

VARIAÇÃO INTRAPOPULACIONAL EM MILHO PARA CARACTERÍSTICAS RELACIONADAS COM A EFICIÊNCIA DE ABSORÇÃO E UTILIZAÇÃO DE FÓSFORO

CYNTHIA TORRES DE TOLEDO MACHADO¹; ALTAIR TOLEDO MACHADO¹; ÂNGELA MARIA CANGIANI FURLANI²

¹Eng. Agrônomos, Pesquisadores da Embrapa Cerrados. Caixa Postal 08223, CEP. 73301-970 Planaltina, DF. E-mail: cynthia@cpac.embrapa.br (autor para correspondência)

²Eng. Agrônoma, Pesquisadora do Instituto Agronômico - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Solos e Recursos Ambientais. Caixa Postal 28, CEP. 13001-970 Campinas, SP.

Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v.3, n.1, p.77-91, 2004

RESUMO - Foram avaliadas famílias endogâmicas S1 (FS₁), obtidas a partir da variedade experimental Eldorado (Nitrodente), em campo e em solução nutritiva, a fim de verificar a variabilidade intrapopulacional para características relacionadas à eficiência de absorção e utilização de fósforo (P). Em campo, foram avaliadas 200 FS₁ quanto à produção de grãos. Em solução nutritiva, foram determinadas características cinéticas de absorção de P e a morfologia do sistema radicular, além da produção de matéria seca, acumulação de P e eficiência de utilização do nutriente de duas subpopulações contrastantes quanto ao caráter produção de grãos. Verificou-se variabilidade entre as FS₁ e entre as subpopulações para a produção matéria seca e de grãos, eficiência de utilização de P, parâmetros cinéticos de absorção de P e morfologia do sistema radicular. Foram caracterizadas duas subpopulações bastante distintas, sendo que ND10, mais produtiva a campo, foi a de maior eficiência de utilização de P, menores Vmax, Km e Cmin e sistema radicular mais extenso. ND2, uma das subpopulações menos produtivas a campo, apresentou a menor eficiência de utilização de P em solução nutritiva, os maiores valores para Vmax, Km e Cmin e o sistema radicular menos desenvolvido. Essa variabilidade existente dentro da população indica o potencial para o melhoramento da variedade para a eficiência no uso de P.

Palavras-chave: *Zea mays* L., variabilidade genética, cinética, sistema radicular, eficiência nutricional.

INTRA-POPULATION VARIABILITY IN CHARACTERISTICS RELATED TO PHOSPHORUS UPTAKE AND UTILIZATION EFFICIENCY IN MAIZE

ABSTRACT - S1 endogamic families (FS₁), obtained from Eldorado (Nitrodente) experimental maize variety were evaluated to verify intra-population variability in phosphorus (P) uptake and utilization efficiency in field and nutrient solution. In the field two hundred FS₁ were evaluated to grain yield. In nutrient solution, kinetic parameters and root system morphology, plus dry matter yield, P accumulation and P efficiency utilization were determined in two distinct sub-populations. Variability among FS₁ and among sub-populations were observed to grain and dry matter yield, P efficiency utilization, kinetics and morphological parameters. Two very distinct sub-populations were characterized, having ND10, with higher yield, presented higher P efficiency, lower Vmax, Km and Cmin and higher root system and ND2, one of the sub-populations with lower yield at field, presented lower P efficiency, higher values to Vmax, Km

and Cmin, and a more developed root system. This genetic variability within the population shows their potential to improve efficiency in the use of P.

Key words: *Zea mays* L., genetic variability, kinetics, root system, nutritional efficiency.

O potencial para melhoramento genético, visando determinada característica é dependente, em parte, da magnitude e natureza das diferenças entre os genótipos e da influência do meio ambiente sobre os mesmos (Clark, 1983). Fatores de solo e do ambiente podem ser responsáveis pela expressão das diferenças entre cultivares com relação à absorção, translocação e/ou utilização de nutrientes e tolerância a baixas ou altas concentrações de minerais (Fawole *et al.*, 1982). A detecção de tais diferenças sob condições nutricionais específicas, particularmente sob estresse, é objetivo da maioria dos projetos em genética nutricional e a incorporação dessa variabilidade às cultivares pode ampliar a sua adaptabilidade e aumentar a produtividade vegetal (Bliss, 1981). Walker & Raines (1988) postularam que o reconhecimento e entendimento das diferenças genéticas são capazes de promover um perfeito ajuste da eficiência de uso de fertilizantes.

Muitos dos caracteres de tolerância aos estresses são poligênicos, o que significa que a expressão fenotípica dos mesmos não pode ser facilmente diferenciada nos indivíduos, pois a modificação da mesma é contínua, incluindo efeitos dos genes e efeitos devidos à interação do genótipo com o meio ambiente (Sánchez, 1987; Duncan, 1994). Além disso, se muitos genes controlam a expressão de um caráter quantitativo, é possível haver genes deletérios e alelos favoráveis, controlando o caráter que está sendo transferido (Bliss, 1981).

Vários desses caracteres de tolerância possuem herança quantitativa (Duncan, 1994) de herdabilidade relativamente baixa, o que traz certa dificuldade à transferência de um alto nível de expressão do caráter desejado (Bliss, 1981). Constitui-se complicador, ainda, a complexidade dos

mecanismos que governam as reações de tolerância e resistência e que não estão completamente compreendidos (Duncan, 1994).

Os fatores determinantes das diferenças genotípicas na nutrição fosfatada compreendem as reações e processos que ocorrem na interface solo-raiz, a morfologia do sistema radicular, as características de absorção das raízes e aquelas relacionadas ao transporte e partição do nutriente entre as partes da planta e ao uso do nutriente em processos fisiológicos que resultam no crescimento e produção das mesmas. O entendimento sobre o grau de hereditariedade e tipo de herança envolvida nessas características, a inter-relação dos processos envolvidos e a definição de técnicas adequadas para a seleção de plantas são necessários para se avaliar o potencial e a perspectiva de sucesso de um programa de melhoramento de plantas para eficiência quanto aos estresses de nutrientes (Duncan, 1994; Furlani *et al.*, 1998; Dechen *et al.*, 1999). Sobre o controle gênico desses processos, tem-se que as características relacionadas à absorção de fósforo (P) são descritas como poligênicas (Goldstein, 1991; Clarkson & Hawkesford, 1993); as de eficiência a P também são poligênicas, de caráter aditivo e dominante (Fawole *et al.*, 1982; Gabelman & Gerloff, 1983; Furlani *et al.*, 1984; 1998); e as de assimilação do P são tidas como de dominância gênica parcial (Spivakou, 1990, citado por Duncan, 1994).

