

**MARCADORES MORFOLÓGICOS DE RAIZ
EM GENÓTIPOS DE MILHO
CONTRASTANTES PARA TOLERÂNCIA À
SECA EM RESPOSTA A ESTRESSES DE
FÓSFORO E ALUMÍNIO**

FERNANDO RODRIGO DE OLIVEIRA CANTÃO

2007

FERNANDO RODRIGO DE OLIVEIRA CANTÃO

**MARCADORES MORFOLÓGICOS DE RAIZ EM GENÓTIPOS
DE MILHO CONTRASTANTES PARA TOLERÂNCIA À SECA
EM RESPOSTA A ESTRESSES DE FÓSFORO E ALUMÍNIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Fisiologia Vegetal, para a obtenção do título de “Mestre”.

(Orientadora)

Profª. Dra. Ângela Maria Soares

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2007

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Cantão, Fernando Rodrigo de Oliveira

Marcadores morfológicos de raiz em genótipos de milho contrastantes para tolerância à seca em resposta a estresse de fósforo e alumínio / Fernando Rodrigo de Oliveira Cantão. -- Lavras : UFLA, 2007.

98 p. : il.

Orientador: Ângela Maria Soares.

Dissertação (Mestrado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Milho. 2. Marcadores morfológicos. 3. Raízes. 4. Fósforo. 5. Alumínio. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-633.1523

FERNANDO RODRIGO DE OLIVEIRA CANTÃO

**MARCADORES MORFOLÓGICOS DE RAIZ EM GENÓTIPOS DE
MILHO CONTRASTANTES PARA TOLERÂNCIA À SECA EM
RESPOSTA A ESTRESSES DE FÓSFORO E ALUMÍNIO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Lavras como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Agronomia, área
de concentração em Fisiologia
Vegetal, para a obtenção do título de
"Mestre".

APROVADA em 4 de abril de 2007

Prof. Dr. Luiz Edson Mota de Oliveira UFLA

Dr. Paulo César Magalhães EMBRAPA-CNMPS

Profª. Dra. Ângela Maria Soares
UFLA
(Orientadora)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

A minha mãe, Maria José, tia Rosarina, minha avó Titinha,
minhas irmãs, Fabiane e Franciane e minha namorada Patrícia, pelo
carinho, amor e incentivo,

DEDICO

Aos meus tios Antônio Carlos e Flávia e minhas primas
Paula e Carla, sempre presentes em minha vida,

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e em especial ao Setor de Fisiologia Vegetal, pela acolhida e a possibilidade de realização deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de estudos.

À professora Dra. Ângela Maria Soares, pela amizade, ensinamentos transmitidos, orientação e apoio na realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Luiz Edson Mota de Oliveira, pela amizade sincera e ensinamentos transmitidos.

Ao pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo Dr. Paulo César Magalhães, pela confiança, amizade e ensinamentos transmitidos.

À Embrapa Milho e Sorgo, pela oportunidade da realização deste estudo.

À estagiária da Embrapa Milho e Sorgo Ana Paula Mendes Figueiredo, pelo valioso auxílio nas coletas dos dados e amizade.

Aos colegas do Laboratório de Ecofisiologia: João Paulo, Gustavo, Tereza e Marilza, pela amizade e o bom convívio.

Aos servidores do setor de Fisiologia Vegetal Tanhã, Lena, Evaristo, Izonel, Joel e Odorêncio, por toda dedicação e amizade.

As minhas colegas de curso Fúlvia, Janaína e Milene, pelo alegre convívio e amizade sincera.

