas de cultivo *in vitro*. Seus objetivos são diversificados, visam à produção de minitubérculos para áreas com problemas sanitários para a produção de batata-semente (HAVERKORT et al., 1991; RANALLI et al., 1994; KAWAKAMI et al., 2003); manutenção de bancos de germoplasma (ROCA et al., 1991; FORTES; PEREIRA, 2001); controle de condições experimentais, especialmente trabalhos sobre nutrição mineral e expressão gênica ligada à nutrição (GORDON-WEEKS et al. 2003; BAO et al., 2009); entre outros.

2.2 Fósforo

O macronutriente P desempenha nas plantas importantes funções na armazenagem de energia e na integridade estrutural das membranas. Além disso, compõe a estrutura de compostos vitais das células vegetais como fosfato-açúcares, intermediários da respiração e fotossíntese. Também é constituinte de nucleotídeos dos ácidos nucléicos (DNA e RNA) (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Apesar de ser o quinto nutriente em ordem decrescente de absorção, o P é o elemento que promove aumentos mais significativos na produtividade da batata. Atua na planta como condicionador da produção, estimulando a formação de tubérculos, apressando a maturação, reduzindo o ciclo cultural e aumentando a percentagem de tubérculos graúdos (PREZOTTI et al., 1986).

A deficiência de P está entre os principais estresses abióticos que limita a produtividade das culturas, ocorrendo em 30-40% das terras aráveis do mundo (von UEXKÜLL; MUTERT, 1995). Em função disso, grandes quantidades de fertilizantes fosfatados são aplicadas todos os anos nos solos, mas menos de 20% do que é fornecido fica disponível às raízes das plantas (HOLFORD, 1997). Estima-se que o uso de fertilizantes fosfatados aumentou aproximadamente quinze vezes entre os anos de 1960 e 2000, sendo projetado para aumentar ainda mais (VANCE, 2001). Por outro lado, os solos carregados em P, quando lixiviados, configuram um dos fatores principais da eutrofização e hipoxia de lagos e estuários marinhos (RUNGE-METZGER, 1995; McDOWELL, et al., 2004). Outra questão que envolve este procedimento é a previsão da depleção das reservas não-dispendiosas de rochas fosfatadas em 60-80 anos (VANCE, 2001). Portanto, medidas alternativas de manejo

sustentável devem ser tomadas para a manutenção da produção das culturas, tão dependentes deste nutriente.

No Estado do Rio Grande do Sul, onde predominam solos ácidos de pH igual ou inferior à 5,5, a baixa disponibilidade de P é apresentada em cerca de 58% dos solos, com teores baixo e muito baixo, pela tendência em formar compostos, principalmente com Fe e Al, de muito baixa solubilidade (BISSANI et al., 2004). O P encontrado dos solos do Rio Grande do Sul possui teores médios de 53% na forma orgânica e de 13 a 30% na forma inorgânica (RHEINHEIMER et al., 1999). Assim, a importância do P orgânico do solo como uma fonte de P disponível às plantas depende da solubilização a fosfato inorgânico (Pi) (HORST et al. 2001), uma vez que esta é a forma de P que é mais rapidamente absorvido pela planta (RAGHOTHAMA, 1999). Desse modo, vários tipos de fosfatases exsudadas pelas plantas atuam na hidrólise de P orgânico no solo, podendo liberar Pi para as plantas (YADAV; TARAFDAR, 2003).

Frequentemente, a concentração de Pi disponível na solução do solo ($\sim 0,062 \text{ mg L}^{-1}$) é várias ordens de magnitude menor do que aquela presente nos tecidos de plantas ($155\text{-}620 \text{ mg L}^{-1}$) (RAGHOTHAMA, 1999). Para batata, estes teores variam conforme o tecido e declinam com o desenvolvimento da planta (KOLBE; STEPHAN-BECKMANN, 1997a,b). O Pi tem fundamental papel na determinação da arquitetura da raiz (LYNCH, 1995) e também na nutrição de plantas (DARRAH, 1993). Com relação ao metabolismo primário, o Pi está envolvido na regulação de várias enzimas tais como do metabolismo de carboidratos (PLAXTON, 1996; PLAXTON; CARSWELL, 1999), RNases (GREEN, 1994) e fosfatases (DUFF et al., 1994). Em adição, a fosforilação e desfosforilação de proteínas são cruciais às rotas de transdução de sinal nas plantas (RAGHOTHAMA; KARTHIKEYAN, 2005).

Devido às suas fortes interações com os componentes do solo, a principal forma de aquisição do Pi pelas raízes é a difusão, e não o fluxo de massa (HINSINGER, 2001). O Pi é absorvido na superfície radicular, resultando numa zona de depleção imediatamente adjacente à raiz. Como visto anteriormente, a concentração deste nutriente da solução do solo para as células da planta é mais de 2000 vezes maior (BIELESKI, 1973; SCHACHTMAN et al., 1998). Este gradiente altamente desfavorável à absorção é vencido pela planta através de transportadores da membrana plasmática. Os transportadores de Pi podem ser de alta afinidade, atuando em K_m entre 3 e $10 \mu\text{M}$, e de baixa afinidade, que operam com K_m de 50 a

300 μM (NANDI et al. 1987; FURIHATA et al. 1992). K_m é uma constante numericamente igual à concentração de soluto que gera a metade da taxa máxima de transporte mediado por carregadores (TAIZ; ZEIGER, 2004). Os transportadores de alta afinidade são preferencialmente expressados em raízes e muitos são induzidos sob deficiência de P (RAGHOTHAMA, 1999; 2000).

Estudos sobre nutrição mineral de plantas em cultivo *in vitro* têm mostrado diversas alterações sob deficiência de P. Russowski e Nicoloso (2003), variando isoladamente concentrações de nitrogênio e de P no meio MS (MURASHIGE; SKOOG, 1962), verificaram efeitos expressivamente negativos em características foliares e de produção de matéria seca de plantas de *Pfaffia glomerata* submetidas a baixas concentrações destes nutrientes, demonstrando que o crescimento desta espécie já é limitado em concentrações menores que 80% da concentração padrão destes elementos no meio MS. Para Leifert et al. (1995), a concentração de P do meio MS foi muito baixa para sustentar o crescimento normal de plantas de *Hemerocallis*, *Iris* e *Delphinium*.

2.3 Eficiência de absorção e utilização

Existem diversos conceitos para eficiência nutricional de plantas. Enfatizando a produtividade, eficiência nutricional pode ser definida como a capacidade da planta em produzir alto rendimento em um meio que possua características que afetem diretamente a produção-padrão (MACHADO et al., 2001). Já sob ponto de vista do requerimento interno de determinado nutriente na planta, geralmente a eficiência é conceituada como a biomassa produzida por unidade de nutriente aplicada no solo, que depende de dois componentes principais: a eficiência de aquisição e a eficiência de utilização (BAILIAN et al., 1991). O primeiro componente depende das eficiências de absorção e de enraizamento. Já o segundo componente depende das eficiências de translocação e de conversão em biomassa.

Em se tratando de P, Gerloff (1976) considera que plantas eficientes são aquelas que produzem maior quantidade de matéria seca por unidade de P absorvido. Clark e Brown (1974) definem como eficientes aquelas plantas que acumulam maiores concentrações de P quando cultivadas em baixas doses do

mesmo. Já, Föhse et al. (1988) definiram a eficiência para P como sendo a habilidade de uma planta em produzir certa porcentagem da produção máxima com certo nível de P no solo.

Para a caracterização da eficiência de utilização de P, um índice bastante aceito foi proposto por Siddiqi e Glass (1981), através da equação: (matéria seca produzida)² (unidade do nutriente absorvido)⁻¹. Deste modo, reúne-se num mesmo indicador eficiência de utilização e o crescimento. O uso deste índice para classificação de genótipos para eficiência nutricional evita que plantas eficientes mas de baixa produção de biomassa sejam selecionadas.

Espécies de plantas, assim como genótipos dentro da mesma espécie podem diferir na sua eficiência nutricional (VANCE et al., 2003). A avaliação de genótipos vegetais para eficiência nutricional em sistemas experimentais mais simplificados tem se mostrado vantajosa, uma vez que permitem maior controle dos fatores de variação e da pressão de seleção. Porém, faltam estudos comparativos entre os resultados obtidos nos diferentes sistemas (MACHADO et al. 2001), o que aprimoraria a compreensão e avaliação do sucesso do emprego dessas técnicas na seleção de genótipos eficientes.

A eficiência ao P é um fenômeno bastante complexo e afetado por um grande número de mecanismos das plantas associados com a aquisição de P do solo e a utilização a nível celular (GOURLEY et al., 1994; MARSCHNER, 1995; SCHACHTMAN et al., 1998; LYNCH; HO, 2004; OZTURK et al.; 2005). A eficiência de absorção, sob baixa disponibilidade de P, pode ser influenciada por alterações morfológicas, fisiológicas e/ou bioquímicas no sistema radicular das plantas, tais como: desenvolvimento de raízes laterais (GERLOFF; GABELMAN, 1983) e de pêlos radiculares (FÖHSE; JUNGK, 1983; BATES; LYNCH, 2001); aumento na relação entre raízes e parte aérea; mudanças na arquitetura radicular; formação de raízes proteóides; aumento na associação com fungos micorrízicos; aumento na velocidade máxima de absorção (MARTINEZ et al., 1993; RAGHOTHAMA, 1999; SHANE; LAMBERS, 2005; CAMACHO-CRISTÓBAL et al., 2008); mudanças no pH da rizosfera; exsudação de compostos orgânicos pelas raízes e níveis de fosfates nas células das raízes (CLARKSON, 1985; SHEN et al., 2003; BALDWIN et al.; 2008; STARNES et al., 2008).

Diversos fatores podem afetar também a eficiência de utilização de P, podendo-se citar como exemplo a distribuição do nutriente na planta, conforme já

observado em sorgo (WIENEKE, 1990) e trigo (HORST et al., 1993). A concentração de Pi nos tecidos das plantas também pode influenciar a eficiência de utilização do P, interferindo em processos como a fotossíntese, observado em feijão (WHITEAKER et al., 1976) e arroz (XU et al., 2007). Muitas destas respostas das plantas à deficiência de P atuam conjuntamente, tanto para a eficiência de absorção quanto de utilização deste nutriente, o que também é observado nas alterações de natureza molecular, como ativação de genes relacionados à expressão de RNases, fosfatases, transportadores de Pi, Ca-ATPases, entre outros (RAGHOTHAMA, 1999; BALDWIN et al., 2001; BALDWIN et al.; 2008).

Segundo Dechassa et al. (2003), a batata, em comparação com outras culturas, apresenta baixa eficiência de aquisição de P, além de ser geralmente reconhecida por não ter tolerância ao baixo P no solo (PURSEGLOVE; SANDERS, 1981; ALVAREZ-SANCHEZ et al., 1999). Diante das possibilidades oferecidas pela eficiência de absorção e utilização de P e conhecendo a demanda da batata por esta habilidade, reforça-se a necessidade de pesquisas que visem encontrar/desenvolver genótipos de batata que apresentem características de eficiência a este nutriente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Biotecnologia Vegetal do Departamento de Biologia e no Departamento de Química, Laboratório de Análises Químicas, Industriais e Ambientais, Centro de Ciências Naturais e Exatas da Universidade Federal de Santa Maria.