Variações inter e intrapopulacionais em milho quanto à absorção, translocação, distribuição e uso de P têm sido demonstradas, bem como resultados relacionados à cinética de absorção, morfologia do sistema radicular, atividade enzimática, benefícios da associação simbiótica com fungos micorrízicos e remobilização do P entre as partes

das plantas e sua importância nos estudos de metabolismo e identificação das bases fisiológicas e genéticas da eficiência de utilização do nutriente (referências em Machado, 2000 e Furlani & Machado, 2002).

O presente estudo teve por objetivo caracterizar famílias endogâmicas S1 da variedade de milho Eldorado (Nitrodente). Foram determinadas características agrônômicas e a produção de grãos a campo e nos ensaios conduzidos em solução nutritiva foram determinados a produção de matéria seca, absorção (parâmetros cinéticos e acumulação de P), morfologia radicular e índice de eficiência de utilização de P.

Material e Métodos

Experimento 1 - Avaliação de famílias S1 da variedade Eldorado (Nitrodente) em condições de campo.

Foram avaliadas 200 famílias endogâmicas S1 da variedade Eldorado (Nitrodente), em 2 látices 10x10, sem testemunhas intercalares e com 3 repetições, em condições de campo, em um Latossolo Vermelho Distroférico (Embrapa, 1999) da área experimental da Mitla Pesquisa Agrícola, em Uberlândia, MG, no ano agrícola de 1995-96. A parcela experimental constituiu-se de 1 linha de 5 metros, com 1 metro de espaçamento.

A análise química do solo, realizada de acordo com o Sistema IAC de Análise de Solo (Raij *et al.*, 2001), apresentou os seguintes valores: pH em CaCl_2 : 4,0; matéria orgânica: 26 g.dm^{-3} ; P (resina): 34 mg.dm^{-3} ; K, Ca, Mg, H+Al, soma de bases (SB) e capacidade de troca catiônica (CTC): 0,4; 6,7; 2,0; 5,0; 9,0 e $59,3 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$, respectivamente; e saturação de bases (V): 15,3%. Procedeu-se à correção da acidez e à adubação de acordo com os resultados da análise de solo e recomendação para a cultura no estado de Minas Gerais (Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais,

1989). Foram aplicados no plantio 300 kg da fórmula 8-28-20 (24 kg.ha^{-1} de N; 37 kg.ha^{-1} de P e 60 kg.ha^{-1} de K_2O). No desbaste (aproximadamente aos 30 dias após o plantio), foi feita a adubação nitrogenada de cobertura, aplicando-se 60 kg.ha^{-1} de N, sendo 18 kg na forma de sulfato de amônio e 42 kg na forma de uréia. Aproximadamente aos 60 dias após o plantio, por ocasião do florescimento, determinou-se a altura das plantas, o número de plantas por parcela e o número de plantas quebradas e acamadas. Ao final do ciclo, aos 130 dias aproximadamente, determinou-se a produção de grãos.

Experimento 2 - Determinação de características relacionadas à eficiência de absorção e utilização de P em famílias endogâmicas S1 da variedade Eldorado (Nitrodente), em solução nutritiva.

Este ensaio foi conduzido em câmara de crescimento no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Solos e Recursos Ambientais do Instituto Agrônomo (Campinas), entre 02 e 29/05/97. Utilizou-se a técnica de seleção de plantas jovens em solução nutritiva proposta por Furlani & Furlani (1988). O delineamento experimental adotado foi o de blocos ao acaso, com cinco repetições.

Para esse experimento, foram utilizadas duas subpopulações, obtidas da seguinte forma: foram formadas 10 subamostras de 20 famílias representativas da população de 200 famílias (10% do número total de famílias), de acordo com a classificação ascendente quanto à produção de grãos. Esse nível foi considerado suficiente para que não houvesse perda de genes, considerando semelhantes as famílias S1 que originaram o grupo, e é considerado aceitável a partir da aplicação dos estimadores dos coeficientes de identidade por descendência em um esquema de auto-fecundação (Souza Júnior, 1989). De cada grupo de 20 famílias, foram excluídas as 4 mais produtivas e as 4 menos produtivas. As 12 intermediárias restantes foram agrupadas e tiveram

suas sementes misturadas. Assim, esses 10 grupos de famílias, que constituíram as subpopulações, receberam a denominação de ND1 a ND10, em referência à classificação de produção de grãos. Essa estratégia inicial de subdivisão das 200 famílias avaliadas em campo foi definida com o objetivo de desenvolver metodologia confiável e de fácil aplicação, que possa ser usada como rotina nos trabalhos de melhoramento genético.

As 10 subpopulações foram testadas em solução nutritiva em concentrações de P para se definir o nível de P para crescimento das plantas destinadas ao ensaio de cinética (Machado, 2000). Em função dos resultados desses ensaios (campo e solução nutritiva com doses de P), foram escolhidas as subpopulações denominadas ND2 e ND10, sendo a primeira a menos produtiva e a segunda, a mais produtiva. A subpopulação ND1 foi preterida em função do risco das plantas não se desenvolverem bem o suficiente para fornecer material para as análises.

As sementes foram germinadas em rolo de papel de germinação e as plântulas, com sete dias de idade, foram transplantadas em número de três por vaso. Procedeu-se à determinação do conteúdo de P em amostras das sementes, cujos valores médios (por 100 sementes) foram 56 e 64 mg de P, respectivamente para ND2 e ND10. Os vasos com capacidade de 3 L receberam a solução nutritiva, cuja composição, descrita em Furlani & Furlani (1988), constituiu-se em mg.L⁻¹ de: Ca=151; K=141; Mg=17; N-NO₃=138; N-NH₄=20; S=56; Cl=33; Fe=3,6; Mn=0,5; B=0,27; Zn=0,15; Cu=0,04; Mo=0,08, nas formas de Ca(NO₃)₂.4H₂O; NH₄NO₃; KCl; K₂SO₄; KNO₃; MgSO₄.7H₂O; Fe-HEDTA (preparado com HEDTA e FeSO₄.7H₂O); MnCl₂.4H₂O; H₃BO₃; ZnSO₄.7H₂O; CuSO₄.5H₂O e Na₂MoO₄.2H₂O. O P foi adicionado, na forma de KH₂PO₄, em uma única dose de 4 mg L⁻¹ de P (12 mg P vaso⁻¹ ou 129

μmol.L⁻¹ de P). O pH inicial da solução foi de 5,2. A solução foi continuamente arejada durante o experimento, não sendo renovada, e o volume do vaso foi completado com água destilada em dias alternados.