E, em especial, ao amigo Dr. Frederico Ozanan Machado Durães e meu tio Dr. Antônio Carlos de Oliveira, pelo exemplo, incentivo, confiança e pelos valiosos ensinamentos.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT.....	ii
CAPÍTULO 1.....	1
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
2.1 Considerações gerais.....	4
2.2 Importância do fósforo no crescimento e no desenvolvimento de plantas.....	6
2.3 Obtenção de genótipos de milho eficientes na utilização de fósforo.....	8
2.4 Importância do alumínio no crescimento e no desenvolvimento de plantas.....	10
2.5 Obtenção de genótipos tolerantes ao alumínio.....	11
2.6 O sistema radicular.....	13
2.7 Métodos de avaliação do sistema radicular.....	14
2.8 Avaliação do sistema radicular a partir da análise de imagens digitais...	16
3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	19
CAPÍTULO 2: Atributos morfológicos de sistema radicular de genótipos de milho contrastantes para tolerância à seca em resposta a estresse de fósforo.....	28
RESUMO.....	29
ABSTRACT.....	30
1 INTRODUÇÃO.....	31
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	33
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
3.1 Elementos meteorológicos.....	39
3.2 Produção de matéria seca.....	40

3.3 Atributos morfológicos de raiz.....	46
3.3.1 Comprimento total, área de superfície, diâmetro médio e volume de raiz.....	46
3.3.2 Comprimento de raízes por classe de diâmetro.....	52
4 CONCLUSÕES.....	57
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
CAPÍTULO 3: Atributos morfológicos de sistema radicular de genótipos de milho contrastantes para tolerância à seca em resposta a estresse de alumínio.....	62
RESUMO.....	63
ABSTRACT.....	64
1 INTRODUÇÃO.....	65
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	67
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
3.1 Produção de matéria seca.....	72
3.2 Atributos morfológicos de raiz.....	76
3.2.1 Comprimento de total, área de superfície, diâmetro médio e volume de raiz.....	76
3.2.2 Comprimento de raízes por classe de diâmetro.....	82
4 CONCLUSÕES.....	87
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
ANEXOS.....	91

RESUMO

CANTÃO, Fernando Rodrigo de Oliveira. **Marcadores morfológicos de raiz em genótipos de milho contrastantes para tolerância à seca em resposta a estresses de fósforo e alumínio.** 2007. 98p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil.

Foram conduzidos dois experimentos, na Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, com os seguintes objetivos: avaliar atributos morfológicos de sistema radicular de genótipos de milho contrastantes para tolerância à seca, avaliar características de crescimento de raiz e parte aérea e utilizar a técnica de análise de imagens digitais como ferramenta auxiliar no *screening* precoce de genótipos de milho em resposta a níveis diferenciados de fósforo e alumínio. Foram utilizados materiais provenientes do programa de melhoramento genético da Embrapa Milho e Sorgo, que tem como objetivo em uma de suas linhas de pesquisa, a tolerância à seca, sendo duas linhagens tolerantes (L1 e L3) e duas sensíveis à seca (L2 e L4) avaliadas em canteiros experimentais preparados isoladamente para dois níveis de fósforo e três níveis de saturação por alumínio. As características morfológicas de sistema radicular foram determinadas com o auxílio do sistema de análise de imagens digitais *WinRHIZO*. Em geral, as linhagens tolerantes à seca apresentaram características diferenciadas de sistema radicular, sugerindo que a seleção de genótipos para tolerância à seca promove de forma indireta a seleção para eficiência na utilização de fósforo e tolerância ao alumínio. A utilização da técnica de análise de imagens digitais mostrou-se uma ferramenta promissora para estudos de raízes, pois permitiu discriminar atributos morfológicos de raízes em fase precoce da cultura.

¹ **Comitê Orientador:** Profa. Dra. Ângela Maria Soares – UFLA (Orientadora), Dr. Frederico Ozanam Machado Durães – EMBRAPA (Co-orientador), Dr. Antônio Carlos de Oliveira – EMBRAPA. (Co-orientador).

ABSTRACT

CANTÃO, Fernando Rodrigo de Oliveira. **Morphological markers of root in maize genotypes which contrast for drought tolerance in response to phosphorus and aluminium stresses**. 2007. 98p. Dissertation (Master in Plant Physiology) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brazil.