3.1 Cultivo *in vitro*

Foram utilizados 22 clones de batata oriundos do Programa de Genética e Melhoramento de Batata da Universidade Federal de Santa Maria (Tabela 1). Destes clones, todos possuem natureza tetraplóide, com exceção de *Solanum microdontum* Bitter, que é diplóide.

Explantos caulinares desses clones foram obtidos de plantas cultivadas *in vitro*, utilizando o meio MS (MURASHIGE; SKOOG, 1962), suplementado com 30 g L⁻¹ de sacarose, 0,1 g L⁻¹ de mio inositol e 6 g L⁻¹ de agar, onde foram inoculados segmentos nodais com 1,0 cm de comprimento. Aplicaram-se as concentrações de 10 e 100% da concentração padrão de P do meio MS, respectivamente chamados neste trabalho de baixo (3,869 mg P L⁻¹) e alto (38,693 mg P L⁻¹) níveis de P. A fonte utilizada de P foi KH₂PO₄. Para manter o teor de potássio no baixo nível de P, este foi recolocado utilizando KCl. Assim, os nutrientes foram conservados na mesma concentração para ambos os níveis de P aplicados, com exceção do P. A unidade experimental constituiu-se em sete tubos de ensaio, cada um contendo 10,0 mL de meio de cultivo e um explante inoculado, sendo utilizadas três repetições.

Os tubos de ensaio contendo os explantes foram mantidos em sala de crescimento com temperatura de 25 ± 2 °C, fotoperíodo de 16 h com intensidade luminosa de 35 μmol m⁻² s⁻¹ fornecida por lâmpadas fluorescentes brancas frias. As plantas foram coletadas para análise no momento em que 10% das plantas de algum dos tratamentos por clone atingissem o topo do tubo.

3.2 Parâmetros de crescimento

No final do tempo de cultivo de cada clone (Tabela 1), foram observadas nas plantas as seguintes variáveis: comprimento da parte aérea (medidos com régua de precisão de 0,1 cm), número de folhas e matéria seca de raízes e de parte aérea. A matéria seca foi determinada após secagem do material em envelopes de alumínio abertos durante 15 dias em estufa a 65 °C, utilizando balança com 0,0001 g de precisão. O comprimento total de raízes foi estimado de acordo com Tennant (1975).

Tabela 1 – Duração do período de cultivo dos 22 clones de batata (*Solanum tuberosum* L. e *S. microdontum* Bitter) utilizados nos experimentos de cultivo *in vitro*.

Clone	Dias de cultivo
Asterix*	50
Dakota Rose*	63
Macaca*	31
Michigan Purple*	72
SMINIA00017-6*	54
SMINIA793101-3*	85
SMINIA90244-1*	77
SMINIA97145-2*	55
SMIC148-A*	51
SMIB106-7*	82
SMID040-4RY*	61
SMIE040-6RY*	61
SMIF212-3*	43
SMIF313-3*	61
SMIG145-1*	54
SMIG227-2*	63
SMIG274-3*	56
SMIJ319-1*	57
SMIJ319-7*	63
SMIJ456-4Y*	77
SMIJ461-1*	69
<i>S. microdontum</i>	35

* *Solanum tuberosum*

3.3 Determinação do conteúdo de P

As matérias secas de raízes e das partes aéreas foram digeridas (utilizando de 10 a 200 mg) com 3 mL de HNO₃ concentrado, a 90 °C, durante 2 h. Os tubos foram cobertos por tampas plásticas para evitar contaminação. As amostras foram diluídas para 20 mL com água de alta pureza. A concentração de P foi determinada por ICP-OES, utilizando um PerkinElmer *Optima 4300DV* (Shelton, EUA), equipado com uma câmara de nebulização ciclônica e um nebulizador concêntrico. O comprimento de onda utilizado foi de 213,617 nm. Os parâmetros instrumentais foram ajustados de acordo com as recomendações do fabricante. As taxas de vazão dos gases de nebulização, intermediário e do plasma foram ajustadas para 0,65, 0,20 e 14 L min⁻¹, respectivamente. A decomposição das amostras foi conduzida em um sistema de digestão aberta, usando um bloco digestor da Velp Scientifica (Milão, Itália).

Os conteúdos acumulados de P foram obtidos pelo produto entre a concentração de P e a matéria seca de cada parte da planta, sendo expressos em µg planta⁻¹.

3.4 Determinação dos índices de eficiência e classificação dos clones

Baseados na proposta de Siddiqi e Glass (1981), foram determinados os seguintes índices de eficiência: 1) eficiência de absorção de P (EAP) = (µg de P acumulado na planta) (mg de matéria seca de raízes)⁻¹; 2) eficiência de utilização de P nas raízes (EUPR) = (mg de matéria seca das raízes)² (µg de P acumulado nas raízes)⁻¹; 3) eficiência de utilização de P na parte aérea (EUPPA) = (mg de matéria seca da parte aérea)² (µg de P acumulado na parte aérea)⁻¹; 4) eficiência de utilização de P na planta (EUPP) = (mg de matéria seca total)² (µg de P acumulado na planta)⁻¹.

Para a classificação dos clones quanto à eficiência de utilização de P e resposta à aplicação para a produção de matéria seca de parte aérea, foi confeccionado um diagrama. Neste, utilizou-se o índice EUPPA verificado sob baixo

nível de P e a resposta à aplicação de P foi determinado de acordo com Fox (1978). Este valor foi obtido pela diferença entre a produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) nos dois níveis, dividida pela diferença nas doses do P aplicado (1).

$$\text{Resposta à aplicação de P} = \frac{\text{MSPA } P_{\text{alto}} - \text{MSPA } P_{\text{baixo}}}{P_{\text{alto}} - P_{\text{baixo}}} \quad (1)$$

3.5 Análise estatística

Os dados foram estatisticamente analisados por análise de variância em um delineamento inteiramente casualizado. Os tratamentos foram organizados em esquema bifatorial de 22 clones e dois níveis de P aplicados. A significância foi determinada a $P < 0,05$. As análises complementares foram realizadas através de comparação de médias pelo teste de Scott-Knott. Utilizou-se o programa estatístico SisVar (Universidade Federal de Lavras – Lavras, MG).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve efeito significativo em todos os fatores analisados tanto para clones e níveis de P aplicados independentemente, bem como para a interação. Foi observada ampla variabilidade entre os materiais, sendo que a avaliação do desempenho de cada clone dependeu da característica em análise.

4.1 Análise do crescimento

Na condição de crescimento de baixo nível de P aplicado, as maiores produções de matéria seca de raízes foram observadas nos clones Dakota Rose, SMINIA793101-3, SMINIA90244-1, SMIB106-7, e SMIE040-6RY (Tabela 2). Os dois primeiros clones também apresentaram as maiores produções de matéria seca de parte aérea. Devido à maior participação da parte aérea na matéria seca total, foram verificadas em Dakota Rose, SMINIA793101-3 e SMIE040-6RY as maiores médias para matéria seca total produzida. Os clones *Solanum microdontum*, Michigan Purple, SMIJ461-1 e SMID040-4RY foram aqueles com menor produção de matéria seca de raízes; além disso, *S. microdontum* e SMIJ319-7 foram os responsáveis pelos menores valores de matéria seca de parte aérea.

As maiores produções de matéria seca de raízes e da parte aérea sob baixo nível de P aplicado não diferiram daquelas com alto nível de P; excetuando-se o observado para os clones SMIE040-6RY e Dakota Rose, que obtiveram valores ainda maiores para matéria seca de raízes e da parte aérea, respectivamente. Já para os clones com as menores produções de matéria seca, a diferença foi significativa, menos para a parte aérea de SMIJ319-7. Entre os clones que não apresentaram diferenças significativas para matéria seca produzida entre os níveis de P, destacaram-se SMINIA793101-3, SMINIA90244-1, SMIF212-3, SMIG274-3, SMIJ319-1, SMIJ319-7 e SMIJ456-4Y, que não variaram na produção de matéria seca de raízes, da parte aérea e do total. Esse comportamento pode ser entendido como uma boa adaptação destes materiais a ambas as condições de suprimento de

P. Por outro lado, em relação à matéria seca de raízes, os clones *S. microdontum*, Michigan Purple e SMIC148-A apresentaram redução aproximada de 57% pelo menor suprimento de P, mais afetados que os clones SMINIA00017-6, SMIG227-2, SMID040-4RY e SMIJ461-1. Akhtar et al. (2008) observaram redução na matéria seca de raízes em cultivares de *Brassica* cultivadas em solução nutritiva, e relataram como um indicativo de menor tolerância destes genótipos à condição de baixo P.

Tabela 2 - Produção de matéria seca (MS) de raízes, da parte aérea e do total da planta e a relação entre matéria seca de raízes e parte aérea (R/PA) de 22 clones de batata cultivados *in vitro* sob baixo e alto nível de P.

Clone	MS de raízes (mg planta ⁻¹)		MS da parte aérea (mg planta ⁻¹)		MS total (mg planta ⁻¹)		R/PA	
	baixoP	alto P	baixo P	alto P	baixo P	alto P	baixo P	alto P
Asterix	4,1 cB*	6,8 bA	8,5 cA	10,1 cA	12,5 cB	16,9 dA	0,513 cB	0,916 bA
Dakota Rose	6,9 aB	8,3 bA	12,4 aA	7,9 dB	19,3 aA	16,2 dB	0,590 cB	1,145 aA
Macaca	4,7 cB	8,8 bA	8,4 cB	11,4 cA	13,1 cB	20,0 cA	0,595 cA	0,812 bA
Michigan Purple	2,6 dB	6,0 cA	7,9 cB	10,5 cA	10,6 cB	16,5 dA	0,344 cA	0,590 cA
SMINIA00017-6	4,4 cB	5,9 cA	10,0 bA	10,7 cA	14,4 bA	16,6 dA	0,464 cA	0,582 cA
SMINIA793101-3	6,9 aA	8,3 bA	11,3 aA	12,0 cA	18,3 aA	20,2 cA	0,696 cA	0,777 bA
SMINIA90244-1	6,7 aA	7,6 bA	8,4 cA	10,1 cA	15,1 bA	17,6 dA	0,846 bA	0,817 bA
SMINIA97145-2	4,9 cA	3,7 dA	6,6 dB	8,6 dA	11,5 cA	12,4 eA	0,792 bA	0,524 cB
SMIC148-A	4,5 cB	10,3 aA	10,2 bB	18,3 aA	14,7 bB	28,5 aA	0,498 cA	0,624 cA
SMIB106-7	6,7 aA	7,9 bA	7,9 cB	15,6 bA	14,6 bB	23,5 bA	0,950 aA	0,573 cB
SMID040-4RY	2,8 dB	4,4 dA	6,9 dB	14,1 bA	9,7 cB	18,5 dA	0,433 cA	0,306 cA
SMIE040-6RY	6,5 aA	4,5 dB	10,4 bA	8,6 dA	17,0 aA	13,1 eB	0,657 cA	0,568 cA
SMIF212-3	5,5 bA	5,5 cA	7,5 cA	8,5 dA	12,9 cA	14,0 eA	0,821 bA	0,767 bA
SMIF313-3	4,2 cA	5,2 cA	6,3 dB	11,3 cA	10,5 cB	16,4 dA	0,736 bA	0,497 cA
SMIG145-1	5,3 bA	5,2 cA	5,9 dB	9,8 cA	11,3 cB	15,0 dA	1,222 aA	0,601 cB
SMIG227-2	4,5 cB	6,1 cA	7,2 dB	10,5 cA	11,7 cB	16,6 dA	0,750 bA	0,675 cA
SMIG274-3	4,7 cA	4,7 dA	6,3 dA	8,2 dA	10,9 cA	13,0 eA	0,976 aA	0,622 cB
SMIJ319-1	4,8 cA	5,0 cA	8,2 dA	8,9 dA	13,0 cA	13,9 eA	0,636 cA	0,646 cA
SMIJ319-7	4,0 cA	4,2 dA	4,3 eA	6,0 eA	8,4 dA	10,2 fA	1,060 aA	0,786 bB
SMIJ456-4Y	4,8 cA	4,0 dA	9,6 bA	8,5 dA	14,4 bA	12,6 eA	0,537 cA	0,626 cA
SMIJ461-1	2,7 dB	4,3 dA	10,0 bA	10,4 cA	12,7 cA	14,7 dA	0,292 cA	0,422 cA
<i>S. microdontum</i>	1,9 dB	4,4 dA	2,8 eB	4,8 eA	4,7 eB	9,2 fA	0,754 bB	1,140 aA
Média	4,73	5,96	8,04	10,22	12,79	16,17	0,689	0,682
CV(%)	15,52		13,12		11,80		22,24	

* Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Scott-Knott e médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha dentro de cada variável não diferem significativamente entre si pelo teste F, a 5% de probabilidade. Baixo P: 3,869 mg P L⁻¹, alto P: 38,693 mg P L⁻¹.

As produções de matéria seca de raízes, da parte aérea e do total da planta que foram afetadas pelo suprimento de P tiveram, respectivamente, reduções médias de 34, 29 e 27% nas plantas cultivadas sob baixo nível de P em relação ao alto nível. Assim, a produção de matéria seca de raízes foi mais afetada do que a da

parte aérea e do total da planta pelo menor suprimento de P. A produção de matéria seca é um dos componentes considerados na caracterização das plantas para eficiência de utilização de nutrientes (BLAIR, 1993), portanto, para os clones estudados, a matéria seca de raízes parece ter uma maior participação nos critérios de qualificação, no que diz respeito à distinção entre os clones, quanto à eficiência de utilização de P.

Em alto nível de P aplicado, o clone SMIC148-A obteve as maiores produções de matéria seca de raízes e da parte aérea, diferindo significativamente do baixo nível de P. Alta produção de matéria seca sob alto suprimento de P, bem como diferença de produção entre os níveis aplicados, evidenciam materiais genéticos que respondem à aplicação deste nutriente. Este fato foi também verificado em cultivos com solução nutritiva de soja por Furlani et al. (2002) e feijoeiro por Lana et al. (2006). Os clones SMINIA97145-2, SMIJ456-4Y, SMIJ319-7, SMIJ461-1, SMID040-4RY, *S. microdontum*, SMIE040-6RY e SMIG274-3 apresentaram as menores produções de matéria seca de raízes, sendo que os clones *S. microdontum* e SMIJ319-7 apresentaram novamente desempenho inferior na produção de matéria seca da parte aérea, resultando conseqüentemente em menores produções de matéria seca total.

As proporções de matéria seca e de conteúdo de P distribuídas entre raízes e parte aérea têm sido estudadas e consideradas como fatores na determinação da eficiência de absorção e utilização do P (MACHADO et al., 2001). Para a relação entre matéria seca de raízes e parte aérea (R/PA), o baixo suprimento de P promoveu nos clones SMIG145-1, SMIJ319-7, SMIG274-3, SMIB106-7 e SMINIA97145-2 aumento nesta relação (Tabela 2). O aumento na relação R/PA sob baixo suprimento ou deficiência de P tem sido observado em diversas espécies cultivadas em solo e solução nutritiva (FÖHSE et al., 1988; FURLANI et al., 2002; BRASIL et al., 2007). A limitação nutricional ocasiona uma maior redução no crescimento da parte aérea do que das raízes (MARSCHNER, 1995), fato que demonstra que as raízes tornam-se drenos preferenciais dos assimilados (VANCE et al., 2003). Diferentemente deste comportamento, os clones Dakota Rose, *S. microdontum* e Asterix diminuíram a relação R/PA, indicando que esta característica não possui uma resposta única para a batata.

Balemi e Schenk (2009) encontraram aumento na proporção de matéria seca alocada das raízes de genótipos de batata cultivadas em solução nutritiva com baixo

P, comparada ao alto fornecimento de P, mas não relacionaram este comportamento diretamente à maior eficiência de utilização de P. Entretanto, para a maioria dos clones analisados neste trabalho, a relação R/PA não foi alterada entre os níveis de P aplicados. Keerthisinghe et al. (1998) relataram que algumas espécies de *Lupinus* conhecidas por serem altamente eficientes ao P mostraram, em solução nutritiva, pequena mudança na partição de biomassa pela alteração no fornecimento de P, indicando que a eficiência a este nutriente estava ligada a um outro mecanismo acessado pelas plantas sob deficiência. Assim, sugere-se que a relação R/PA não é uma característica adequada para a caracterização da eficiência de absorção e utilização de P em plantas de batata cultivadas *in vitro*.

Os mecanismos morfológicos de adaptação das plantas ao estresse de P devem configurar um sistema radicular com maior superfície de contato com o solo (MACHADO et al., 2004). Em se tratando de cultivo *in vitro*, além da biomassa, o comprimento de raízes constitui um dos principais fatores morfológicos disponíveis às raízes para a exploração do substrato. O comprimento total de raízes foi a variável de crescimento mais afetada pela menor aplicação de P (Tabela 3). Entre os clones que apresentaram esta alteração, 15 dos 22 utilizados, foi encontrada uma redução média de 55% no comprimento, demonstrando que esta característica é um bom marcador da sensibilidade da batata ao baixo suprimento de P.

Alves et al. (2002) e Machado et al. (2004) relacionaram o maior comprimento de raízes em plantas de milho, sob deficiência de P em solo e solução nutritiva, com a eficiência a este nutriente. Nos clones de batata analisados neste trabalho, esta estratégia não foi observada. Em ambos os níveis de P aplicados, destacaram-se os clones *S. microdontum* e SMINIA793101-3 com valores contrastantes de comprimento total de raízes (inferior e superior, respectivamente). Interessantemente, estes extremos foram repetidos na produção de matéria seca, sugerindo uma relação entre o comprimento de raízes e eficiência de utilização de P para estes clones. No entanto, devido à variação intraespecífica, esta relação possivelmente esteja ligada as características particulares de alguns clones.

Uma redução no número de folhas foi verificada em 50% dos clones submetidos ao baixo nível de P em relação ao alto nível (Tabela 3). SMIB106-7 foi o clone mais sensível à quantidade de P fornecido, porém o número de folhas emitidas por SMIG274-3 foi o menor sob baixo suprimento de P. Já o clone Dakota Rose não foi afetado pelo menor fornecimento de P e ainda apresentou o maior número de

folhas entre os clones, revelando que o bom desempenho de sua parte aérea (produção de matéria seca) nesta condição pode estar ligado ao número de folhas que emite. Do mesmo modo, Lynch et al. (1991) observaram que o número de folhas esteve entre os principais fatores responsáveis pelo menor crescimento de feijoeiro cultivado em solução nutritiva sob baixa disponibilidade de P.

Tabela 3 - Comprimento total de raízes, número de folhas e comprimento da parte aérea de 22 clones de batata cultivados *in vitro* sob baixo e alto nível de P.

Clone	Compr. de raízes (cm planta ⁻¹)		Número de folhas (nº planta ⁻¹)		Compr. parte aérea (cm)	
	baixo P	alto P	baixo P	alto P	baixo P	alto P
Asterix	20,2 cB*	43,9 cA	15,6 bA	15,1 eA	7,3 cA	8,7 bA
Dakota Rose	22,0 cB	54,4 bA	24,8 aA	22,4 cA	9,7 bA	5,9 cB
Macaca	14,0 dB	55,0 bA	13,1 cA	15,0 eA	9,2 cB	12,9 aA
Michigan Purple	11,3 dB	31,1 eA	15,9 bB	22,3 cA	8,6 cA	10,8 aA
SMINIA00017-6	32,2 bB	57,2 bA	12,1 cB	17,6 dA	6,7 cB	9,7 bA
SMINIA793101-3	41,4 aB	114,2 aA	18,4 bB	25,1 bA	7,9 cA	5,8 cA
SMINIA90244-1	28,5 bB	37,0 dA	14,7 bA	18,1 dA	7,7 cB	11,5 aA
SMINIA97145-2	28,9 bA	26,4 eA	11,9 cB	16,0 dA	7,3 cB	12,4 aA
SMIC148-A	13,3 dB	61,4 bA	15,7 bB	26,6 bA	12,9 aA	12,0 aA
SMIB106-7	22,0 cB	61,3 bA	16,6 bB	34,7 aA	8,4 cA	8,9 bA
SMID040-4RY	11,1 dB	30,0 eA	12,9 cB	25,1 bA	7,3 cA	9,4 bA
SMIE040-6RY	26,6 bB	38,7 dA	18,0 bA	20,6 dA	10,0 bA	9,5 bA
SMIF212-3	13,1 dA	23,2 eA	13,2 cB	19,9 dA	9,0 cB	11,9aA
SMIF313-3	13,2 dB	37,3 dA	15,1 bA	18,3 dA	8,0 cB	12,3 aA
SMIG145-1	21,0 cA	23,0 eA	13,9 cA	16,6 dA	7,3 cB	11,2 aA
SMIG227-2	12,0 dB	23,7 eA	15,0 bA	14,7 eA	5,6 cB	9,1 bA
SMIG274-3	30,5 bA	39,7 dA	8,3 dB	12,0 fA	7,6 cB	10,5 aA
SMIJ319-1	27,5 bA	34,6 dA	14,0 cA	16,9 dA	12,5 aA	12,0 aA
SMIJ319-7	21,5 cA	28,9 eA	10,0 dA	12,1 fA	7,1 cB	9,4 bA
SMIJ456-4Y	40,8 aA	30,3 eA	14,2 cB	18,3 dA	7,8 cA	9,6 bA
SMIJ461-1	27,2 bB	49,0 cA	15,6 bB	20,0 dA	8,5 cA	9,2 bA
<i>S. microdontum</i>	7,5 dB	20,7 eA	10,0 dA	12,0 fA	5,9 cB	8,5 bA
Média	22,08	41,82	14,50	19,06	8,29	10,05
CV(%)	22,19		12,48		14,76	

* Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Scott-Knott e médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha dentro de cada variável não diferem significativamente entre si pelo teste F, a 5% de probabilidade. Baixo P: 3,869 mg P L⁻¹, alto P: 38,693 mg P L⁻¹.