Durante o período de crescimento das plantas, até 25 dias de idade, as médias das temperaturas máximas e mínimas foram de, respectivamente, 30 + 1 °C e 21 + 1 °C. A intensidade luminosa na câmara de crescimento foi de 200 μmol.m⁻².s⁻¹ de luz fotossinteticamente ativa.

Aos 25 dias de idade (18 dias em solução nutritiva), as plantas foram transferidas para vasos, contendo novas soluções nutritivas de mesma formulação, porém isentas de P. Após 24 horas nessa solução, as plantas foram suspensas e adicionaram-se aos vasos 8 mg P L⁻¹ (ou 258 μmol P L⁻¹). Essa concentração foi definida em um teste prévio como sendo adequada para que ocorresse a sua total absorção num período de até 24 horas. A solução foi homogeneizada rapidamente, e uma alíquota de 10 ml foi retirada e transferida para frasco de vidro para determinação da concentração inicial de P em cada vaso. A seguir, as plantas foram recolocadas nos vasos e a contagem de tempo para a retirada das alíquotas de 10 ml foi iniciada em intervalos regulares de 90 minutos. Foram feitas sete amostragens, mantendo o intervalo de 90 minutos e, uma última, no final do período de 24 horas do início do teste de cinética. A temperatura média na câmara de crescimento durante esse período de retirada das alíquotas foi de 25 °C.

O fósforo foi determinado nas alíquotas pelo método de Murphy & Riley (1962). Em seguida, as plantas foram lavadas em água destilada e separadas em parte aérea (folhas e colmos mais bainhas) e raízes. Nas raízes frescas, determinou-se o comprimento e área média do sistema radicular pelo Sistema Integrado para Análise de Raízes e Cobertura de Solo (SIARCS), desenvolvido pela EMBRAPA-

CNPDIA (Jorge, 1996). A estimativa do raio médio radicular foi feita, conforme descrito em Rossiello *et al.* (1995). A seguir, as plantas foram secas em estufa, pesadas para a determinação da massa de matéria seca (MS), moídas e submetidas à análise química de P pelo método do vanado-molibdato de amônio (Bataglia *et al.*, 1983). Foram calculadas também as seguintes variáveis: (1) relação raiz/parte aérea de MS; (2) conteúdo de P na MS da parte aérea e das raízes; (3) relação parte aérea/raízes do conteúdo de P; e (4) índice de eficiência de utilização (IE), de acordo com Siddiqi & Glass (1981): $IE = (MS)^2 / \text{conteúdo total de P}$. Os dados foram submetidos à análise de variância e testes de comparação de médias (Duncan).

A estimativa dos parâmetros cinéticos foi feita, utilizando-se a aproximação gráfico-matemática proposta por Ruiz (1985), no programa de computador CINÉTICA, versão 1.2, na qual a curva da quantidade de P na solução (Q), em função do tempo (t), é inicialmente representada graficamente, e, a seguir, calculada por duas equações matemáticas. A primeira é uma equação de regressão linear na região inicial da curva, cuja declividade permite o cálculo de V_{max} , e a segunda é uma equação de regressão de modelo potencial, exponencial ou exponencial-recíproco que melhor se ajuste aos dados, para a região curva do gráfico. O valor de K_m é determinado com o auxílio das duas equações (Ruiz, 1985). O valor de C_{min} foi estimado a partir da equação de regressão ajustada aos dados do esgotamento de P no último ponto do intervalo experimental. Os valores dos parâmetros cinéticos foram determinados para cada repetição (parcela).

Resultados e Discussão

As características agrônômicas das 200 famílias endogâmicas S1 (FS_1) avaliadas em condições de campo são apresentadas na Tabela 1 (estande, índices de espigas por planta, altura de

planta, altura de espigas e produção de grãos) na forma de média geral e amplitude de variação geral, média das 10 melhores FS_1 (correspondente a 10% das 100 FS_1 avaliadas em cada látice) e coeficiente de variação dentro de cada látice. Por essas características, verificou-se a existência de grande variabilidade dentro da população de Eldorado (Nitrodente), e as FS_1 , identificadas dentro das 10% melhores, taxa usualmente empregada em trabalhos de melhoramento, foram usadas na continuidade do trabalho de seleção e melhoramento dessa variedade.

Na Tabela 2, as 200 FS_1 foram listadas e agrupadas quanto à classificação ascendente para a produção de grãos. Dessa forma, têm-se os valores de produção obtidos para cada família, característica que permitiu a separação dos materiais mais e menos produtivos e também foi útil para definir estratégias de trabalhos que busquem o aproveitamento da variabilidade intrapopulacional e suas causas determinantes.

No ensaio seguinte, o objetivo foi verificar a existência de diferenças nas características da cinética de absorção de P e na morfologia do sistema radicular dentro da população. Duas subpopulações contrastantes (ND2 e ND10) na produção de grãos em campo e de matéria seca em solução nutritiva (Machado, 2000) foram avaliadas. Seguiu-se também a recomendação de Fox (1978) sobre a realização de avaliações morfológicas e fisiológicas em materiais genéticos comprovadamente contrastantes.

Os parâmetros cinéticos de absorção de P e as características morfológicas do sistema radicular das subpopulações são apresentados na Tabela 3. A subpopulação ND10 apresentou os menores valores para K_m , C_{min} e V_{max} , embora a diferença não tenha sido significativa para este último parâmetro. Tanto a maior área do sistema radicular quanto o maior comprimento de raízes foram obtidos pela

TABELA 1. Valores médios obtidos na avaliação de 200 FS₁ da variedade Eldorado (Nitrodente) e com os 10% dos S₁ selecionados, com os respectivos coeficientes de variação (CV) e amplitude de variação (AV) para cada látice, considerando os caracteres estande (E, n° plantas/5m²), índice de espigas por planta (IE), altura de planta (AP, cm), altura de espiga (AE, cm) e produção de grãos (PG, kg.ha⁻¹).