Two experiments were carried out at Embrapa Maize and Sorghum Research Center, Sete Lagoas, MG State, with the following objectives: evaluate morphological attributes of root system in maize genotypes which contrast for drought tolerance, evaluate characteristics of growth in root system and plant canopy and evaluate the use of digital images techniques as tools to help in early screening of maize genotypes which respond to different levels of phosphorus and aluminum. Genetic materials from Embrapa Maize and Sorghum breeding program were used, being two inbred lines tolerant to drought (L1 and L3) and two sensitive (L2 and L4). These inbred lines were evaluated in seedling beds which presented two levels of phosphorus and three levels of aluminum saturation. The morphological characteristics of root system were evaluated with digital images analysis called *WinRHIZO*. In general, the inbred lines tolerant to drought showed different characteristics of root system suggesting that genotypes selection for drought tolerance promotes indirect selection for efficiency and utilization of phosphorus and aluminum tolerance. The use of digital images technique was a promising tool for root studies, since permitted discriminate morphological attributes of roots in early crop growth.

¹ **Advisory Committee:** Profa. Dra. Ângela Maria Soares – UFLA (Adviser), Dr. Frederico Ozanan Machado Durães – EMBRAPA (Co-Adviser), Dr. Antônio Carlos de Oliveira - EMBRAPA (Co-Adviser).

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

Os estresses abióticos afetam fortemente o estabelecimento e performance produtiva de cereais cultivados em áreas tropicais, resultando em decréscimos acentuados de rendimento de grãos de importantes espécies, como: milho, sorgo, arroz e trigo. Os estresses *per se* e os múltiplos estresses carecem de ser estudados em profundidade, com o objetivo de compreender respostas diferenciais entre e dentro de espécies. O melhoramento de cada espécie requer adequado controle ambiental e a definição de parâmetros fenotípicos de genótipos, visando entender os mecanismos de tolerância e ou eficiência e à obtenção de genótipos superiores mais produtivos e estáveis.

A deficiência hídrica, associada ou não ao excesso de alumínio (Al) e a deficiência de fósforo (P) são responsáveis por grandes quedas de produtividade na cultura do milho em solos de cerrado. O desenvolvimento de genótipos tolerantes à seca e a deficiências nutricionais torna-se uma alternativa para aumentar a produtividade desta cultura, resultando tanto em economia como também possibilitando melhor rendimento para agricultores com baixo capital de investimento. Diversos trabalhos têm mostrado que cultivares de várias espécies apresentam variabilidade em relação à capacidade de absorção e utilização de nutrientes, assim como níveis variáveis de tolerância à toxidez a alumínio. Nesse sentido, a compreensão dos mecanismos de toxidez de Al, eficiência na absorção e utilização de P e de tolerância à seca torna-se fundamental para programas de melhoramento, pois, esta compreensão auxilia na escolha de critérios de seleção, aumentando a eficiência e a rapidez do processo.

A Embrapa Milho e Sorgo vem conduzindo, desde a década de 1970, um amplo programa de melhoramento de milho, envolvendo várias ações de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), com o objetivo de selecionar genótipos de milho para tolerância a estresses abióticos, dentre os quais alumínio, fósforo, nitrogênio e estresse hídrico (seca e encharcamento). A plataforma Embrapa para avaliação de genótipos para estresses abióticos é seqüenciada e os métodos utilizados são diferenciados para avaliação de genótipos a campo, canteiros experimentais específicos, casa de vegetação, câmara de crescimento e laboratórios.

Genótipos elites de milho caracterizados para tolerância à seca estão sendo avaliados para tolerância e ou eficiência para estresses abióticos, incluindo alumínio e fósforo. Teorias específicas que envolvem cada estresse em plantas superiores estão sendo discutidas para os estresses múltiplos e as diversas relações de respostas de plantas de milho têm conduzido a experimentação, enfocando diferentes estratégias de fenotipagem, de preliminar à avançada, para tolerância à seca. Isto tem orientado as ações de pesquisa para a busca de parâmetros fenotípicos e a compreensão de mecanismos, em sistemas especialistas, quer seja em folhas, órgãos reprodutivos e ou raízes. Assim, uma etapa do estruturado programa de melhoramento de milho para estresses abióticos, da Embrapa Milho e Sorgo, trata da seleção precoce de genótipos sob condições ou regimes diferenciais de água, fósforo e alumínio.