O comprimento da parte aérea das plantas crescidas sob baixo nível de P apresentou uma redução média significativa de 23% (Tabela 3), com exceção do clone Dakota Rose, que aumentou seu comprimento. Neste nível de P aplicado, os clones SMIC148-A e SMIJ319-1 obtiveram os maiores comprimentos da parte aérea, enquanto que os demais clones apresentaram os menores valores, com exceção

dos clones Dakota Rose e SMIE040-6RY, com comportamento intermediário. A aplicação do alto nível de P proporcionou os maiores comprimentos de parte aérea para os clones Macaca, SMINIA97145-2, SMIF313-3, SMIC148-A, SMIF212-3, SMINIA90244-1, SMIG145-1, Michigan Purple, SMIG274-3 e SMIJ319-1, e os menores para SMINIA793101-3 e Dakota Rose.

4.2 Acumulação de P

O conteúdo acumulado de P na matéria seca foi maior tanto nas raízes quanto na parte aérea das plantas cultivadas com alto suprimento de P (Tabela 4). O mesmo foi verificado por Alvarez-Sanchez et al. (1999) em plantas de batata cultivadas em solo. A variabilidade encontrada entre os clones para a acumulação de P foi menor do que o observado nos parâmetros de crescimento (Tabelas 2 e 3). Quando aplicado em baixo nível, o P acumulado nos órgãos das plantas mostrou pouca ou nenhuma distinção entre os clones. No caso das raízes, a menor acumulação de P foi uma resposta geral ao menor fornecimento deste nutriente, mostrando que esta característica, por si só, não pode ser usada para diferenciar a eficiência ao P entre os clones. Já em alto P, a variabilidade foi maior do que em baixo P aplicado.

Os clones SMID040-4RY, SMIE040-6RY, SMIG145-1, SMIG274-3 e SMIJ456-4Y foram os únicos que não apresentaram diferença significativa para o conteúdo de P acumulado nas raízes entre os níveis aplicados, além de mostrarem baixo acúmulo de P sob alto nível. Entretanto, o clone Dakota Rose, nesta condição, mostrou a maior quantidade de P nas raízes, mais de três vezes a média do clones. Para a parte aérea, o maior conteúdo acumulado em alto nível de P foi do clone SMIC148-A, que ao mesmo tempo apresentou alto valor sob baixo nível de P. Neste nível, entre os clones com baixa acumulação na parte aérea, *S. microdontum*, SMIG227-2, SMIJ319-7 e SMIJ456-4Y apresentaram menor alteração no conteúdo de P da parte aérea. A baixa concentração ou acumulação de P nos tecidos das plantas tem sido reportada como um fator de eficiência a este nutriente (BAKER et al., 1970; 1971), desde que acompanhada de satisfatória produção de biomassa total (ISRAEL; RUFTY, 1988), no caso da eficiência de utilização. Assim, é

necessário que estas características sejam analisadas conjuntamente, o que é possibilitado através dos índices de eficiência.

Sob baixo nível de P, os menores valores de P acumulado na matéria seca total da maioria dos clones relacionaram-se aos baixos valores de acumulação na parte aérea. Isso sugere que a parte aérea tem capacidade de acumular P mais facilmente alterada do que as raízes com o menor fornecimento de P.

Tabela 4 - Conteúdo acumulado de P na matéria seca de raízes, da parte aérea e do total da planta e a relação entre os conteúdos de P nas raízes e parte aérea (P_R/P_{PA}) de 22 clones de batata cultivados *in vitro* sob baixo e alto nível de P.

Clone	Raízes ($\mu\text{g planta}^{-1}$)		Parte aérea ($\mu\text{g planta}^{-1}$)		Total ($\mu\text{g planta}^{-1}$)		P_R/P_{PA}	
	baixo P	alto P	baixo P	alto P	baixo P	alto P	baixo P	alto P
Asterix	9,1 aB*	44,5 bA	20,3 aB	57,4 bA	29,4 bB	101,9 cA	0,46 bA	0,78 cA
Dakota Rose	30,7 aB	172,3 aA	20,2 aB	42,2 cA	50,9 aB	214,5 aA	1,50 aB	4,46 aA
Macaca	21,0 aB	62,1 bA	28,8 aB	42,9 cA	49,8 aB	104,9 cA	0,73 bB	1,44 bA
Michigan Purple	10,2 aB	45,5 bA	15,3 bB	54,6 bA	25,5 bB	100,1 cA	0,66 bA	0,83 cA
SMINIA00017-6	9,2 aB	34,7 cA	21,5 aB	65,6 bA	30,7 bB	100,3 cA	0,45 bA	0,52 cA
SMINIA793101-3	13,6 aB	37,6 cA	14,7 bB	47,8 cA	28,3 bB	85,4 dA	0,95 aA	0,83 cA
SMINIA90244-1	17,2 aB	46,0 bA	13,8 bB	37,6 cA	30,9 bB	83,7 dA	1,25 aA	1,31 bA
SMINIA97145-2	12,7 aB	29,7 cA	10,8 bB	42,2 cA	23,6 bB	72,0 dA	1,18 aA	0,79 cA
SMIC148-A	16,0 aB	59,7 bA	24,9 aB	85,7 aA	41,0 aB	145,4 bA	0,66 bA	0,71 cA
SMIB106-7	8,4 aB	43,6 bA	12,4 bB	56,2 bA	20,8 bB	99,8 cA	0,68 bA	0,77 cA
SMID040-4RY	5,3 aA	19,2 cA	13,1 bB	64,9 bA	18,4 bB	84,1 dA	0,40 bA	0,29 cA
SMIE040-6RY	31,8 aA	23,6 cA	30,7 aB	61,1 bA	62,5 aB	84,7 dA	1,04 aA	0,38 cA
SMIF212-3	17,4 aB	37,6 cA	21,1 aB	66,3 bA	38,5 aB	103,9 cA	0,83 bA	0,59 cA
SMIF313-3	12,0 aB	30,8 cA	20,9 aB	61,5 bA	32,9 bB	92,2 cA	0,58 bA	0,52 cA
SMIG145-1	20,3 aA	31,5 cA	13,6 bB	43,7 cA	33,9 bB	75,2 dA	1,49 aA	0,74 cB
SMIG227-2	12,5 aB	32,4 cA	11,8 bB	28,5 cA	24,3 bB	60,8 dA	1,05 aA	1,16 bA
SMIG274-3	23,5 aA	32,9 cA	22,7 aB	39,6 cA	46,2 aB	72,5 dA	1,03 aA	0,84 cA
SMIJ319-1	17,8 aB	55,3 bA	16,4 bB	43,3 cA	34,2 bB	98,6 cA	1,07 aA	1,26 bA
SMIJ319-7	14,3 aB	40,6 bA	15,1 bB	35,7 cA	29,3 bB	76,2 dA	0,97 aA	1,17 bA
SMIJ456-4Y	12,1 aA	24,9 cA	15,0 bB	37,4 cA	27,1 bB	62,3 dA	0,80 bA	0,66 cA
SMIJ461-1	13,0 aB	47,4 bA	28,2 aB	66,1 bA	41,2 aB	113,5 cA	0,47 bA	0,72 cA
<i>S. microdontum</i>	18,7 aB	46,9 bA	16,5 bB	29,8 cA	35,2 bB	76,7 dA	1,12 aA	1,57 bA
Média	15,8	45,4	18,5	50,5	34,3	95,8	0,885	1,020
CV(%)	32,81		21,54		18,89		43,16	

* Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Scott-Knott e médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha dentro de cada variável não diferem significativamente entre si pelo teste F, a 5% de probabilidade. Baixo P: 3,869 mg P L⁻¹, alto P: 38,693 mg P L⁻¹.

Houve pouca variação no conteúdo de P acumulado entre raízes e parte aérea em ambos os níveis de P aplicados. A relação entre o conteúdo de P acumulado na matéria seca das raízes e da parte aérea (P_R/P_{PA}) não foi alterada entre os dois níveis de P na maioria dos clones (Tabela 4). Talvez isso seja

resultado da alta mobilidade do nutriente dentro da planta (TAIZ; ZEIGER, 2004). Alvarez-Sanchez et al. (1999) também verificaram distribuição homogênea de P entre os órgãos de plantas de batata cultivadas em solo sem a aplicação deste nutriente. Somente os clones Macaca e Dakota Rose acumularam menos P nas raízes em condições de baixo nível de P. Já o clone SMIG145-1 apresentou maior valor para a relação P_R/P_{PA} quando o fornecimento de P foi baixo, o que indica maior retenção do P absorvido nas raízes quando em condição de deficiência deste nutriente e/ou maior translocação de P da parte aérea às raízes (MARSCHNER, 1995).

O aumento na relação P_R/P_{PA} geralmente é relacionado como característica de espécies eficientes na absorção de P, sob deficiência deste nutriente (FÖHSE et al., 1988). No entanto, nas condições utilizadas no presente trabalho, devido a pouca variação desta relação com a alteração da quantidade de P fornecida, pode-se inferir que a batata não apresente nesta característica um fator que confira maior eficiência de absorção de P.

Furlani et al. (2002) observaram que os conteúdos de P em cultivares de soja não foram adequadamente relacionados a outras características que conferem eficiência ao P nesta espécie. Além disso, segundo Araújo (2000), o conteúdo de P acumulado por planta não elucidou os mecanismos responsáveis pela maior absorção deste nutriente.

4.3 Índices de eficiência

Os índices de eficiência são importantes ferramentas para a determinação do desempenho nutricional em plantas. Através deles, é possível visualizar conjuntamente características da absorção de nutrientes e da produção das plantas, geralmente medido através da matéria seca.

O índice denominado eficiência de absorção de P (EAP), neste trabalho, significa a habilidade do sistema radicular em adquirir o P do substrato e acumulá-lo na planta inteira. Os clones de batata apresentaram variabilidade para este índice, e em média, a aplicação do alto nível de P dobrou a EAP em relação ao baixo nível (Tabela 5). Moura et al. (2001) também encontraram diferenças na EAP entre

linhagens de pimentão cultivadas em solo e ainda grandes aumentos deste índice com o maior fornecimento de P.

Tabela 5 - Eficiências de absorção de P (EAP), utilização de P nas raízes (EUPR), na parte aérea (EUPPA) e na planta (EUPP) de 22 clones de batata cultivados *in vitro* sob baixo e alto nível de P.