	E	IE	AP	AE	PG
Látice 1					
100 S ₁	14	1,19	132	57	3097
S ₁ selecionadas	18	1,80	156	71	4394
AV	3-20	0,70-4,18	95-171	38-79	1546-5015
CV (%)	19,84	38,89	11,93	18,76	37,93
Látice 2					
100 S ₁	13	1,23	135	59	3258
S ₁ selecionadas	17	1,61	159	74	5350
AV	4-17	0,78-1,75	107-166	37-81	1016-6001
CV (%)	21,36	22,41	11,41	17,78	30,12

subpopulação ND 10. O raio médio radicular das subpopulações foi bastante semelhante, não tendo sido verificada diferença significativa entre ambas para esta característica.

Comparando as duas subpopulações, verificou-se que ND10 possui, em relação a ND2, atributos considerados desejáveis em um genótipo para eficiência na aquisição de P quando o nutriente se encontra em baixas concentrações: menores Km e Cmin e sistema radicular mais extenso. ND2, por outro lado, deve ser eficiente na absorção de P apenas em condições de disponibilidade do nutriente bastante elevada, dados os maiores valores de Km e Cmin. Os valores de Vmax e Km foram comparáveis aos observados por Ciarelli *et al.* (1998) em híbridos de milho e também entre linhagens e progênies derivadas de seus cruzamentos, e também aos resultados de Machado (2000), obtidos com variedades, ambos estudos conduzidos, seguindo a mesma metodologia empregada neste trabalho.

A absorção dos nutrientes pelas plantas, entre os quais o P, possui características da cinética de saturação de Michaelis-Menten, definida pelos parâmetros Vmax e Km, a mesma que descreve a atividade enzimática. Os transportadores de nutrientes

localizados nas membranas celulares são considerados como enzimas, com sítios seletivos de ligação para substratos específicos a serem transportados, neste caso, os íons (Marschner, 1995).

O Vmax (ou I_{max}) corresponde à máxima taxa de transporte quando todos os sítios carregadores disponíveis estão ocupados, ou seja, à velocidade ou influxo máximo de absorção. O Km, a constante de Michaelis-Menten, é a concentração do íon na qual se atinge a metade da velocidade máxima de absorção. O valor de Km reflete a afinidade dos sítios carregadores pelo íon a ser transportado, da mesma forma que nas reações enzimáticas, em que indicam a afinidade da enzima pelo substrato: quanto menor o valor de Km, maior a afinidade do carregador pelo íon (Epstein, 1975).

O conceito de concentração mínima (Cmin) foi introduzido a partir de evidências que durante o processo de absorção de determinado nutriente (de P, inclusive) ocorre também o seu efluxo das raízes para a solução externa. O efluxo acontece por diversos motivos, entre os quais a alteração ou perda da integridade da membrana plasmática, o balanço de cátions e ânions no apoplasto e simplasto, que é dependente das concentrações externas e internas

TABELA 2. Produção de grãos das FS₁ da variedade Eldorado (Nitrodente)⁽¹⁾, em condições de campo. Uberlândia, 1995/1996.

CA	NP	PG	CA	NP	PG									
Grupo 1			Grupo 3			Grupo 5			Grupo 7			Grupo 9		
1	128	1016	41	169	2487	81	136	2988	121	120	3278	161	13	3841
2	185	1173	42	20	2510	82	21	2990	122	168	3280	162	44	3869
3	107	1350	43	67	2541	83	149	3004	123	96	3300	163	165	3908
4	159	1523	44	45	2546	84	126	3005	124	91	3304	164	34	3929
5	54	1546	45	118	2567	85	147	3011	125	79	3308	165	186	3948
6	134	1577	46	200	2569	86	193	3013	126	102	3322	166	160	3954
7	127	1754	47	108	2570	87	94	3022	127	37	3327	167	138	3993
8	52	1767	48	72	2581	88	71	3024	128	122	3329	168	65	4010
9	180	1794	49	146	2592	89	93	3025	129	110	3345	169	133	4031
10	90	1795	50	63	2604	90	101	3027	130	175	3346	170	156	4062
11	163	1817	51	15	2629	91	143	3035	131	148	3368	171	77	4064
12	188	1818	52	144	2629	92	28	3041	132	103	3369	172	106	4075
13	158	1844	53	60	2651	93	25	3048	133	182	3376	173	183	4152
14	176	1952	54	80	2663	94	64	3052	134	114	3396	174	100	4154
15	170	1961	55	70	2702	95	35	3057	135	49	3397	175	111	4208
16	162	2015	56	26	2715	96	197	3057	136	131	3401	176	76	4237
17	104	2036	57	184	2724	97	99	3087	137	195	3408	177	196	4303
18	17	2037	58	123	2727	98	79	3092	138	167	3417	178	98	4306
19	56	2038	59	10	2738	99	53	3104	139	61	3437	179	66	4324
20	75	2052	60	172	2742	100	88	3106	140	1	3437	180	6	4339
Grupo 2			Grupo 4			Grupo 6			Grupo 8			Grupo 10		
21	124	2101	61	36	2749	101	50	3115	141	85	3485	181	166	4346
22	119	2109	62	84	2763	102	22	3121	142	192	3494	182	14	4390
23	153	2116	63	16	2769	103	187	3134	143	43	3498	183	51	4401
24	142	2121	64	177	2771	104	140	3135	144	18	3504	184	150	4584
25	23	2171	65	69	2773	105	173	3167	145	39	3508	185	171	4597
26	86	2176	66	87	2773	106	33	3167	146	62	3509	186	32	4707
27	132	2185	67	73	2782	107	189	3176	147	164	3548	187	121	4813
28	2	2210	68	38	2786	108	24	3183	148	59	3548	188	152	4834
29	8	2210	69	30	2810	109	181	3187	149	4	3571	189	135	4949
30	117	2227	70	92	2813	110	78	3187	150	31	3605	190	115	4961
31	29	2257	71	105	2858	111	74	3189	151	199	3615	191	154	4979
32	155	2271	72	7	2901	112	48	3190	152	130	3616	192	58	5015
33	81	2282	73	57	2905	113	97	3202	153	40	3620	193	137	5080
34	11	2319	74	161	2921	114	47	3206	154	3	3647	194	125	5093
35	82	2365	75	55	2933	115	178	3207	155	42	3667	195	151	5162
36	27	2367	76	109	2944	116	68	3214	156	145	3674	196	198	5309
37	89	2377	77	190	2957	117	194	3237	157	116	3730	197	139	5478
38	174	2417	78	41	2959	118	19	3262	158	9	3761	198	157	5560
39	95	2450	79	112	2976	119	141	3269	159	46	3802	199	129	5878
40	83	2451	80	5	2984	120	191	3278	160	12	3840	200	113	6001

1. CA: classificação ascendente quanto à produção de grãos; NP: número de identificação da FS₁; PG: produção de grãos (kg.ha⁻¹), média de 3 repetições.