Neste contexto, este trabalho foi desenvolvido com base nas hipóteses de que genótipos de milho melhorados para tolerância à seca abrigam variabilidade para tolerância ao alumínio e ou eficiência na utilização de fósforo; de que marcador fenotípico para caracterização visando tolerância à seca pode ser útil para seleção de materiais tolerantes ao alumínio e ou eficientes na utilização de fósforo e que marcador fenotípico de sistema radicular de milho em *screening* precoce pode ser correlacionado e útil para fenotipagem, visando

tolerância a estresses abióticos (água, alumínio, fósforo), em fase adulta da espécie.

O presente estudo teve como objetivos: caracterizar morfologia de sistema radicular de genótipos de milho; utilizar características de crescimento de plantas como ferramenta auxiliar no *screening* precoce de genótipos milho e utilizar a técnica de análise de imagens digitais, como ferramenta auxiliar no *screening* precoce de genótipos de milho pré-selecionados para tolerância à seca do programa de melhoramento genético da Embrapa Milho e Sorgo em resposta a níveis diferenciados de fósforo e alumínio em canteiros experimentais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Considerações gerais

Com o grande crescimento populacional, surge a necessidade de aumentar a produção de alimentos no mundo, aliado a isso, a necessidade por fontes de energia renováveis, a demanda por culturas que possam suprir essas necessidades é cada vez maior. O Brasil destaca-se como o terceiro maior produtor mundial de milho, ficando atrás apenas dos Estados Unidos e da China (FAO, 2006). Abrangendo uma área produtora de aproximadamente 13 milhões de hectares, apresentou, no ano de 2006, uma produção superior a 41,0 milhões de toneladas, sendo um dos mais importantes produtos agrícolas do Brasil (AGRIANUAL, 2007).

A maior parte da produção nacional de milho concentra-se nas regiões Sul, Centro-Oeste e Sudeste; áreas tradicionalmente produtoras dessa cultura, correspondendo a 93% do total produzido no país (IBGE, 2006). Havendo uma grande diversidade de condições de cultivo, desde a agricultura de subsistência, praticamente sem adoção de insumos, cuja produção é destinada, quase que exclusivamente, ao consumo na propriedade e, se existirem excedentes, estes podem ser comercializados. Por outro lado, no outro extremo, há agricultores que utilizam a máxima tecnologia, obtendo produtividades cada vez maiores e equivalentes aos países de agricultura mais avançada (Machado, 2003).

Com a expansão da fronteira agrícola do cerrado, que ocorreu de forma bastante acelerada nas décadas de 1980 e 90, a produção brasileira de grãos, principalmente de milho e soja, apresentaram um incremento considerável, graças à incorporação de novas áreas ao processo produtivo.

A região do Cerrado, presente em 11 estados brasileiros e no Distrito Federal, compreende uma área de aproximadamente 250 milhões de hectares, dos quais 112 milhões são considerados agricultáveis. Atualmente, 30% da

produção brasileira é oriunda do cerrado, ocupando uma área de cerca de 3,5 milhões de hectares (Brasil, 2003).

Vários fatores têm limitado a produção de cereais em solos sob vegetação de cerrado, dentre eles, deficiência de fósforo, toxidez por alumínio e déficit hídrico têm sido citados como os principais problemas encontrados nessa região. Assim, para que este agroecossistema possa ser incorporado ao processo produtivo há necessidade da utilização de grandes quantidades de fertilizantes e corretivos, que oneram os custos de produção podendo trazer também prejuízos ao meio ambiente.

As tecnologias utilizadas para aumentar a produtividade das culturas foram baseadas no adequado fornecimento de nutrientes à planta, ou seja, enfatizaram a importância de melhorar as condições do solo para o pleno desenvolvimento das plantas. Alguns atributos de solo já foram ajustados a níveis ótimos, com a utilização de fertilizantes minerais (Brasil, 2003). Esta é uma prática essencial para a obtenção de produções satisfatórias, apesar de resultar no aumento dos custos de produção.