Clone	EAP ($\mu\text{g mg}^{-1}$)		EUPR ($\text{mg}^2 \mu\text{g}^{-1}$)		EUPPA ($\text{mg}^2 \mu\text{g}^{-1}$)		EUPP ($\text{mg}^2 \mu\text{g}^{-1}$)	
	baixo P	alto P	baixo P	alto P	baixo P	alto P	baixo P	alto P
Asterix	7,2 cB*	15,0 cA	1,83 cA	1,05 aB	3,58 dA	1,79 cB	5,36 dA	2,82 cB
Dakota Rose	7,3 cB	25,7 aA	1,59 cA	0,41 bB	7,61 bA	1,49 cB	7,44 cA	1,24 dB
Macaca	10,6 bA	11,9 dA	1,06 dA	1,25 aA	2,45 Ea	3,02 bA	3,45 fA	3,88 bA
Michigan Purple	10,1 bB	16,6 bA	0,70 eA	0,80 bA	4,25 dA	2,01 cB	4,41 eA	2,71 cB
SMINIA00017-6	7,2 cB	17,2 bA	2,12 cA	1,00 aB	4,74 dA	1,75 cB	6,73 cA	2,74 cB
SMINIA793101-3	4,0 cB	10,3 dA	3,55 bA	1,89 aB	8,90 aA	3,03 bB	11,88 aA	4,80 bB
SMINIA90244-1	4,6 cB	11,0 dA	2,66 cA	1,25 aB	5,11 dA	2,75 bB	7,39 cA	3,72 bB
SMINIA97145-2	4,8 cB	19,2 bA	1,86 cA	0,48 bB	4,11 dA	1,77 cB	5,65 dA	2,13 dB
SMIC148-A	9,6 bB	14,2 cA	1,26 dA	1,76 aA	4,24 dA	3,90 aA	5,26 dA	5,59 aA
SMIB106-7	3,1 cB	12,5 dA	5,60 aA	1,46 aB	5,08 dA	4,42 aA	10,40 bA	5,66 aB
SMID040-4RY	6,6 cB	19,0 bA	1,53 cA	1,03 aA	3,68 dA	3,08 bA	5,21 dA	4,10 bA
SMIE040-6RY	9,5 bB	18,9 bA	1,34 dA	0,85 bA	3,59 dA	1,23 cB	4,64 eA	2,04 dB
SMIF212-3	7,1 cB	18,6 bA	1,73 cA	0,82 bB	2,68 eA	1,09 cB	4,37 eA	1,90 dB
SMIF313-3	7,8 cB	17,9 bA	1,47 cA	0,87 bA	1,92 eA	2,08 cA	3,36 fA	2,93 cA
SMIG145-1	6,3 cB	14,6 cA	1,43 cA	0,85 bA	2,56 eA	2,21 cA	3,75 fA	2,99 cA
SMIG227-2	5,5 cB	10,1 dA	1,62 cA	1,15 aA	4,44 dA	3,97 aA	5,66 dA	4,57 bA
SMIG274-3	9,9 bB	14,8 cA	0,96 dA	0,70 bA	1,77 eA	1,83 cA	2,60 fA	2,43 cA
SMIJ319-1	7,1 cB	19,8 bA	1,30 dA	0,47 bB	4,12 dA	1,84 cB	4,98 dA	1,99 dB
SMIJ319-7	7,2 cB	18,9 bA	1,16 dA	0,42 bB	1,26 fA	1,05 cA	2,42 fA	1,36 dA
SMIJ456-4Y	5,6 cB	15,4 cA	1,92 cA	0,65 bB	6,24 cA	1,96 cB	7,73 cA	2,54 cB
SMIJ461-1	17,2 aB	26,0 aA	0,57 eA	0,41 bA	3,66 dA	1,66 cB	3,99 eA	1,92 dB
<i>S. microdontum</i>	19,8 aA	17,3 bA	0,19 eA	0,41 bA	0,47 fA	0,77 cA	0,62 gA	1,10 dA
Média	8,158	16,641	1,706	0,912	3,935	2,218	5,337	2,967
CV(%)	17,68		33,42		22,50		18,05	

* Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Scott-Knott e médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha dentro de cada variável não diferem significativamente entre si pelo teste F, a 5% de probabilidade. Baixo P: 3,869 mg P L⁻¹, alto P: 38,693 mg P L⁻¹.

O conceito de eficiência ao P está relacionado à capacidade das plantas em acumular grandes quantidades deste nutriente quando cultivadas em baixas doses de P (CLARK; BROWN, 1974), principalmente quando se busca plantas que cresçam bem em ambientes de baixa fertilidade do solo. Entre os clones cultivados sob baixo nível de P, *S. microdontum* e SMIJ461-1 obtiveram as maiores EAP, consequência direta da baixa produção de matéria seca de raízes. Ainda os clones *S. microdontum* e Macaca destacaram-se com índices que não diferiram entre os níveis de P aplicados. Estes resultados também se relacionaram com a alta

acumulação de P, no caso dos clones Macaca e SMIJ461-1. Assim, é verificada nestes clones, em relação aos demais, uma diferenciada eficiência de absorção de P. Além destes, SMIC148-A, Michigan Purple, SMIE040-6RY e SMIG274-3 da mesma forma apresentaram EAP acima da média. Por outro lado, os baixos valores de EAP estiveram relacionados a uma maior necessidade de investimento em produção de matéria seca de raízes visando à maior acumulação de P na planta.

Apesar da necessidade de se relacionar altas EAP com o crescimento, ou seja encontrar plantas que absorvam P suficientemente e o revertam em produção de biomassa, a análise do EAP permitiu encontrar clones com alta capacidade de absorção. Assim, é possível que estes clones sejam utilizados no melhoramento de plantas para a eficiência de absorção de P.

Para a caracterização da eficiência de utilização de P foram empregados três índices: eficiência de utilização de P nas raízes (EUPR); eficiência de utilização de P na parte aérea (EUPPA) e eficiência de utilização de P pela planta (EUPP). Estes índices representam a habilidade de produção de biomassa para cada unidade de P absorvido.

Neste experimento, os clones de batata não apresentaram grandes variações entre os referidos indicadores, em ambos os níveis de P aplicados (Tabela 5). Por outro lado, os clones mostraram maior variabilidade sob baixo nível de P em relação ao alto nível. Em média, os três índices foram reduzidos em 33% com o alto suprimento de P. Em milho, a redução no índice de eficiência para a produção de matéria seca com o aumento na dose de P em solução nutritiva tem sido verificada em diversos trabalhos (CIARELLI et al., 1998; GILL et al., 1992; MACHADO et al., 2001).

Houve clones de batata que não apresentaram diferença significativa entre os níveis de P para os três índices de eficiência de utilização. Dentre estes, destacou-se o clone SMIC148-A com valores intermediários em baixo nível de P e alta eficiência de utilização em alto nível. Adicionalmente, pode-se relacionar que a alta eficiência de utilização sob alto nível de P resulta em elevada responsividade à aplicação deste nutriente.

Na condição de baixo fornecimento de P, a maior EUPR foi encontrada no clone SMIB106-7, seguida do clone SMINIA793101-3. Para EUPPA e EUPP, também o clone SMINIA793101-3 apresentou os maiores valores, consideravelmente maiores que as médias. Já o clone *S. microdontum* teve a pior

eficiência de utilização nos três índices, sendo que entre os menores valores também se encontraram os clones Michigan Purple e SMIJ461-1 para EUPR e SMIJ319-7 para EUPPA. As maiores eficiências de utilização concordaram com as maiores produções de matéria seca e, em geral, com as menores acumulações de P, sendo o contrário para as menores eficiências. Além disso, as eficiências de utilização tiveram relação inversa com a eficiência de absorção, ou seja, quanto maior a eficiência de absorção de P, menor a de utilização. Isso pode ser claramente visualizado nos clones mais contrastantes SMINIA793101-3 e *S. microdontum*, que também relacionaram estas características ao comprimento de raízes. O mesmo não acontece na condição de alto nível de P aplicado.

Um resultado interessante foi observado no clone *S. microdontum*, o qual apresentou o pior desempenho na utilização de P. Trata-se de um clone silvestre, e por isso, esperava-se que o mesmo apresentasse alta eficiência de utilização de P. Pela tendência, a seleção natural atuaria na preferência das plantas adaptadas a ambientes hostis de fertilidade do solo. Uma hipótese usualmente formulada, é que os materiais modernos teriam baixa eficiência nutricional, por terem sido selecionados em condições de alta fertilidade do solo, e uma seleção indireta para alta resposta aos fertilizantes pode ter ocorrido devido à seleção para altas produções (DUNCAN; BALIGAR, 1990). No entanto, o ocorrido com o clone *S. microdontum* pode ter relação com a maior disponibilidade do P em cultivo *in vitro*, em relação ao solo (CALDAS et al., 1998), o que talvez tenha provocado um desequilíbrio entre a absorção e o crescimento, resultando na associação negativa entre acumulação de P e a eficiência de utilização, como o observado por Sant'Ana (2000) em genótipos de arroz cultivados *in vitro*. Araújo et al. (1997) também verificaram baixa EUPPA em genótipos silvestres de feijoeiro cultivados em solo com baixo teor de P.

4.4. Classificação dos clones quanto à eficiência de utilização e resposta ao P

Para a classificação de genótipos quanto à eficiência dos nutrientes pelas plantas é importante considerar os fatores que interferem na habilidade e aqueles efetivos na discriminação das diferenças genéticas existentes. Uma vez observadas

estas diferenças, relatadas como variabilidade, criam-se ferramentas para o emprego do melhoramento genético das plantas.

A eficiência ao P pode vir da eficiência de absorção e/ou de utilização do P (FÖHSE et al., 1988). Neste trabalho observou-se que a eficiência de utilização de P expôs melhor as diferenças entre os clones de batata do que a eficiência de absorção de P. Do mesmo modo, Balemi e Schenk (2008), em experimentos com plantas de batata cultivadas em solo, observaram que as diferenças na eficiência ao P entre genótipos foram resultado da utilização deste nutriente e não das diferenças na eficiência de absorção.

No presente estudo, os três índices de eficiência de utilização de P determinados mostraram a mesma tendência entre os clones. Visto que a eficiência de utilização está diretamente ligada à produção de matéria seca sob limitação de P (GRAHAM, 1984), e pelo fato da maior participação da matéria seca da parte aérea na matéria seca total da planta, como verificado neste trabalho, a EUPPA sob baixo nível de P foi utilizada para a classificação dos clones. Devido às discrepâncias entre as eficiências de absorção e de utilização de P, preferiu-se nomear a eficiência dos clones apenas quanto à utilização deste nutriente, não estendendo a classificação para a eficiência de absorção de P.

Juntamente com os trabalhos sobre eficiência dos nutrientes pelas plantas, estudos sobre as metodologias de seleção e discriminação de materiais, aplicados em programas de melhoramento, propõem a discussão quanto à resposta à adubação (FAGERIA; KLUTHCOUSKI, 1980; FAGERIA; BALIGAR, 1993; FIDELIS et al., 2005). A resposta à adubação está associada à capacidade de aumento da produção de biomassa com o maior suprimento do nutriente (ARAÚJO, 2000). Fageria e Kluthcouski (1980) e Fageria e Baligar (1993) propuseram a classificação de genótipos de plantas quanto à eficiência de utilização de determinado nutriente e a resposta à aplicação, através da representação gráfica no plano cartesiano. Estes autores consideraram a utilização do nutriente como sendo a produtividade sob baixo nível e a resposta à aplicação de P de acordo com Fox (1978). Esta metodologia foi aplicada ao presente trabalho. No entanto, modificou-se a definição de utilização para o valor de EUPPA para a classificação dos clones, como observado na Figura 1.

No eixo das abscissas, encontra-se a EUPPA sob baixo nível de P, e no eixo das ordenadas, a resposta à aplicação de P para produção de matéria seca de parte

aérea. O ponto de origem é a EUPPA média ($3,93 \text{ mg}^2 \mu\text{g P}^{-1}$) e a resposta média ($6,24 \text{ mg mg P}^{-1}$) entre os clones, sendo que acima das médias, os clones foram considerados eficientes e responsivos, respectivamente.

