

# SELEÇÃO PRECOCE E FENOTIPAGEM DE LINHAGENS DE MILHO QUANTO À ARQUITETURA DAS RAÍZES SEMINAIS

## EARLY SELECTION AND PHENOTYPING OF LINE OF CORN AS FOR THE ARCHITECTURE OF THE SEMINAL ROOTS

Aurélio VAZ-DE-MELO<sup>1</sup>, Glauco Vieira MIRANDA<sup>2</sup>; Heder BRAUN<sup>3</sup>; João Carlos Cardoso GALVÃO; Cíntia Ribeiro de SOUZA; Rubens Ribeiro SILVA; Hélio Bandeira BARROS

**RESUMO:** Objetivou-se selecionar e fenotipar linhagens de milho quanto à arquitetura das raízes seminais em relação à raiz primária da planta. Foram avaliadas 20 linhagens de milho em solução nutritiva, em experimento disposto no delineamento de blocos casualizados, com três repetições. Foram realizadas medições de crescimento das raízes e dos ângulos das raízes seminais. Os pêlos radiculares foram avaliados visualmente. Os resultados mostraram que as linhagens apresentaram diferenças significativas quanto ao crescimento das raízes primárias e seminal, ângulos das raízes seminais e de pêlos radiculares, não obtendo diferença apenas para número de raízes seminais. A linhagem de milho L11 foi a que apresentou maior densidade de pêlos radiculares, ângulos e crescimento de raízes seminais. Conclui-se que as linhagens de milho L11 e L14 têm os maiores ângulos das raízes seminais; as linhagens L15 e L17 têm as maiores densidades de pêlos radiculares; a linhagem L11 sobressaiu com maior número de raízes seminais.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Zea mays* (L.). Melhoramento. Fósforo. Ângulo. Pêlos radiculares.

### INTRODUÇÃO

Em ambientes com diferentes disponibilidades de água, nutrientes ou toxidez mineral e distribuição heterogênea dos nutrientes no solo, a arquitetura radicular das plantas torna-se característica de fundamental importância à produtividade tanto de grão quanto de massa verde da planta. Além disso, o desenvolvimento radicular para aquisição de fósforo em solos, com menor custo metabólico está diretamente relacionado a essa característica (Lynch, 1995; Lynch & Brown, 2001; Fan et al., 2003). Dorlodot et al. (2007) relataram que estudos da extensão e natureza da variação da arquitetura radicular têm profunda implicação na melhoria da eficiência do uso de nutrientes e água nas culturas, sendo diretamente ligada ao aumento da produtividade em estresse abiótico.

A importância da arquitetura radicular no aumento da produtividade é devido à necessidade da planta na exploração espacial do solo. Isso se torna mais evidente em ambientes com diferentes disponibilidades de água, nutrientes ou toxidez mineral e distribuição heterogênea dos nutrientes no solo, além do desenvolvimento radicular para aquisição de fósforo em solos com menor custo metabólico (LYNCH, 1995; LYNCH; BROWN, 2001; FAN et al., 2003; DORLODOT et al., 2007).

O crescimento superficial das raízes basais de feijão em baixo fósforo (P) foi correlacionado com a eficiência na absorção de P e alocação de carbono (LYNCH, 1995). Desta forma, observa-se que P está envolvido nas mudanças rápidas de

gravitropismo, ramificação radicular lateral, taxa de crescimento e alongamento de pêlos radiculares que resultam em maior exploração superficial do solo pelo sistema radicular. Entre as características radiculares da planta, o diâmetro radicular e massa da parte aérea estão correlacionados significativamente com o crescimento dos ângulos das raízes seminais (KATO et al., 2006).

O desafio para a seleção de plantas de milho com base nas características radiculares está na dificuldade em avaliar a raiz. Essas características são fenotipicamente flexíveis a condições ambientais, ou seja, modificam-se a medida que se faz necessário a sua sobrevivência e difíceis de avaliação *in situ*. Além dessas mudanças das características radiculares, há perdas de raízes e deformação da arquitetura (BEEBE et al., 2006).

Para solucionar as dificuldades de avaliação do sistema radicular em campo, técnicas alternativas foram desenvolvidas, como o uso de rizotrons (DEVIIENNE-BARRET et al., 2006; LAPERCHE et al., 2006), areia (WANG et al., 2004), e sistemas hidropônicos (TUBEROSA et al., 2007). Entretanto, há poucos trabalhos que quantificam e descrevem a morfologia radicular do milho em câmara de crescimento.