Dentro deste enfoque, a identificação de mecanismos envolvidos na eficiência de aquisição de P, tolerância à seca e ao Al em genótipos de milho que ajustem as plantas ao solo (Vose, 1983) poderá possibilitar a melhoria dos sistemas de produção, com maior retorno econômico aos produtores e menor agressão ao meio ambiente, além de auxiliar programas de melhoramento de plantas voltados para alta eficiência na utilização de nutrientes, e sob condições adversas como toxicidade de alumínio e a deficiência hídrica.

2.2 Importância do fósforo no crescimento e no desenvolvimento de plantas

O elemento fósforo pode ser considerado onipresente nas plantas, por estar envolvido em quase todos os processos metabólicos. Sua baixa disponibilidade é um dos principais fatores responsáveis pela redução na produtividade tanto em ecossistemas naturais, quanto em ecossistemas agrícolas, devido ao grande número de processos de que participa (Lynch & Brown, 2001). Sua mobilidade na planta possibilita que o mesmo átomo de P passe de um composto para outro, várias vezes. Além disso, sua elevada mobilidade permite seu acúmulo em folhas novas, flores e sementes, que poderão ser translocados para outras partes da planta.

Na planta, o fosfato pode constituir desde moléculas simples a moléculas mais complexas, com maior ou menor estabilidade. É componente chave para moléculas, como ácido fítico, coenzimas, açúcares-fosfato, nucleotídeos, ácidos nucleicos, fosfolipídeos e ATP.

Na sua forma inorgânica, está envolvido no transporte de elétrons, no controle de reações enzimáticas e na regulação de vias metabólicas (Bennett, 1994). Segundo este mesmo autor, o P apresenta função estrutural na constituição de ácidos nucleicos que são unidades que formam o DNA e o RNA, moléculas estas responsáveis pela transferência da informação genética.

Espécies vegetais apresentam diferenças quanto a sua capacidade de utilização de nutrientes e para o caso específico do P, diversos trabalhos têm comprovado este fato (Barrow, 1975; Fernandes, 2001). Em milho, é possível que a variabilidade genética entre híbridos e variedades lhe confira rusticidade e potenciais produtivos distintos, que podem ser responsáveis pela capacidade diferencial desses grupos de plantas em absorver o P (Horn, 2006).

Modificações dos atributos de sistema radicular de plantas eficientes na aquisição de P em resposta à baixa disponibilidade deste nutriente ocorrem de diversas maneiras, como: a) formação de raízes proteóides (raízes terciárias

curtas, com aspecto de uma densa cabeleira, originadas do periciclo), que aumentam grandemente a área superficial do sistema radicular (Gilbert et al., 1988; Keerthisinghe et al., 1997); b) alteração da curvatura gravitrópica (ângulo de crescimento das raízes basais), permitindo maior exploração dos horizontes superficiais do solo, em que a disponibilidade de P, normalmente é maior (Bonser et al., 1996; Lynch & Brown, 1997); c) presença de pêlos radiculares (Jungk, 2001); d) formação de raízes adventícias (Miller et al., 1998).

No sistema solo, a absorção de P pelas raízes é o resultado de interações entre características morfofisiológicas das raízes, da rizosfera imediatamente adjacente ao sistema radicular e de características de solo que determinam o fluxo de nutrientes para interface solo-raiz (Alves, 1998).

A capacidade das plantas de se desenvolverem em solos com baixo teor de fósforo disponível tem sido atribuída a diversos fatores, incluindo diferenças na morfologia, fisiologia e densidade dos pêlos radiculares (Hocking et al., 1997).

Em milho, Fernandes et al. (2002) observaram que genótipos de milho ineficientes na utilização de P, quando cultivados em solução nutritiva com omissão deste elemento, não apresentaram diferenças quanto à morfologia do sistema radicular, enquanto que os considerados eficientes aumentaram o peso e o comprimento das raízes após o estresse. Estes aumentos no comprimento foram de 55% para os híbridos simples, 61% para o duplo e 112% para o triplo.