O diagrama confeccionado gerou quatro grupos de clones: eficientes e responsivos (ER), não-eficientes e responsivos (NER); não-eficientes e não-responsivos (NENR); eficientes e não-responsivos (ENR). Os clones foram classificados como **ER**: SMIC148-A, SMIB106-7, SMIG227-2 e Michigan Purple; **NER**: SMID040-4RY, SMIF313-3, SMIG145-1 e Macaca; **NENR**: *S. microdontum*, SMIJ319-7, SMIG274-3, SMIE040-6RY, SMIF212-3, SMIJ461-1 e Asterix; e **ENR**: SMINIA793101-3, SMIJ456-4Y, Dakota Rose, SMINIA00017-6, SMINIA90244-1, SMIJ319-1 e SMINIA97145-2.

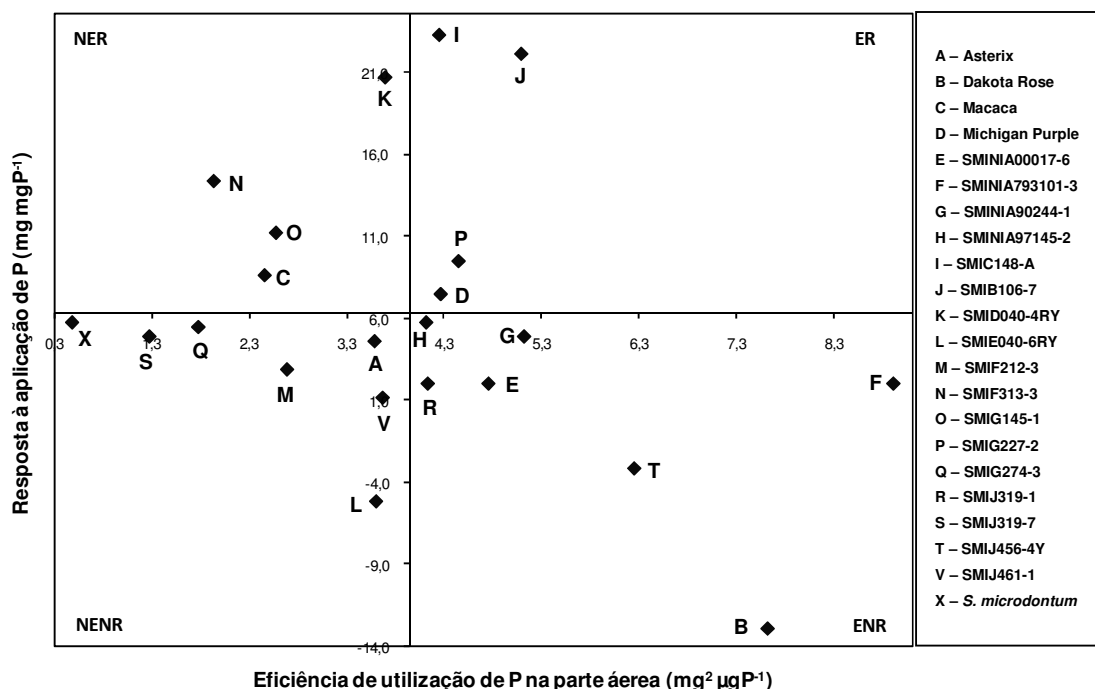


Figura 1 – Classificação de 22 clones de batata cultivados *in vitro* quanto à eficiência de utilização de P (EUPPA) sob baixo nível de P e resposta à aplicação para a produção de matéria seca de parte aérea: eficiente e responsivo (ER); não-eficiente e responsivo (NER); não-eficiente e não-responsivo (NENR); eficiente e não-responsivo (ENR).

Os clones de alta eficiência de utilização de P e baixa responsividade devem ser priorizados em programas de melhoramento que visem à melhor utilização de P sob baixo nível deste nutriente. Em função disso, atenção maior deve ser dada aos

clones classificados como ENR. Porém, quando o intuito é selecionar plantas com bom desempenho em ambientes com restrição de fósforo, e que também responderiam à aplicação, deve-se atentar aos clones classificados como ER.

Alguns clones se destacaram por se distanciarem do ponto de origem: SMIC148-A, SMIB106-7, SMID040-4RY, SMIF313-3, *S. microdontum*, SMIJ319-7, SMIG274-3, SMIE040-6RY, Dakota Rose, SMINIA793101-3, SMIJ456-4Y. Este comportamento diferenciado e contrastante pode ser usado em estudos para a caracterização dos mecanismos que conferem eficiência ou não-eficiência de utilização e também de absorção do P. Além disso, para serem validados, estes resultados devem ser testados em condições de casa de vegetação e em campo.

5 CONCLUSÕES

A definição da eficiência ao P e sua aplicação ao interesse da produção vegetal vão ao encontro da necessidade de encontrar esta habilidade em genótipos, bem como verificar as diferenças entre os materiais. Neste trabalho, foi verificada diferença no comportamento entre os clones de batata testados para eficiência de absorção e utilização de P, sob cultivo *in vitro*.

A produção de matéria seca juntamente com a acumulação de P foram fundamentais para elencar as diferenças na eficiência ao P entre os clones. Os índices de eficiência mostraram a relação direta existente entre estas duas características e as eficiências de absorção e de utilização do P. Em adição, foi observado que as eficiências de utilização tiveram relação inversa com a eficiência de absorção.

Já as características de comprimento de raízes e da parte aérea e número de folhas emitidas foram de importância secundária à caracterização da eficiência ao P, estando associadas a somente alguns clones classificados como eficientes. A partição de matéria seca e de conteúdo de P entre raízes e parte aérea não foi relacionada à eficiência ao P em batata. Por outro lado, estas características corroboram com a exposição da variabilidade existente entre clones de batata em função do fornecimento de P.

Através da construção de um diagrama para a eficiência de utilização de P e resposta à aplicação, quatro clones foram classificados como eficientes e responsivos, quatro como não-eficientes e responsivos, sete como não-eficientes e não-responsivos e sete como eficientes e não-responsivos. Estes resultados são indícios da existência de variabilidade genética e, por isso, consistem numa valiosa ferramenta ao melhoramento genético da batata quanto à eficiência de utilização de P e responsividade a adubação fosfatada.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKHTAR, M. S.; OKY, Y.; ADACHI, T. Phosphorus and biomass distribution, and P-efficiency by diverse *Brassica* cultivars exposed to adequate and P-stress environmental. **Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology**, Okayama, v. 13, n. 1, p. 111-119, Mar. 2008.

ALVAREZ-SANCHEZ, E. et al. Biomass production and phosphorus accumulation of potato as affected by phosphorus nutrition. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 22, n. 1, p. 205-217, Jan. 1999.

ALVES, V. M. C. et al. Cinética de absorção e crescimento do sistema radicular de genótipos de milho contrastantes para eficiência a fósforo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 1, n. 1, p. 85-92, jan./abr. 2002.

ARAÚJO, A. P. Eficiência vegetal de absorção e utilização de fósforo, com especial referência ao feijoeiro. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 163-212. v.1.

ARAÚJO, A. P.; TEIXEIRA, M. G.; ALMEIDA, D. L. Phosphorus efficiency of wild and cultivated genotypes of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under biological nitrogen fixation. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 29, n. 5/6, p. 951-957, May/June 1997.

BAILIAN, L.; McKEAND, S. E.; ALLEN, H. L. Genetic variation in nitrogen use efficiency of lobeolly pine seedlings. **Forest Science**, Lawrence, v. 37, n. 2, p. 613-626, Mar./Apr. 1991.

BAKER, D. E. et al. Phosphorus uptake from soils by corn hybrids selected for high and low phosphorus accumulation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 62, n. 1, p. 103-106, Jan./Feb. 1970.

BAKER, D. E.; WOODING, F. J.; JOHNSON, M. W. Chemical element accumulation by populations of corn (*Zea mays* L.) selected for high and low accumulation of P. **Agronomy Journal**, Madison, v. 63, n. 3, p. 404-406, May/June 1971.

BALDWIN, J. C. et al. Biochemical and molecular analysis of LePS2;1: a phosphate starvation induced protein phosphatase gene from tomato. **Planta**, Berlin, v. 228, n. 2, p. 273-280, July 2008.

BALDWIN, J. C.; KARTHIKEYAN, A. S.; RAGHOTHAMA, K. G. LEPS2, a phosphorus starvation-induced novel acid phosphatase from tomato. **Plant Physiology**, Minneapolis, v. 125, n. 2, p. 728-737, Feb. 2001.

BALEMI, T.; SCHENK, M. K. Genotypic difference of potato in carbon budgeting as a mechanism of phosphorus utilization efficiency. **Plant and Soil**, The Hague, 2009. (no prelo)

BALEMI, T.; SCHENK, M. K. Genotypic variation of potato for P efficiency and quantification of P uptake with respect to root traits. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, 2008. (no prelo)

BAO, J. et al. Transcriptional responses and regulations to deficient phosphorus in plants. **Frontiers of Agriculture in China**, Beijing, v. 3, n. 1, p. 47-54, Jan. 2009.

BATES, T. R.; LYNCH, J. P. Root hairs confer a competitive advantage under low phosphorus availability. **Plant and Soil**, The Hague, v. 236, n. 2, p. 243-250, Oct. 2001.

BIELESKI, R. L. Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 24, p. 225-252, June 1973.

BISOGNIN, D. A. (Coord.) **Recomendações técnicas para o cultivo da batata no Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Santa Maria: UFSM, 1996. 64 p.

BISOGNIN, D. A. et al. Mapping Late Blight Resistance in *Solanum microdontum* Bitter. **Crop Science**, Madison, v. 45, n. 1, p. 340-345, Jan./Feb. 2005.

BISOGNIN, D. A. et al. Produtividade e qualidade de tubérculo de clones de batata. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 30, n. 1, p. 43-56, 2008.

BISOGNIN, D. A.; DOUCHES, D. S. Genetic diversity in diploid and tetraploid potato late blight resistant germplasm. **HortScience**, Alexandria, v. 37, n. 1, p. 178-183, Feb. 2002.

BISSANI, A. C. et al. (Eds.) **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. 1. ed. Porto Alegre: Genesis, 2004. 326 p.

BLAIR, G. Nutrient efficiency-what do we really mean? In: RANDALL, P. J. et al. (Eds.). **Genetic aspects of plant nutrition**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1993. p. 204-213.

BRASIL, E. C. et al. Matéria seca e acúmulo de nutrientes em genótipos de milho contrastantes quanto a aquisição de fósforo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 3, p. 704-712, maio/jun. 2007.

BREGAGNOLI, M. et al. Acúmulo de nutrientes pela cultura da batata cv. Atlantic sob quatro níveis de adubação. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 2, supl. jul. 2004. 1 CD-ROM.

CALDAS, L. S.; HARIDSAN, P.; FERREIRA, M. E. Meios nutritivos. In: TORRES, A. C.; CALDAS, L. S.; BUSO, J. A. (Eds.). **Cultura de tecidos e transformação genética de plantas**. Brasília: Embrapa-SPI/CNPH, 1998. v. 1, p. 87-132.

CAMACHO-CRISTÓBAL, J. J. et al. PRD, an *Arabidopsis AINTEGUMENTA*-like gene, is involved in root architectural changes in response to phosphate starvation. **Planta**, Berlin, v. 228, n. 3, p. 511-522, Aug. 2008.

CASTRO, J. D. Acidez e calagem para a batatinha (*Solanum tuberosum* L.). In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 15., 1983, Campinas. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1983, p. 79-85.