Estudos com várias espécies mostram correlação positiva entre raio, densidade, comprimento de pêlos radiculares e conteúdo de P na planta (HOFFMANN; JUNGK, 1995). Os pêlos radiculares de milho são importantes para aquisição eficiente de fósforo do solo (ZHU; LYNCH, 2004; LÓPEZ-BUCIO et al., 2002). A variação genética

da densidade e comprimento de pelos radiculares está associada à adaptação do milho e feijão a baixa disponibilidade de N e P no solo (BATES; LYNCH, 2000; ZHU et al., 2005, YAN et al., 2004).

Neste estudo, objetivou-se selecionar e fenotipar linhagens de milho quanto à arquitetura das raízes seminais em relação à raiz primária da planta.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Universidade Federal de Viçosa, no Campo Experimental Diogo Alves de Melo, pertencente ao Departamento de Fitotecnia, no Laboratório do Programa Milho<sup>®</sup> UFV. Foram avaliadas 20 linhagens endogâmicas de milho em geração S6 do Programa Milho<sup>®</sup> UFV. Essas linhagens são oriundas da mesma população de polinização aberta e obtidas no mesmo campo de multiplicação. O experimento foi disposto no delineamento em blocos casualizados, com três repetições.

A solução utilizada nesse experimento continha as concentrações (em mg L<sup>-1</sup>): 1180 Ca (NO<sub>3</sub>). 4H<sub>2</sub>O; 505 KNO<sub>3</sub>; 136 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>; 492 MgSO<sub>4</sub>; 24,1 FeSO<sub>4</sub>. 7H<sub>2</sub>O; 25,1 Fe-EDTA; 2,04 H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>; 2,34 MnCl<sub>2</sub>. 4H<sub>2</sub>O; 0,88 ZnSO<sub>4</sub>. 7H<sub>2</sub>O; 0,20 CuSO<sub>4</sub>. 5H<sub>2</sub>O e 0,26 Na<sub>2</sub> MO O<sub>4</sub>. 2H<sub>2</sub>O (MACHADO et al., 2001).

As sementes das linhagens de milho foram colocadas em papel germitex no germinador com umidade de 80% e temperatura de 30° C, por 72 horas. Foi selecionada uma plântula por linhagem com radícula de aproximadamente 2 a 3 cm de comprimento para ser fixada na excicata de crescimento.

Cada excicata de crescimento foi constituída de uma folha germitex dobrada ao meio, envolvida por um plástico de polietileno, perfurada uniformemente com furos de dois centímetros de diâmetro para melhor aeração. Em seguida foram colocadas verticalmente em uma caixa de vidro retangular (aquário), com 30 cm de largura x 30 cm de altura x 50 cm de comprimento, contendo solução nutritiva até a altura de 10 cm. A parte superior da excicata de crescimento ficou apoiada nas laterais do aquário por um suporte, portanto a parte inferior foi imersa na solução nutritiva até a altura de 5 cm. Por capilaridade a solução umedeceu totalmente a excicata de crescimento, o que proporcionou o desenvolvimento do sistema radicular.

Foram realizadas medições, a cada dois dias, do crescimento das raízes primária e seminal a partir do quarto dia até o décimo segundo dia, após

a emergência e a contagem do número de raízes seminais no quarto, oitavo e décimo segundo dia após fixação das plântulas nas excicatas. Os ângulos das raízes seminais foram avaliados após o décimo segundo dia. Estes ângulos das raízes seminais são os formados entre o eixo horizontal de crescimento da raiz primária da plântula com as raízes seminais que tinham mais de dois centímetros de comprimento.

Os pêlos radiculares foram avaliados visualmente, de acordo com Vieira et al. (2007), após terem sido coloridos com o corante Azul de Tripán a 0,05%. Foi utilizada a escala de 1 a 10, em que 1 corresponde à ausência de pêlos radiculares; 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 correspondem a 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 % de todo o sistema radicular com pêlos radiculares, respectivamente.