2. A área hachurada compreende as FS₁ que foram agrupadas para a formação das 10 subpopulações, conforme descrito em *Material e Métodos*.

dos nutrientes e das interações entre os mesmos, vacúolo e citoplasma e do controle alostérico determinadas diferenças no potencial eletroquímico entre minado pela demanda da parte aérea (Marschner,

TABELA 3. Parâmetros cinéticos de absorção de P, Vmax, Km e Cmin e características morfológicas do sistema radicular de duas subpopulações contrastantes de milho cultivadas em solução nutritiva. Vasos com três plantas. Média de 5 repetições. Valores de Vmax expressos por unidade de massa seca de raiz.

Sub-populações	Vmax --- $\mu\text{mol.g}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ---	Km --- $\mu\text{mol.L}^{-1}$ ---	Cmin --- $\mu\text{mol.L}^{-1}$ ---	Área --- cm^2 ---	Comprimento --- m ---	Raio médio --- mm ---
ND2	47,91	88,74 ^A	165,74 ^A	245,12 ^B	38,64 ^B	0,100
ND10	39,70	33,19 ^B	7,72 ^B	487,53 ^A	76,62 ^A	0,101
A. variância						
Fsp ⁽¹⁾	0,84ns	166,10 ^{**}	178,10 ^{**}	80,72*	57,29 ^{**}	0,06
CV(%)(²)	32,29	11,18	21,59	11,65	13,77	6,19

Comparação de médias, nas colunas, pelo teste F. ⁽¹⁾Valor de F para as subpopulações. ⁽²⁾Coefficiente de variação. **: Significativo a 1% pelo teste F. *: Significativo a 5% pelo teste F. ns: Não significativo.

1995). As raízes das plantas não retiram completamente os nutrientes da solução, mas os reduzem a uma concentração mínima (Cmin), abaixo da qual o influxo líquido cessa (Marschner, 1995). O parâmetro Cmin reflete a capacidade das raízes de absorver P em baixas concentrações (Krannitz *et al.*, 1991). Schenk & Barber (1979b; 1980) postularam que as plantas devem possuir um Vmax elevado, representando, independente da concentração externa de P, uma maior capacidade de absorção e valores baixos para Km e Cmin, o que habilita a planta a recuperar o nutriente de soluções diluídas, como acontece na solução de solos tropicais, pouco férteis, com baixo teor de P disponível. Isso foi claramente observado para ND10 em relação a ND2.

Os mecanismos morfológicos de adaptação das plantas ao estresse de P são aqueles que configuram um sistema radicular com maior superfície de contato com o solo, uma vez que P possui características peculiares de mobilidade e disponibilidade dependentes dos atributos físicos e químicos dos solos. A morfologia radicular é definida pelo comprimento e área de superfície das raízes, pelo raio radicular, pela relação de superfície (ou massa) radicular/massa de parte aérea e densidade de pêlos radiculares (Schenk & Barber, 1979a; b). Sistemas radiculares extensos, de elevada área superficial e comprimento, com raízes de menor diâmetro são fundamentais na aquisição de P de solos com baixa concentração do elemento (Schenk & Barber, 1979b) e constituem mecanismos adaptativos, promovendo uma exploração mais efetiva do solo. O sistema radicular de ND10, como já observado, possui essas características relacionadas à área superficial e comprimento.

As variações existentes entre genótipos vegetais nessas características cinéticas e morfológicas das raízes derivam da ação condicionante do ambiente, sobretudo dos fatores de solo, determinando

a adaptação genética das plantas. Para o milho, a variabilidade intraespecífica quanto aos parâmetros cinéticos de absorção de P e morfologia do sistema radicular tem sido descrita (Nielsen & Barber, 1978; Baligar & Barber, 1979; Schenk & Barber, 1979b; Schenk & Barber, 1980; Anghinoni *et al.*, 1989; Alves *et al.*, 1998; Ciarelli *et al.*, 1998). Essas características são consideradas hereditárias (Schenk & Barber, 1980; Ciarelli *et al.*, 1998; Furlani *et al.*, 1998), indicando a possibilidade de seleção e melhoramento para a obtenção de cultivares de milho mais efetivos na aquisição de P.

Neste trabalho, também foram determinadas a produção de matéria seca, a acumulação de P e o índice de eficiência de utilização de P das subpopulações contrastantes, a fim de relacioná-los com as características cinéticas e morfológicas e compreender o significado do comportamento diferenciado destes genótipos.

Na produção de matéria seca de parte aérea e de raízes, ND10 manteve a sua superioridade. Para a relação raiz/parte aérea de matéria seca, as duas subpopulações não diferiram entre si, conforme observado em ensaio anterior (Machado, 2000) quando foram avaliadas em doses crescentes de P na solução. Já para o conteúdo de P, tanto para a parte aérea como para as raízes foram observadas diferenças entre as subpopulações. Para a relação entre o P acumulado na parte aérea e nas raízes, não houve diferença significativa. Quanto ao índice de eficiência de utilização de P, as diferenças entre as subpopulações foram mantidas e ND10 foi a subpopulação mais eficiente na utilização de P absorvido para a produção de massa (Tabela 4).

Correlações significativas foram verificadas entre as características cinéticas e os demais parâmetros neste experimento para ambas as subpopulações, mas principalmente para ND2 (Tabela 5). Nesse genótipo, a Cmin se correlacionou negativamente com todos os parâmetros determinados,

TABELA 4. Produção de matéria seca das partes da planta e relação raiz/parte aérea (R/PA) de matéria seca; conteúdo de P das partes da planta e relação parte aérea/raiz (PA/R) do conteúdo de P, e índice de eficiência de utilização de P (IE) de duas subpopulações contrastantes de milho cultivadas em solução nutritiva. Vasos com três plantas. Média de 5 repetições.