CIARELLI, D. M. et al. Genetic variation among maize genotypes for phosphorus-uptake and phosphorus-use efficiency in nutrient solution. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 21, n. 10, p. 2219-2229, Oct. 1998.

CLARK, R. B.; BROWN, J. C. Differential phosphorus uptake by phosphorus-stressed corn inbreds. **Crop Science**, Madison, v. 14, n. 4, p. 505-508, 1974.

CLARKSON, D. T. Factors affecting mineral nutrient acquisition by plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 36, p. 77-115, 1985.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: SBCS-NRS, 2004. 400 p.

DARRAH, P. R. The rhizosphere and plant nutrition: a quantitative approach. In: BARROW, N. J. (Org.). **Plant nutrition: from genetic engineering to field practices**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1993. p. 3-22.

DECHASSA, N. et al. Phosphorus efficiency of cabbage (*Brassica oleraceae* L. var. *capitata*), carrot (*Daucus carota* L.), and potato (*Solanum tuberosum* L.). **Plant and Soil**, The Hague, v. 250, n. 2, p. 215-224, Mar. 2003.

DUFF, S. M. G.; SARATH, G.; PLAXTON, W. C. The role of acid phosphatase in plant phosphorus metabolism. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 90, n. 4, p. 791-800, Dec. 1994.

DUNCAN, R. R.; BALIGAR, V. C. Genetics, breeding, and physiological mechanisms of nutrient uptake and use efficiency: An overview. In: _____ (Eds.). **Crops and enhancers of nutrient use**. San Diego: Academic Press, 1990. p. 3-35.

EMBRAPA. **A cultura da batata**. Brasília: Embrapa SNH, 1999. 184 p.

FAGERIA, N. D.; BALIGAR, V. C. Screening crop genotypes for mineral stresses. In: WORKSHOP ON ADAPTATION OF PLANTS TO SOIL STRESSES, 1993, Lincoln. **Proceedings...** Lincoln: University of Nebraska, 1993.

FAGERIA, N. D.; KLUTHCOUSKI, J. **Metodologia para avaliação de cultivares de arroz e feijão para condições adversas de solo**. Brasília: Embrapa/CNPAF, 1980. 22 p.

FAO. FAOSTAT, 2008. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/faostat>>. Acesso em: 12 dez. 2008.

FIDELIS, R. R. et al. Metodologias de seleção de cultivares de milho para eficiência na absorção e utilização de nitrogênio. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 52, n. 2, p. 987-1002, 2005.

- FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura**: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa: UFV, 2003. 412 p.
- FIOREZE, C. A batata no estado do Rio Grande do Sul. In: PEREIRA, A. S.; DANIELS, J. (Coord.). **O Cultivo da batata na região sul do Brasil**. 1. ed. Brasília: Embrapa Clima Temperado, 2003. p. 44-52.
- FÖHSE, D.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Phosphorus efficiency of plants. I. External and internal P requirement and P uptake efficiency of different plant species. **Plant and Soil**, The Hague, v. 110, n. 1, p. 101-109, Aug. 1988.
- FÖHSE, D.; JUNGK, A. Influence of phosphate and nitrate supply on root hair formation of rape, spinach and tomato plants. **Plant and Soil**, The Hague, v. 74, n. 3, p. 359-368, Sep./Dec. 1983.
- FORTES, G. R. L.; PEREIRA, J. E. S. Classificação e descrição botânica. In: PEREIRA, A. S.; DANIELS, J. (Coord.). **O Cultivo da batata na região sul do Brasil**. 1. ed. Brasília: Embrapa Clima Temperado, 2003. p. 69-79.
- FORTES, G. R. L.; PEREIRA, J. E. S. Preservação *in vitro* da batata com ácido acetilsalicílico e duas fontes de carboidrato. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 10, p. 1261-1264, out. 2001.
- FOX, R. H. Selection for phosphorus efficiency in corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 9, n. 1, p. 13-37, 1978.
- FREIRE, C. J. S. Correção e adubação do solo. In: PEREIRA, A. S.; DANIELS, J. (Coord.). **O Cultivo da batata na região sul do Brasil**. 1. ed. Brasília: Embrapa Clima Temperado, 2003. p. 159-176.
- FURIHATA, T.; SUZUKI, M.; SAKURAI, H. Kinetic characterization of two phosphate uptake systems with different affinities in suspension-cultured *Catharanthus roseus* protoplasts. **Plant and Cell Physiology**, Kyoto, v. 33, n. 8, p. 1151-1157, 1992.
- FURLANI, A. M. C. et al. Variability of soybean germplasm in relation to phosphorus uptake and use efficiency. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 3, p. 529-536, jul./set. 2002.
- GERLOFF, G. C. Plant efficiencies in the use of nitrogen phosphorus and potassium. In: WORKSHOP ON PLANT ADAPTATION TO MINERAL STRESS IN PROBLEM SOILS, 1976, Beltsville. **Proceedings...** Beltsville: Maryland, 1976. p. 161-173.
- GERLOFF, G. C.; GABELMAN, W. H. Genetic basis of inorganic plant nutrition. In: LÄUCHLI, A.; BIELESKI, R. L. (Eds.). **Inorganic plant nutrition**. Berlin: Springer-Verlag, 1983. p. 453-480. (Encyclopedia of plant physiology, v.15B)
- GILL, M. A.; SALIM, R. M.; ZIA, M. S. Maize growth and uptake of phosphate and copper at different ambient phosphate concentrations. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 8, n. 4, p. 631-636, Dec. 1992.

- GORDON-WEEKS, R. et al. Restricted spatial expression of a high-affinity phosphate transporter in potato roots. **Journal of Cell Science**, London, v. 116, n. 15, p. 3135-3145, Aug. 2003.
- GOURLEY, C. J. P.; ALLAN, D. L.; RUSSELLE, M. P. Plant nutrient efficiency: a comparison and suggested improvement. **Plant and Soil**, The Hague, v. 158, n. 1, p. 29-37, Jan. 1994.
- GRAHAM, R. D. Breeding for nutritional characteristics in cereals. In: TINKER, P. B.; LÄUCHLI, A. (Eds.). **Advances in plant nutrition**. New York: Praeger, 1984. v. 1. p. 57-102.
- GREEN, P. J. The ribonucleases of higher plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 45, p. 421-445, June 1994.
- HAVERKORT, A. J.; van de WAART, M.; MARINUS, J. Field performance of potato microtubers as propagation material. **Potato Research**, Wageningen v. 34, n. 4, p. 53-364, Dec. 1991.
- HAWKES, J. C. Origins of cultivated potatoes and species relationships. In: BRADSHAW, J. E.; MACKAY, G. R. (Eds.). **Potato genetics**. Cambridge: CAB International, 1993. p. 3-42.
- HINSINGER, P. 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. **Plant and Soil**, The Hague, v. 237, n. 2, p. 173-195, Dec. 2001.
- HOLFORD, I. C. R. Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. **Australia Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 35, n. 2, p. 227-239, Apr. 1997.
- HORST, W. J. et al. Agronomic measures for increasing P availability to crops. **Plant and Soil**, The Hague, v. 237, n. 2, p. 211-233, Dec. 2001.
- HORST, W. J.; ABDU, M.; WIESLER, F. Genotypic differences in phosphorus efficiency of wheat. In: BARROW, N. J. (Ed). **Plant nutrition: from genetic engineering to field practice**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1993. p. 367-370.
- IBGE. Estatística. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/servidor_arquivos_est/>. Acesso em: 15 dez. 2008.
- ISRAEL, D. W.; RUFTY Jr., T. W. Influence of phosphorus nutrition on phosphorus and nitrogen efficiencies and associated physiological responses in soybean. **Crop Science**, Madison, v. 28, n. 6, p. 954-960, Nov./Dec. 1988.
- KAWAKAMI, J. et al. Growth and yield of potato plants grown from microtubers in fields. **American Journal of Potato Research**, Orono, v. 80, n. 6, p. 371-378, Nov./Dec. 2003.
- KEERTHISINGHE, G. et al. Effect of phosphorus supply on the formation and function of proteoid roots of white lupin (*Lupinus albus* L.). **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 21, n. 5, p. 467-478, May 1998.

KOLBE, H.; STEPHAN-BECKMANN, S. Development, growth and chemical composition of the potato crop (*Solanum tuberosum* L.). I. Leaf and stem. **Potato Research**, Wageningen, v. 40, n. 1, p. 111-129, Mar. 1997.

_____. Development, growth and chemical composition of the potato crop (*Solanum tuberosum* L.). II. Tuber and whole plant. **Potato Research**, Wageningen, v. 40, n. 2, p. 135-153, June 1997.

LANA, R. M. Q. et al. Variabilidade entre genótipos de feijoeiro na eficiência no uso de fósforo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 778-784, mai./jun. 2006.

LORIA, R. et al. Plant pathogenicity in the genus *Streptomyces*. **Plant Disease**, Saint Paul, v. 81, n. 8, p. 836-846, Aug. 1997.

LEIFERT, C.; MURPHY, K.; LUMSDEN, P. J. Mineral and carbohydrate nutrition of plant cell and tissue culture. **Critical Reviews in Plant Science**, Boca Raton, v. 14, n. 2, p. 83-109, 1995.

LYNCH, J.; LÄUCHLI, A.; EPSTEIN, E. Vegetative growth of the common bean in response to phosphorus-nutrition. **Crop Science**, Madison, v. 31, n. 2, p. 380-387, Mar./Apr. 1991.

LYNCH, J. P. Root architecture and plant productivity. **Plant Physiology**, Minneapolis, v. 109, n. 1, p. 7-13, Sep. 1995.

LYNCH, J. P.; HO, M. D. Rhizoeconomics: carbon costs of phosphorus acquisition. **Plant and Soil**, The Hague, v. 269, n.1/2, p. 45-56, Feb. 2004.

MACHADO, C. T. T.; FURLANI, A. C.; MACHADO, A. T. Índices de eficiência de variedades locais de melhoradas de milho ao fósforo. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 3, p. 225-238, dez. 2001.

MACHADO, C. T. T.; MACHADO, A. T.; FURLANI, A. C. Variação intrapopulacional em milho para características relacionadas com a eficiência de absorção e utilização de fósforo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 3, n. 1, p. 77-91, abr. 2004.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. London: Academic Press, 1995. 888 p.

MARTINEZ, H. E. P. et al. Comportamento de variedades de soja cultivadas sob diferentes níveis de fósforo. II. Translocação do fósforo absorvido e eficiência nutricional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, p. 239-244, 1993.

McDOWELL, R. W. et al. Connecting phosphorus loss from agricultural landscapes to surface water quality. **Chemistry and Ecology**, Ancona, v. 20, n. 1, p. 1-40, Feb. 2004.

MOURA, W. M. et al. Eficiência nutricional para fósforo em linhagens de pimentão. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 3, p. 174-180, nov. 2001.

MURASHIGE, T.; SKOOG, F. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue culture. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 15, p. 473-497, 1962.

NANDI, S. K.; PANT, R. C.; NISSEN, P. Multiphasic uptake of phosphate by corn roots. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 10, n. 6, p. 463-474, Aug. 1987.

OZTURK, L. et al. Variation in phosphorus efficiency among 73 bread and durum wheat genotypes grown in a phosphorus-deficient calcareous soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 69, n. 1/2, p. 69-80, Feb. 2005.