Os dados qualitativos foram submetidos à análise de variância, sendo posteriormente realizados as análises dos respectivos coeficientes de variação, herdabilidade e as médias agrupadas a 5% de probabilidade pelo Teste de Scott e Knott e posteriormente foram realizadas análises multivariadas. Foi utilizada a análise de agrupamento para discriminação genotípica entre as linhagens, pelo método de otimização de Tocher, baseada na distância generalizada de Mahalanobis, com auxílio do aplicativo computacional GENES (Cruz, 2001). Nos dados referentes à taxa de crescimento das raízes seminais foram ajustadas equações de regressão, com auxílio do aplicativo computacional SAEG (Sistema para Análises Estatísticas) (Ribeiro Junior, 2001).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As linhagens apresentaram diferenças significativas ( $P < 0,05$ ) para todas as características. Essas diferenças favorecem o estudo em virtude da existência de variabilidade genética entre as linhagens de milho e alta herdabilidade ( $h^2 > 92,86\%$ ) das características com valor de CV  $< 12\%$ , o que facilita a discriminação e seleção das linhagens (Tabela 1).

As maiores médias crescimento da raiz primária avaliada no quarto dia após a fixação da semente na excicata (CRESC4) variaram entre 18 cm (L30) a 23,33 cm (L13), não diferindo significativamente das linhagens que obtiveram valores entre este intervalo. As linhagens L24 (7,00 cm) e L25 (8,67 cm) obtiveram as menores médias, não diferindo significativamente entre si (Tabela 2). No entanto, a linhagem L30 obteve as maiores médias de crescimento das raízes seminais no oitavo (CRSC8 = 94,67 cm) e no décimo segundo dia

(CRESC12 = 160,33 cm), não diferindo da (Tabela 2).  
linhagem L11 (160,67 cm) no CRESC12 ( $p < 0,001$ )

**Tabela 1.** Resumo da análise de variância, coeficiente de variação (CV%) e herdabilidade ( $h^2$ ) das características: crescimento das raízes seminais no quarto dia (CRESC4 - cm), oitavo dia (CRESC8 - cm), décimo segundo dia (CRESC12 - cm); ângulo médio entre o eixo horizontal de crescimento da plântula com as raízes seminais com mais de dois centímetros de comprimento (graus); escala de pêlos radiculares; número de raízes seminais no quarto dia (NR4), oitavo dia (NR8) e décimo segundo dia (NR12). Viçosa - MG, 2007

FV	GL	Quadrado Médio							
		CRESC4	CRESC8	CRESC12	ÂNGULO	PÊLO	NR4	NR8	NR12
<b>Bloco</b>	2	9,62	26,11	27,98	0,04214	0,616	0,07	2,60	1,52
<b>Linhagem</b>	19	47,96**	765,54**	4006,02**	244,258**	8,52**	0,07 <sup>ns</sup>	2,72*	3,02*
<b>Resíduo</b>	38	3,42	42,50	43,63	7,53	0,14	0,07	1,39	1,53
<b>CV (%)</b>		11,16	11,59	7,068	8,32	7,438	24,99	42,10	44,77
<b><math>h^2</math></b>		92,86	94,45	98,91	96,92	98,32	0	48,83	49,21

\*\*, \* significativo pelo teste de F a 1 e 5%, respectivamente; <sup>ns</sup> – não significativo pelo teste de F a 5%.

**Tabela 2:** Médias de crescimento das raízes seminais no quarto dia (CRESC4 - cm), oitavo dia (CRESC8 - cm), décimo segundo dia (CRESC12 - cm); ângulo médio entre o eixo horizontal de crescimento da plântula com as raízes seminais com mais de dois centímetros de comprimento (graus); escala de pêlos radiculares (PÊLO, 1, sem pêlos radiculares; 3, entre 1 e 5 na escala de classificação; 5, densidade e comprimento de pêlos radiculares intermediários; 7, entre 5 e 9 na escala de classificação e 9, com pêlos radiculares abundantes); número de raízes seminais no oitavo dia (NR8) e décimo segundo dia (NR12). Viçosa - MG, 2007