Sub-populações	Matéria seca		Conteúdo de P			IE
	Parte aérea	Raízes	R/PA	Parte aérea	Raízes	
ND2	2,25 ^B	0,36 ^B	0,16	12,37 ^B	1,79 ^B	6,87
ND10	5,15 ^A	0,94 ^A	0,18	20,47 ^A	3,59 ^A	5,79
A. variância						
F _{sp} ⁽¹⁾	162,69**	42,69**	3,72ns	12,56*	38,63**	2,89ns
CV(% ⁽²⁾)	9,73	21,57	9,28	22,02	17,05	15,84
						35,60**
						28,18

Comparação de médias, nas colunas, pelo teste F. ⁽¹⁾Valor de F para as subpopulações. ⁽²⁾Coefficiente de variação. **: Significativo a 1% pelo teste F. *: Significativo a 5% pelo teste F. ns: Não significativo.

exceto para as relações de massa e de conteúdo de P entre a parte aérea e raízes. Em ambas as subpopulações, a Vmax se correlacionou inversamente com o Cmin, o que, de acordo com Schenk & Barber (1979b), oferece a possibilidade dos genótipos alterarem seu desempenho quanto à absorção de P em função da maior ou menor disponibilidade do nutriente.

As características morfológicas do sistema radicular, área e comprimento, se correlacionaram positivamente com a produção de massa seca de parte aérea e de raízes em ambas as subpopulações (Tabela 5). Houve ainda correlação positiva desses atributos com o conteúdo de P das partes das plantas e com a eficiência de utilização do nutriente em ambas as subpopulações. Essas correlações foram significativas em sua maioria.

Variações mais uniformes entre parâmetros cinéticos de absorção de P e os outros atributos relacionados à eficiência a P têm sido verificadas em milho e outras espécies. Diferenças nos parâmetros de absorção de P refletiram na quantidade do nutriente absorvido em 12 genótipos de milho (híbridos e linhagens), bem como na produção de matéria seca e raízes dos mesmos (Nielsen & Barber, 1978). Nielsen & Schjørring (1983) também verificaram grande influência de características como comprimento de raízes, Vmax, Km e Cmin na eficiência de absorção de P em vários genótipos de cevada e consideraram tais atributos como fundamentais na obtenção de plantas mais adaptadas a baixas concentrações de P no solo.

Ciarelli *et al.* (1998) observaram relação inversa entre velocidade de absorção e extensão de sistema radicular em híbridos de milho e também entre linhagens e progênies derivadas de seus cruzamentos. Anteriormente, Furlani *et al.* (1984) haviam observado entre genótipos de sorgo, relação inversa entre velocidade de absorção e produção de massa. Os genótipos que produziram mais massa

TABELA 5. Coeficientes de correlação (r) entre as características cinéticas e morfológicas e os demais parâmetros avaliados para as subpopulações contrastantes.

	ND2			ND10			ND2			ND10		
	Vmax	Km	Cmin	Vmax	Km	Cmin	ASR	CSR	RMR	ASR	CSR	RMR
MSPA ⁽¹⁾	0,50	-0,13	-0,87*	-0,61	-0,64	0,19	0,83 ⁺	0,84 ⁺	0,62	0,80 ⁺	0,77	0,39
MSR	0,60	0,08	-0,90*	-0,64	-0,54	0,14	0,93*	0,94**	0,70	0,87*	0,94**	-0,14
R/PA	0,23	0,89*	0,29	-0,31	-0,13	0,01	-0,09	-0,10	-0,10	0,45	0,60	-0,67
CPA	0,44	-0,22	-0,84 ⁺	-0,14	0,05	-0,22	0,79 ⁺	0,80 ⁺	0,59	0,53	0,65	-0,54
CPR	0,58	-0,08	-0,91*	-0,81 ⁺	-0,77	0,37	0,82 ⁺	0,84 ⁺	0,53	0,82 ⁺	0,85	0,10
PPA/PR	-0,54	-0,74	0,04	0,79 ⁺	0,84 ⁺	-0,46	0,11	0,06	0,45	-0,66	-0,62	-0,46
EUP	0,58	0,02	-0,89*	-0,64	-0,67	0,23	0,90*	0,91*	0,67	0,77	0,74	0,39
ASR	0,66	0,34	-0,84 ⁺	-0,39	-0,35	-0,19	-	0,99**	0,81 ⁺	-	0,98**	0,31
CSR	0,72	0,35	-0,88*	-0,46	-0,39	-0,11	0,99**	-	0,75	0,98**	-	0,12
RMR	0,12	0,18	-0,40	0,14	-0,03	-0,28	0,81 ⁺	0,75	-	0,31	0,12	-
Vmax	-	0,58	-0,84 ⁺	-	0,98**	-0,83 ⁺	0,66	0,72	0,12	-0,39	-0,46	0,14
Km	0,58	-	-0,14	0,98**	-	-0,84 ⁺	0,34	0,35	0,18	-0,35	-0,39	-0,03
Cmin	-0,84 ⁺	-0,14	-	-0,83 ⁺	-0,84 ⁺	-	-0,84 ⁺	-0,88*	-0,40	-0,19	-0,11	-0,28

⁽¹⁾MSPA e MSR: matéria seca de parte aérea e de raízes; K/PA: relação raiz/parte aérea; CPA e CPR: conteúdo de P da parte aérea e de raízes; PPA/PR: relação entre o conteúdo de P da parte aérea e das raízes; EUP: índice de eficiência de utilização de P; ASR: área do sistema radicular; CSR: comprimento do sistema radicular; RMR: raio médio radicular; Vmax: velocidade máxima de absorção; Km: constante de Michaelis-Menten; Cmin: concentração mínima. +, *, **, : significativo, respectivamente, a 10, 5 e 1% pelo teste T de Student. Os demais valores de " r " não foram significativos.

sob condições de baixo P tiveram menores velocidades de absorção de P e distribuíram melhor o P das partes mais velhas para os tecidos mais novos.

Relação entre características morfológicas e outros parâmetros relacionados com a eficiência a P também são descritos na literatura para milho e outras espécies. Schenk & Barber (1979b), além de terem verificado que as diferenças na morfologia e fisiologia das raízes de 5 genótipos de milho tiveram efeito na quantidade de P absorvida pelas plantas em solução nutritiva e solo, observaram também que os genótipos de maior comprimento de raízes foram os que produziram mais massa tanto de parte aérea como de raízes. A relação positiva entre massa seca de raízes e parte aérea e comprimento radicular também havia sido observada em um trabalho anterior por Warncke & Barber (1974), desta vez com um único genótipo de milho cultivado em campo e solução nutritiva. Maior comprimento de raízes (determinado por planta) também foi relacionado à maior produção de massa seca de genótipos de milho avaliados por Baligar & Barber (1979).