PEREIRA, A. S. Melhoramento genético. In: PEREIRA, A. S.; DANIELS, J. (Coord.). **O Cultivo da batata na região sul do Brasil**. 1. ed. Brasília: Embrapa Clima Temperado, 2003. p. 105-124.

PLAXTON, W. C. The organization and regulation of plant glycolysis. **Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology**, Palo Alto, v. 47, p. 185-214, June 1996.

PLAXTON, W. C.; CARSWELL, M. C. Metabolic aspects of the phosphate starvation response in plants. In: LERNER, H. R. (Org.). **Plant responses to environmental stresses: from phytohormones to genome reorganization**. New York: Dekker, 1999. p. 349-372.

PREZOTTI, L. C.; CARMO, C. A. S.; ANDRADE NETO, A. P. M. **Nutrição mineral da batata**. Vitória: EMCAPA, 1986. 44 p.

PURSEGLOVE, J. D.; SANDERS, F. E. The growth and phosphorus economy of the early potato (*Solanum tuberosum*). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 12, n. 11, p. 1105-1121, Nov. 1981.

RAGHOTHAMA, K. G. Phosphate acquisition. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 50, p. 665-693, June 1999.

RAGHOTHAMA, K. G. Phosphate transport and signaling. **Current Opinion in Plant Biology**, London, v. 3, n. 3, p. 182-187, June 2000.

RAGHOTHAMA, K. G.; KARTHIKEYAN, A. S. Phosphate acquisition. **Plant and Soil**, The Hague, v. 274, n. 1/2, p. 37-49, Jul. 2005.

RANALLI, P. et al. Microtuber and minituber production and field performance compared with normal tubers. **Potato Research**, Wageningen, v. 37, n. 4, p. 383-391, Dec. 1994.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Fósforo orgânico do solo. In: SANTOS, C. R.; CAMARGO, F. A. O. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 139-155.

ROCA, W. M.; ARIAS, D. I.; CHAVES, R. Métodos de conservación *in vitro* del germoplasma. In: ROCA, W. M.; MROGINSKI, L. A. (Eds.). **Cultivo de tejidos en la agricultura: fundamentos y aplicaciones**. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1991. p. 697-714.

RUNGE-METZGER, A. Closing the cycle: obstacles to efficient P management for improved global security. In: TIESSEN, H. (Ed.) **Phosphorus in the global environment**. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 1995. p. 27-42.

RUSSOWSKI, D.; NICOLOSO, F. T. Nitrogênio e fósforo no crescimento de plantas de ginseng brasileiro [*Pfaffia glomerata* (Spreng.) Pedersen] cultivadas *in vitro*. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 1, p. 57-63, jan./fev. 2003.

SANT'ANA, E. V. P. **Comportamento de genótipos de arroz (*Oryza sativa* L.) de terras altas em dois níveis de fósforo em solo e *in vitro***. 2000. 143 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiânia, Goiânia.

SCHACHTMAN, D. P.; REID, R. J.; AYLING, S. M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. **Plant Physiology**, Minneapolis, v. 116, n. 2, p. 447-453, Feb. 1998.

SHANE, M.; LAMBERS, H. Cluster roots: a curiosity in context. **Plant and Soil**, The Hague, v. 274, n. 1/2, p. 111-125, Jul. 2005.

SHEN, J. et al. Role of phosphorus nutrition in development of cluster roots and release of carboxylates in soil-grown *Lupinus albus*. **Plant and Soil**, The Hague, v. 248, n. 1/2, p. 199-206, Jan. 2003.

SIDDIQI, 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**, New York, v. 4, p. 289-302, 1981.

SOUZA, Z. S.; SILVA, A. C. F.; BEPPLER NETO, R. **Cadeias produtivas do estado de Santa Catarina**. Florianópolis: Epagri, 1999. 84 p. (Epagri. Boletim Técnico, 104).

STARNES, D. L.; PADMANABHAN, P.; SAHI, S. V. Effect of P sources on growth, P accumulation and activities of phytase and acid phosphatases in two cultivars of annual ryegrass (*Lolium multiflorum* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v. 46, n. 5/6, p. 580-589, May/June 2008.

TABALDI, L. A. et al. Physiological and oxidative stress responses of four potato clones to aluminum in nutrient solution. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Piracicaba, v. 19, n. 3, p. 211-222, Sep. 2007.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TAVARES, S.; CASTRO, P. R. C.; MELO, P. C. T. **Cultura da batata**. Piracicaba: DIBD, 2002. 7 p. (Série Produtor Rural, 18).

TENNANT, D. A test of modified line intersect method of estimating root length. **The Journal of Ecology**, Oxford, v. 63, n. 3, p. 995-1001, Sep./Dec. 1975.

VALE, F. Nutrição adequada produtividade com lucro. **Batata Show**, Itapetininga, v. 3, n. 6, mar. 2003.

VANCE, C. P. Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition: plant nutrition in a world of declining renewable resources. **Plant Physiology**, Minneapolis, v. 127, n. 2, p. 390-397, Oct. 2001.

VANCE, C. P.; UHDE-STONE, C.; ALLAN, D. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, Oxford, v. 157, n. 3, p. 423-457, Mar. 2003.

VON UEXKÜLL, H. R.; MUTERT, E. Global extent, development and economic impact of acid soils. **Plant and Soil**, The Hague, v. 171, n. 1, p. 1-15, Apr. 1995.

XU, H. X.; WENG, X. Y.; YANG, Y. Effect of phosphorus deficiency on the photosynthetic characteristics of rice plants. **Russian Journal of Plant Physiology**, New York, v. 54, n. 6, p. 741-748, Nov. 2007.

WESTERMANN, D. T.; DAVIS, J. R. Potato nutritional management changes and challenges into the next century. **American Potato Journal**, Onro, v. 69, n. 11, p. 753-767, Nov. 1992.

WHITEAKER, G. et al. Intraspecific differences in growth of beans at stress levels of phosphorus. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 101, n. 4, p. 472-475, July/Aug. 1976.

WIENEKE, J. Phosphorus efficiency and phosphorus remobilization in two sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cultivars. **Plant and Soil**, The Hague, v. 123, n. 2, p. 139-145, Apr. 1990.

WISSUWA, M. et al. Substitution mapping rice from a phosphorus-deficient soil. **Theoretical and Applied Genetics**, New York, v. 105, n. 6/7, p. 890-897, Nov. 2002.

YADAV, R. S.; TARAFDAR, J. C. Phytase and phosphatase producing fungi in arid and semi-arid soils and their efficiency in hydrolyzing different organic P compounds. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 35, n.6, p. 745-751, June 2003.

YAN, X. et al. QTL mapping of root hair and acid exudation traits and their relationship to phosphorus uptake in common bean. **Plant and Soil**, v. 265, n. 1/2, p. 17-29, Aug. 2004.

APÊNDICE A - Concentrações dos componentes nos meios de cultivo utilizados nos experimentos com 22 clones de batata.

		Baixo P	Alto P
Fontes (mg L ⁻¹)	NH ₄ NO ₃	1650	1650
	KNO ₃	1900	1900
	CaCl ₂ .2H ₂ O	440	440
	MgSO ₄ .7H ₂ O	370	370
	KH ₂ PO ₄	17	170
	KCl	83,8183	-
	FeSO ₄ .7H ₂ O	5,57	5,57
	C ₁₀ H ₁₄ N ₂ O ₈ Na ₂ .2H ₂ O	7,45	7,45
	H ₃ BO ₃	0,62	0,62
	MnSO ₄ .H ₂ O	1,69	1,69
	ZnSO ₄ .7H ₂ O	0,86	0,86
	KI	0,083	0,083
	Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O	0,025	0,025
	CuSO ₄ .5H ₂ O	0,0025	0,0025
	CoCl ₂ .6H ₂ O	0,0025	0,0025
Elementos (mg L ⁻¹)	P	3,8694	38,6936
	N	843,9185	843,9185
	K	784,2418	784,2418
	Ca	119,9503	119,9503
	Mg	36,4865	36,4865
	S	57,1241	57,1241
	Cl	251,7802	212,222
	Fe	8,3917	8,3917
	B	1,0840	1,0840
	Co	0,0062	0,0062
	Cu	0,0064	0,0064
	Mn	5,4933	5,4933
	Mo	0,0991	0,0991
	I	0,6345	0,6345
	Zn	1,9556	1,9556
Na	6,9494	6,9494	
Suplementos (mg L ⁻¹)	Sacarose	30000	30000
	Mio-inositol	100	100
	Agar	6000	6000
	Glicina	2,0	2,0
	Ácido nicotínico	0,5	0,5
	Piridoxina	0,5	0,5
	Tiamina	0,1	0,1

APÊNDICE B - Concentração de P na matéria seca da parte aérea e de raízes de 22 clones de batata cultivados *in vitro* sob baixo e alto nível de P.

Clone	Parte aérea ($\mu\text{g g}^{-1}$)		Raízes ($\mu\text{g g}^{-1}$)	
	baixo P	alto P	baixo P	alto P
Asterix	2383 cB*	5759 bA	2261 cB	6547 cA
Macaca	3428 bA	3789 dA	4473 bB	7047 cA
Dakota Rose	1631 cB	5318 bA	4403 bB	20552 aA
Michigan Purple	1970 cB	5247 bA	3626 bB	7522 cA
SMINIA00017-6	2153 cB	6124 bA	2083 cB	5852 dA
SMINIA793101-3	1290 cB	3984 dA	1958 cB	4602 dA
SMINIA90244-1	1656 cB	3711 dA	2592 cB	6040 dA
SMINIA97145-2	1634 cB	4832 cA	2618 cB	7914 cA
SMIC148-A	2464 cB	4672 cA	3562 bB	5838 dA
SMIB106-7	1557 cB	3604 dA	1285 cB	5463 dA
SMID040-4RY	1925 cB	4587 cA	1910 cB	4306 dA
SMIE040-6RY	2942 bB	7149 aA	4884 bA	5236 dA
SMIF212-3	2838 bB	7883 aA	3157 cB	6860 cA
SMIF313-3	3346 bB	5441 bA	2884 cB	5926 dA
SMIG145-1	2296 cB	4427 cA	3823 bB	6147 dA
SMIG227-2	1627 cA	2704 dA	2818 cB	5322 dA
SMIG274-3	3649 bB	4695 cA	5083 bA	6784 cA
SMIJ319-1	2002 cB	4845 cA	3723 bB	11161 bA
SMIJ319-7	3449 bB	6053 bA	3542 bB	9890 bA
SMIJ456-4Y	1578 cB	4400 cA	2522 cB	6169 dA
SMIJ461-1	2832 bB	6419 bA	5085 bB	10862 bA
<i>S. microdontum</i>	6041 aA	6198 bA	9730 aA	10528 bA
Média	2485.8	5083.6	3546.3	7571.2
CV(%)	15.87		20.21	

* Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Scott-Knott e médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha dentro de cada variável não diferem significativamente entre si pelo teste F, a 5% de probabilidade. Baixo P: 3,869 mg P L⁻¹, alto P: 38,693 mg P L⁻¹.

APÊNDICE C - Eficiência de utilização de P sob baixo nível de P e resposta à aplicação na produção de matéria seca de raízes (A) e da planta (B) de 22 clones de batata cultivados *in vitro*.