Linhagens	Características													
	CREC4	CRESC8	CRESC12	ÂNGULO	PÊLO	NR8	NR12							
L11	19,00	a	73,33	c	160,67	a	46,14	a	7,00	b	4,33	a	4,67	a
L16	18,67	a	39,33	e	52,00	f	45,57	a	7,00	b	1,00	b	1,00	b
L14	19,33	a	64,33	c	124,88	c	43,63	a	6,00	c	2,67	b	2,67	a
L13	23,33	a	58,33	c	117,00	c	40,47	b	5,00	d	3,00	a	3,00	a
L30	18,00	a	94,67	a	160,33	a	40,22	b	4,00	f	4,33	a	4,33	a
L21	19,00	a	58,33	c	68,33	e	39,37	b	3,00	g	3,33	a	3,33	a
L28	15,33	b	62,33	c	90,33	d	38,28	c	6,00	c	3,67	a	3,67	a
L15	20,33	a	49,00	d	73,12	e	37,88	c	8,00	a	2,33	b	2,67	a
L20	14,67	b	36,33	e	59,00	f	36,84	c	3,00	g	1,67	b	1,67	b
L24	7,00	d	37,33	e	67,67	e	35,36	c	3,33	g	3,00	a	3,33	a
L27	17,00	b	69,33	c	64,00	e	34,17	d	4,33	e	2,00	b	2,00	b
L17	16,00	b	36,33	e	58,00	f	32,11	d	8,00	a	2,33	b	1,67	b
L22	20,00	a	78,00	b	101,41	d	31,41	d	3,00	g	4,00	a	3,67	a
L18	20,33	a	44,00	d	68,33	e	26,84	e	4,33	e	2,00	b	1,67	b
L26	15,00	b	64,00	c	127,67	c	26,35	e	7,33	b	4,00	a	3,00	a
L23	11,33	c	45,00	d	59,33	f	25,82	e	5,33	d	2,00	b	1,33	b
L19	15,33	b	38,00	e	56,67	f	25,15	e	3,67	f	2,00	b	2,00	b
L25	8,67	d	65,67	c	147,00	b	19,98	f	4,00	f	2,00	b	3,33	a
L29	17,33	b	61,67	c	91,00	d	17,69	f	5,33	d	3,33	a	3,33	a
L12	16,00	b	49,33	d	122,33	c	16,30	f	4,00	f	3,00	a	3,00	a
<b>Média</b>	<b>16,58</b>		<b>56,23</b>		<b>93,45</b>		<b>32,98</b>		<b>5,08</b>		<b>2,80</b>		<b>2,76</b>	

Médias seguidas das mesmas letras nas colunas pertencem ao mesmo grupo estatístico, pelo teste Scott e Knott, a 5% de probabilidade.

Não houve diferenças significativas entre as linhagens quanto ao número de raízes seminais no quarto dia depois da fixação das plântulas nas

excitadas (NR4), apresentando valor médio de 1,03. Houve diferenças  $P < 0,039$  e  $P < 0,037$  entre as linhagens para número de raízes no oitavo dia

(NR8) e no décimo segundo dia (NR12), respectivamente. As linhagens L11 e L30 apresentaram médias de 4,33 para NR8. Essas linhagens apresentaram médias de 4,67 e 4,33 para NR12, respectivamente, diferindo das demais linhagens que apresentaram médias de NR8 e NR12 igual e inferior a 2,67 e 2,00, respectivamente (Tabela 2). O número de raízes seminais variou de 0 a 5 no período compreendido da primeira à última avaliação. Zhu et al. (2006) observaram a variação de 0 a 8 raízes seminais em plântulas de milho em condições similares ao do presente trabalho. Existe correlação positiva entre número e comprimento de raízes seminais com a massa seca da planta (Zhu et al., 2006). Portanto, há uma adaptação benéfica do crescimento das raízes seminais em função da absorção de nutrientes pouco móveis no solo.

As maiores médias de ângulo de raízes seminais foram obtidas pela linhagem L11 (46,14°), não diferindo ( $P < 0,001$ ) das linhagens L16 (45,57°) e L14 (43,63°). Por outro lado, as menores médias de ângulo das raízes seminais foram observadas nas linhagens L12 (16,30°), L29 (17,69°) e L25 (19,98°), não diferindo ( $P < 0,001$ ) entre si (Tabela 2). A vantagem de medir o ângulo das raízes seminais na câmara de crescimento, em relação ao método utilizado por Ito et al. (2004), é a simplicidade e rapidez de avaliação, além de poder acompanhar o desenvolvimento diário do sistema radicular.

A maior nota de pêlos radiculares foi dada às linhagens L15 e L17 (ambas com nota 8), diferindo ( $P < 0,001$ ) das demais linhagens. Para esta característica formaram-se sete grupos, com notas

variando de 3 a 8 (Tabela 2). Esse método é de rápida avaliação e permite a visualização de todo o sistema radicular. Além disso, apresenta baixo coeficiente de variação e discrimina genótipos com diferentes densidades e comprimentos de pêlo radicular. Yan et al. (2004) mostraram que genótipos de feijão eficientes na absorção de P têm maior densidade e comprimento de pêlos radiculares.