Num trabalho seguinte, Schenk & Barber (1980) verificaram diferenças significativas na área do sistema radicular entre dois dos três genótipos de milho cultivados em campo. Esse contraste obtido na área superficial das raízes se relacionou positivamente com o rendimento de parte aérea e raízes desses genótipos por ocasião do pendoamento. Mais recentemente, o mesmo comportamento foi verificado em milho por Ciarelli *et al.* (1998) com híbridos, linhagens e híbridos F₁ derivados do cruzamento das linhagens. Maior comprimento radicular foi observado para genótipos de maior produção de massa (de parte aérea, raízes e total).

Neste trabalho, ficou evidente a variabilidade existente dentro da variedade Eldorado (Nitrodente) para os parâmetros relacionados à cinética e morfologia do sistema radicular, importantes na aquisição e eficiência de P das

subpopulações. A principal consequência dessa variabilidade é a possível relação com a hereditariedade da característica, significando potencial para o melhoramento genético, a qual deve ser verificada e explorada.

O emprego da técnica em solução nutritiva tem sido considerado de grande importância em estudos, envolvendo a genética nutricional e melhoramento de plantas. Nesses trabalhos são necessárias avaliações de um grande número de plantas, tanto de linhagens parentais quanto de progênes originárias dos seus cruzamentos, e, para tal, o uso da solução nutritiva representa economia de tempo e espaço (Gerloff & Gabelman, 1983; Furlani & Furlani, 1988). Em estudos dessa natureza, técnicas em solução nutritiva podem ser úteis na seleção de plantas desde que sejam realizados ciclos alternados de avaliação em solução e em campo para a validação dos resultados (Furlani *et al.*, 1998).

Qualquer que seja a natureza do estudo, faz-se necessário considerar sempre que os sistemas em solução nutritiva são infinitamente mais simples que os solos, e que, conseqüentemente, as respostas de plantas crescidas em solo com relação a vários parâmetros podem ser modificadas por fatores que não estão presentes nas soluções nutritivas.

Particularmente importante é o efeito do meio de cultivo sobre o mecanismo de aquisição de nutrientes, que, no solo, depende basicamente do balanço entre a movimentação do íon para a superfície radicular através do fluxo de massa e da difusão, enquanto que, em solução nutritiva, os nutrientes estão prontamente disponíveis, sendo continuamente trazidos às superfícies radiculares pela agitação da solução e se movem em direção às raízes devido ao fluxo de massa originado pela transpiração (Gerloff, 1987; Chaney *et al.*, 1989). Essa é uma consideração freqüente, principalmente no que diz respeito à aquisição do P, que, dada a sua relativa imobilidade nos solos, tem, na difusão, o mais

importante mecanismo envolvido no seu movimento do solo para as raízes (Marschner, 1995).

Há que se considerar, entretanto, que a técnica em solução nutritiva é usada para simular as situações que ocorrem quando as plantas são cultivadas em campo, e como toda metodologia experimental, possui vantagens e desvantagens e está sujeita a críticas. Segundo Furlani & Furlani (1988) e Furlani *et al.* (1998), a principal vantagem é o controle exercido sobre os fatores ambientais e a possibilidade de definição da composição do meio de crescimento das plantas quando comparado ao solo; outra vantagem é que as raízes podem ser facilmente estudadas e incluídas nas análises. As desvantagens do uso das técnicas em solução nutritiva, além da pronta disponibilidade ao P, são os cuidados requeridos, a substituição ou complementação de solução e o sistema artificial se comparado às condições de campo nas quais as plantas normalmente crescem e se desenvolvem.

A respeito das similaridades de resposta das plantas em solução nutritiva e solo, resultados de Furlani *et al.* (1998) e Ciarelli *et al.* (1998) demonstram que diferenças genotípicas em morfologia de raízes e produção de massa são confirmadas em experimentos em solo e solução nutritiva, pois tais características parecem ser intrínsecas das plantas.

Os resultados aqui apresentados mostraram a importância do conhecimento dos genótipos com que se trabalha, principalmente quanto ao grau de variabilidade genética existente, quando se estuda a eficiência nutricional e se pretende caracterizar e/ou definir os fatores determinantes. As condições ambientais relativas à disponibilidade do nutriente que se estuda e o tipo de substrato em que as plantas se desenvolvem são também de fundamental importância para a validação das conclusões obtidas. Neste trabalho, a correspondência dos resultados dos ensaios de campo e solução nutritiva foi considerada satisfatória, em se tratando de condições experimentais tão diversas.

Conclusões

Existe variabilidade entre subpopulações da variedade Eldorado (Nitrodente) para a produção de grãos, produção de matéria seca, eficiência de utilização de P, cinética de absorção do nutriente e morfologia do sistema radicular.

A subpopulação ND10, mais produtiva em campo, foi a que apresentou maior eficiência de utilização de P em solução nutritiva, os menores valores para os parâmetros cinéticos V_{max} , K_m e C_{min} e o sistema radicular mais extenso.

A subpopulação ND2, uma das menos produtivas em campo, foi a que apresentou menor eficiência de utilização de P em solução nutritiva, os maiores valores para os parâmetros cinéticos V_{max} , K_m e C_{min} e o sistema radicular menos desenvolvido.

As características cinéticas V_{max} , K_m e C_{min} e a morfologia do sistema radicular podem ser utilizadas como parâmetros complementares em avaliações preliminares em programas de melhoramento genético, visando a eficiência no uso de P.

Agradecimentos

Ao Professor Ernesto Paterniani pelas sugestões na concepção do trabalho e ao Dr. Ricardo Magnavaca pela colaboração na instalação e condução do ensaio de avaliação das FS_1 em campo.

Literatura Citada

ALVES, V. M. C.; NOVAIS, R. F.; OLIVEIRA, M. F. G.; SANT'ANNA, R. Cinética e translocação de fósforo em híbridos de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, p. 1047 - 1052, 1998.