Os coeficientes de inclinação das retas variaram de -1,5 (L16) a 8,33 (L30) para taxa de emissão de raízes seminais e de 12,17 (L19) a 62,33 (L30) para taxa de crescimento das raízes (Tabela 3). Isso significa que quanto maior este coeficiente maior o número e crescimento das raízes seminais ao longo do tempo. Os sistemas radiculares das linhagens que apresentam maior taxa de emissão e crescimento das raízes entram em contato com os nutrientes mais rapidamente do que as de menores taxas. As de maiores taxas exploram maior volume do solo num menor intervalo de tempo, melhorando assim a aquisição de nutrientes e água. De acordo com Barber (1995) a maior taxa de crescimento radicular promove maior absorção e exploração do solo num menor espaço de tempo, sendo muito importante na eficiência de absorção de fósforo.

As linhagens foram classificadas satisfatoriamente em sete grupos. As linhagens de maiores médias para as características estão separadas nos grupos VI (L30) e VII (L11) e, as linhagens com menores médias de ângulo das raízes seminais e pêlos radiculares estão parcialmente reunidas no grupo II (L18; L19; L23; L27; L21; L20 e L24) (Tabela 4).

**Tabela 3:** Equações ajustadas para taxa de emissão e crescimento das raízes seminais no período de 4 a 12 dias após a fixação das plântulas nas excicatas de crescimento

Linhagens	Taxa de emissão das raízes seminais		Taxa de crescimento das raízes seminais	
	Equações ajustadas	R <sup>2</sup>	Equações ajustadas	r <sup>2</sup>
L11	$\hat{Y} = - 5,33 + 7,83NR - 1,50 NR^2$	0,99	$\hat{Y} = - 39,00 + 59,67 CR$	0,99
L12	$\hat{Y} = - 2,00 + 3,50 NR - 0,50 NR^2$	0,99	$\hat{Y} = - 25,56 + 40,33 CR$	0,99
L13	$\hat{Y} = - 2,33 + 4,00 NR - 0,67 NR^2$	0,99	$\hat{Y} = - 14,11 + 35,17 CR$	0,99
L14	$\hat{Y} = - 2,33 + 4,17 NR - 0,83 NR^2$	0,99	$\hat{Y} = - 26,33 + 42,17 CR$	1,00
L15	$\hat{Y} = - 1,33 + 2,83 NR - 0,50 NR^2$	0,99	$\hat{Y} = - 15,22 + 34,67 CR$	0,99
L16	$\hat{Y} = 2,00 - 1,50 NR - 0,50 NR^2$	0,99	$\hat{Y} = - 27,11 + 38,67 CR$	0,90
L17	$\hat{Y} = - 1,67 + 3,33 NR - 0,67 NR^2$	0,99	$\hat{Y} = - 7,44 + 24,33 CR$	0,99
L18	$\hat{Y} = - 1,00 + 2,50 NR - 0,50 NR^2$	0,99	$\hat{Y} = - 3,78 + 24,00 CR$	0,99
L19	$\hat{Y} = - 1,00 + 2,50 NR - 0,50 NR^2$	0,99	$\hat{Y} = - 3,56 + 12,17 CR$	0,94
L20	$\hat{Y} = 0,67 + 0,17 NR + 0,17 NR^2$	0,99	$\hat{Y} = - 27,89 + 39,00 CR$	0,97
L21	$\hat{Y} = - 3,67 + 5,83 NR - 1,17 NR^2$	0,99	$\hat{Y} = - 21,89 + 39,67 CR$	0,99
L22	$\hat{Y} = - 5,00 + 7,50 NR - 1,50 NR^2$	0,99	$\hat{Y} = - 4,55 + 34,50 CR$	0,80
L23	$\hat{Y} = - 1,00 + 2,50 NR - 0,50 NR^2$	0,99	$\hat{Y} = - 3,67 + 22,00 CR$	0,83

L24	$\hat{Y} = - 2,67 + 4,50 \text{ NR} - 0,83 \text{ NR}^2$	0,99	$\hat{Y} = - 36,67 + 39,33 \text{ CR}$	0,97
L25	$\hat{Y} = - 0,33 + 0,50 \text{ NR} + 0,17 \text{ NR}^2$	0,99	$\hat{Y} = - 42,33 + 50,50 \text{ CR}$	0,99
L26	$\hat{Y} = - 5,00 + 7,50 \text{ NR} + 1,50 \text{ NR}^2$	0,99	$\hat{Y} = - 40,00 + 52,33 \text{ CR}$	0,98
L27	$\hat{Y} = - 1,00 + 2,50 \text{ NR} - 0,50 \text{ NR}^2$	0,99	$\hat{Y} = - 5,33 + 20,17 \text{ CR}$	0,65
L28	$\hat{Y} = - 4,33 + 6,67 \text{ NR} - 1,33 \text{ NR}^2$	0,99	$\hat{Y} = - 28,56 + 43,17 \text{ CR}$	0,98
L29	$\hat{Y} = - 3,67 + 5,83 \text{ NR} - 1,17 \text{ NR}^2$	0,99	$\hat{Y} = - 21,11 + 41,50 \text{ CR}$	0,98
L30	$\hat{Y} = - 5,67 + 8,33 \text{ NR} - 1,67 \text{ NR}^2$	0,99	$\hat{Y} = - 42,22 + 62,33 \text{ CR}$	0,99

**Tabela 4:** Grupos de linhagens estabelecidos pelo método de Tocher, com base na dissimilaridade expressa pela distância generalizada de Mahalanobis, considerando o crescimento das raízes seminais no quarto dia (CRESC4 - cm), oitavo dia (CRESC8 - cm) e décimo segundo dia (CRESC12 - cm); ângulo médio entre o eixo horizontal de crescimento da plântula com as raízes seminais com mais de dois centímetros de comprimento (graus); escala de pêlos radiculares; número de raízes seminais no quarto dia (NR4), oitavo dia (NR8) e décimo segundo dia (NR12). Viçosa - MG, 2007

Grupos	Linhagens						
I	L13	L14	L28	L26			
II	L18	L19	L23	L27	L21	L20	L24
III	L15	L17	L16				
IV	L12	L25					
V	L22	L29					
VI	L30						
VII	L11						

## CONCLUSÕES

As linhagens de milho L11 e L14 têm os maiores ângulos das raízes seminais.

As linhagens L15 e L17 têm as maiores densidade de pêlos radiculares.

A linhagem L11 foi a que sobressaiu com maior número de raízes seminais.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa e a CAPES e FAPEMIG pelo recurso do projeto.

**ABSTRACT:** The objective was to select and phenotyping corn line on the seminal roots architecture in relation to the primary root of the plant. They were appraised 20 corn lines in nutrient solution in experiment provisions of randomized block design with three replications. Were measured growth of the roots and the angles of the seminal roots. The root hairs were visually assessed. The results showed that the strains exhibited significant differences in root growth and angles seminal roots and root hairs, getting no difference only for the number of seminal roots. The corn line L11 showed the highest density of root hairs, angles and growth of seminal roots. It is concluded that corn lines L11 and L14 have the highest angles of seminal roots; lines L15 and L17 have the highest density of root hairs, the L11 excelled with the largest number of seminal roots.

**KEYWORDS:** *Zea mays* (L.). Improvement. Phosphorus. Angle. Roots. Hair.

## REFERÊNCIAS

- BARBER, S. A. **Soil Nutrient Bioavailability: a Mechanistic Approach**. Wiley-Interscience. New York. 1995.
- BATES, T. R.; LYNCH, J. P. Plant growth and phosphorus accumulation of wild type and two root hair mutants of *Arabidopsis thaliana* (Brassicaceae). **American Journal Botany**, St. Louis, v. 87, p. 958–963, 2000.