ANGHINONI, I.; VOLKART, C. R.; FATTORE, N.; ERNANI, P. R. Morfologia de raízes e cinética da absorção de nutrientes em diversas espécies e genótipos de plantas. **Revista Brasileira de**

- Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, p. 355 - 361, 1989.
- BALIGAR, V. C.; BARBER, S. A. Genotypic differences of corn for ion uptake. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, p. 870 - 873, 1979.
- BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 48 p. (Instituto Agrônomo. Boletim, 78).
- BLISS, F. A. Utilization of vegetable germplasm. **HortScience**, Alexandria, v. 16, n. 2, p. 129 - 132, 1981.
- CHANEY, R. L.; BELL, P. F.; COULOMBE, B. A. Screening strategies for improved nutrient uptake and use by plants. **HortScience**, Alexandria, v. 24, n. 4, p. 565 - 572, 1989.
- CIARELLI, D. M.; FURLANI, A. M. C.; DECHEN, A. R.; LIMA, M. 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, 1998.
- CLARK, R. B. Plant genotype differences in the uptake, translocation, accumulation and use of mineral elements required for plant growth. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 72, p. 175 - 196, 1983.
- CLARKSON, D. T.; HAWKESFORD, M. J. Molecular biological approaches to plant nutrition. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 155/156, p. 21-31, 1993.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes: 4ª aproximação**. Lavras, 1989. 159 p.
- DECHEN, A. R.; FURLANI, A. M. C.; FURLANI, P. R. Tolerância e adaptação de plantas aos estresses nutricionais. In: SIQUEIRRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A. E.; CARVALHO, J. G. (Ed.). **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Lavras: Universidade Federal de Lavras, 1999. p. 337 - 361.
- DUNCAN, R. R. Genetic manipulation. In: WILKINSON, R. E. (Ed.). **Plant-environment interactions**. New York: Marcel Dekker, 1994. p. 1-38.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.
- EPSTEIN, E. **Nutrição mineral das plantas: princípios e perspectivas**. São Paulo: USP, 1975. 344 p.
- FAWOLE, I.; GABELMAN, W. H.; GERLOFF, G. C.; NORDHEIM, E. V. Heritability of efficiency in phosphorus utilization in beans (*Phaseolus vulgaris* L.) grown under phosphorus stress. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, New York, v. 107, p. 94 - 97, 1982.
- 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.
- FURLANI, A. M. C.; CLARK, R. B.; MARANVILLE, J. W.; ROSS, W. M. Sorghum genotype differences in phosphorus uptake rate and distribution in plant parts. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 7, n. 7, p. 1113 - 1126, 1984.

- FURLANI, A. M. C.; FURLANI, P. R. **Composição e pH de soluções nutritivas para estudos fisiológicos e seleção de plantas em condições nutricionais adversas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1988. 34 p. (Instituto Agrônomo. Boletim, 121).
- FURLANI, A. M. C.; LIMA, M.; NASS, L. L. Combining ability effects for P-efficiency characters in maize grown in low P nutrient solution. **Maydica**, Bergamo, v. 43, p. 169-174, 1998.
- FURLANI, A. M. C.; MACHADO, C. T. T. Variabilidade e herança da eficiência na absorção e utilização de nutrientes em ambientes marginais, em germoplasma de soja, trigo, arroz e milho. In: ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; MELLO, J. W. V.; COSTA, L. M. (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v. 2, p. 337 - 391.
- GABELMAN, W. H.; GERLOFF, G. C. The search for and interpretation of genetic controls that enhance plant growth under deficiency levels of a macronutrient. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 72, p. 335 - 350, 1983.
- GERLOFF, G. C. Intact -plant screening for tolerance of nutrient - deficiency stress. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 99, p. 3 - 16, 1987.
- GERLOFF, G. C.; GABELMAN, W. H. Genetic basis of inorganic plant nutrition. In: LÄUCHLI, A.; BIELESKI, R. L. (Ed.). **Inorganic plant nutrition**. Berlin: Springer-Verlag, 1983. p. 453 - 480. (Encyclopedia of Plant Physiology. New Series, 15B).
- GOLDSTEIN, A. H. Plant cells selected for resistance to phosphate starvation show enhanced P use efficiency. **Theoretical and Applied Genetics**, New York, v. 82, p. 191 - 194, 1991.
- KRANNITZ, P. G.; AARSSSEN, L. W.; LEFEBVRE, D. D. Relationships between physiological and morphological attributes related to phosphate uptake in 25 genotypes of *Arabidopsis thaliana*. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 133, p. 169 - 175, 1991.
- JORGE, L. A. de C. **Recomendações práticas para aquisição de imagens digitais analisadas através do SIARCS**. São Carlos: Embrapa-CNPDIA, 1996. 53 p. (Embrapa.CNPDIA.Circular Técnica, 1).
- MACHADO, C. T. de T. **Caracterização de genótipos de milho quanto a parâmetros morfológicos, fisiológicos e microbiológicos associados à eficiência de absorção e uso de fósforo**, 2000. 365 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press, 1995. 889 p.
- MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 27, p. 31 - 36, 1962.
- NIELSEN, N. E.; BARBER, S. A. Differences among genotypes of corn in the kinetics of P uptake. **Agronomy Journal**, Madison, v. 70, n. 5, p. 695 - 698, 1978.
- NIELSEN, N. E.; SCHJORRING, J. K. Efficiency and kinetics of phosphorus uptake from soil by various barley genotypes. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 72, p. 225 - 230, 1983.
- RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

- ROSSIELO, R. O. P.; ARAÚJO, A. P.; MANZATTO, C. V.; FERNANDES, M. S. Comparação dos métodos fotoelétrico e da interseção na determinação de área, comprimento e raio médio radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 5, p. 633 - 638, 1995.
- RUIZ, H. A. Estimativa dos parâmetros cinéticos K_m e V_{max} por uma aproximação gráfico-matemática. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 32, n. 179, p. 79-84, 1985.
- SÁNCHEZ, R. R. **Terminología genética y fitogenética**. México, D.F.: Editorial Trillas., 1987. 163 p.
- SCHENK, M. K.; BARBER, S. A. Root characteristics of corn genotypes as related to P uptake. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, p. 921 - 924, 1979a.
- SCHENK, M. K.; BARBER, S. A. Phosphate uptake by corn as affected by soil characteristics and root morphology. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 43, n. 4, p. 880 - 883, 1979b.
- SCHENK, M. K.; BARBER, S. A. Potassium and phosphorus uptake by corn genotypes grown in the field as influenced by root characteristics. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 54, p. 65 - 76, 1980.
- SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilization Index: A modified approach to the estimations and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 4, p. 289 - 302, 1981.
- SOUZA JÚNIOR, C. L. de. **Componentes da variância genética e suas implicações no melhoramento vegetal**. Piracicaba: FEALQ, 1989. 134 p.
- WALKER, W. M.; RAINES, G. A. Effect of corn cultivar, phosphorus and potassium on yield and chemical composition. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 11, p. 1715 - 1726, 1988.
- WARNCKE, D. D.; BARBER, S. A. Root development and nutrient uptake by corn growth in solution culture. **Agronomy Journal**, Madison, v. 66, p. 514 - 516, 1974.