- BEEBE, S. E.; ROJAS-PIERCE, M.; YAN, X.; BLAIR, M. W.; PEDRAZA, F.; MUÑOZ, F.; TOHME, J.; LYNCH, J. P. Quantitative Trait Loci for Root Architecture Traits Correlated with Phosphorus Acquisition in Common Bean. **Crop Science**, Madison, v. 46, p. 413–423, 2006.
- CRUZ, C. D. **Programa GENES**: aplicativo computacional em genética e estatística versão Windows. Viçosa – MG, UFV, 442 p., 2001.
- DEVIIENNE-BARRET, F.; RICHARD-MOLARD, S.; CHELLE, M.; MAURY, O.; NEY, B. Ara-rhizotron: An effective culture system to study simultaneously root and shoot development of Arabidopsis. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 280, p. 253–266, 2006.
- DORLODOT, S.; FORSTER, B.; PAGÈS, L.; PRICE, A.; TUBEROSA, R.; DRAYE, X. Root system architecture: opportunities and constraints for genetic improvement of crops. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 12, n. 10, p. 1360 - 1385, 2007.
- FAN, M. S.; ZHU, J. M.; RICHARDS, C.; BROWN, K. M.; LYNCH, J. P. Physiological roles for aerenchyma in phosphorus-stressed roots. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 30, p. 493–506, 2003.
- HOFFMANN, C.; JUNGK, A. Growth and phosphorus supply of sugar beet as affected by soil compaction and water tension. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 176, n. 1, p. 15-25, 1995.
- ITO, K.; MORITA, S.; ABE, J.; INANAGA, S. Growth direction of nodal roots with reference to root cap development in field grown maize (*Zea mays*). **Biologia**, Bratislava supplement 13, v. 59, p. 41-47, 2004.
- KATO, Y.; ABE, J.; KAMOSHITA, A.; YAMAGISHI, J. Genotypic variation in root growth angle in rice (*Oryza sativa* L.) and its association with deep root development in upland fields with different water regimes. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 287, p. 117–129, 2006.
- LAPERCHE, A.; DEVIENNE-BARRET, F.; MAURY, O.; GOUIS, J.L.; NEY, B. A simplified conceptual model of carbon/nitrogen functioning for QTL analysis of winter wheat adaptation to nitrogen deficiency. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 113, p. 1131-1146, 2006.
- LÓPEZ-BUCIO, J.; HERNÁNDEZ-ABREU, E.; SÁNCHEZ-CALDERÓN, L.; NIETO-JACOBO, M.F.; SIMPSON, J.; HERRERA-ESTRELLA, L. Phosphate Availability Alters Architecture and Causes Changes in Hormone Sensitivity in the Arabidopsis Root System. **Plant Physiology**, Dordrecht, v. 129, p. 244–256, 2002.
- LYNCH, J. Root architecture and plant productivity. **Plant Physiology**, Stanford, v. 109, n. 1, p. 7-13, 1995.
- LYNCH, J. P.; BROWN, K. M. Topsoil foraging - An architectural adaptation of plants to low phosphorus availability. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 237, p. 225-237, 2001.
- MACHADO, C. T. T.; FURLANI, A. M. C.; MACHADO, A. T. Índices de eficiência de variedades locais e melhoradas de milho ao fósforo. **Bragantia**, Campinas, v. 60, p. 225-238, 2001.
- RIBEIRO JUNIOR, J. I. **Análises estatísticas no Saeg**. Viçosa: UFV, 2001. 301 p.
- TUBEROSA, R.; SALVI, S.; SANGUINETI, M. C.; MACCAFERRI, M.; GIULIANI, S.;
- VIEIRA, R. F.; JOCHUA, C. N.; LYNCH, J. P. Method for evaluation of root hairs of common bean genotypes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 9, p. 1365-1368, 2007.
- WANG, R.; TISCHNER, R.; GUTIÉRREZ, R. A.; HOFFMAN, M.; XING, X.; CHEN, M.; CORUZZI, G.; CRAWFORD, N. M. Genomic analysis of the nitrate response using a nitrate reductase-null mutant of Arabidopsis. **Plant Physiology**, Stanford, v. 136, n. 1, p. 2512-2522, 2004.

YAN, X.; LIAO, H.; BEEBE, S. E.; BLAIR, M. W.; LYNCH, J. P. QTL mapping of root hair and acid exudation traits and their relationship to phosphorus uptake in common bean. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 265, p. 17-29, 2004.

ZHU, J.; KAEPLER, S.M.; LYNCH, J.P. Mapping of QTL for lateral root branching and length in maize (*Zea mays* L.) under differential phosphorus supply. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 111, p. 688–695, 2005.

ZHU, J.; LYNCH, J. P. The contribution of lateral rooting to phosphorus acquisition efficiency in maize (*Zea mays* L.) seedlings. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 31, p. 949-958, 2004.

ZHU, J.; MICKELSON, S. M.; KAEPLER, S. M.; LYNCH, J. P. Detection of quantitative trait loci for seminal root traits in maize (*Zea mays* L.) seedlings grown under differential phosphorus levels. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 113, p. 1-10, 2006.