O aumento na formação de raízes finas e longas para a mesma massa (mesmo consumo metabólico), juntamente com a melhoria de características da cinética de absorção, tem sido citado como uma estratégia utilizada pelas plantas, em condições de baixo suprimento de P (Anghinoni & Meurer, 1999; Nielsen & Barber, 1978). Essas características resultam em maior área superficial de raiz, favorecendo o aumento na eficiência de absorção de nutrientes pouco móveis, como é o caso do P.

A quantificação de características morfológicas do sistema radicular das plantas tem sido relacionada à eficiência da nutrição fosfatada, pois permite a descrição de um sistema radicular eficiente na aquisição de P. Dentre estas características, podem ser citadas: comprimento, área de superfície, diâmetro, razão massa radicular/massa de parte aérea, densidade e comprimento de pêlos radiculares (Baligar & Barber, 1979; Brasil, 2003; Machado, 2000; Nielsen & Barber, 1978). Juntamente com alterações na morfofisiologia do sistema radicular, as associações micorrízicas também apresentam papel fundamental na absorção de nutrientes pouco móveis no solo como é o caso de P, em decorrência da liberação de exsudatos, lisatos e ácidos orgânicos, que atuam de forma semelhante aos exudatos de raiz (Brasil, 2003).

2.3 Obtenção de genótipos de milho eficientes na utilização de fósforo

Plantas eficientes na aquisição de P têm sido definidas como aquelas que acumulam maiores concentrações deste nutriente, mesmo quando cultivadas em condições limitantes deste nutriente (Clarck & Brown, 1974). Loneragan & Asher (1967) definem a eficiência na utilização de P, como a quantidade de matéria seca produzida por unidade de P absorvido. No entanto, estas definições são baseadas na quantidade de P absorvido e não permitem a seleção para máxima a produtividade de matéria seca, em solos com baixo conteúdo de P disponível. Segundo Fox (1978), plantas eficientes são “aquelas que produzem uma grande quantidade de matéria seca por unidade ou tempo e área, desenvolvendo em meio que tenha P disponível menos do que suficiente para a máxima produtividade”. Segundo este autor, eficiência na utilização de P tem significado somente quando se comparam plantas sob mesmas condições quanto ao conteúdo de P no solo.

A eficiência na utilização do P tem sido atribuída a diversos fatores, incluindo diferenças na morfologia do sistema radicular e densidade de pêlos

radiculares (Hocking et al., 1997). As principais características morfológicas do sistema radicular relacionadas à nutrição fosfatada, por configurarem em sistema eficiente na aquisição de P, são comprimento e área de superfície das raízes, raio ou diâmetro radicular, razão de superfície (ou massa) radicular/massa de parte aérea e densidade de pêlos radiculares (Brasil, 2003; Machado, 2000).

De acordo com Vilela & Anghinoni (1984) a absorção de nutrientes apresenta alta relação com o comprimento e diâmetro de raízes porque estes atributos influenciam a superfície de raiz. O uso de modelos mecanísticos mostrou que a área superficial das raízes foi o parâmetro que mais influenciou a absorção de N (Barber, 1995), enquanto o diâmetro e a taxa de crescimento radicular foram os mais importantes para P e K (Ernani et al., 1994).

As estratégias desenvolvidas pelas plantas para aumentar a absorção de P diferem entre e dentro de espécies (Föhse et al., 1988), algumas aumentam a área de superfície de raízes, outras apresentam alta taxa de absorção por unidade de comprimento radicular. Segundo Raghothama (1999), as mudanças adaptativas apresentadas pelas plantas em resposta à limitação de P na rizosfera, podem ainda, ser de natureza fisiológica (aumento da translocação de P dentro da planta, secreção de fosfatases, alteração na respiração etc.), bioquímica (ativação enzimática, liberação de ácidos orgânicos, etc.) molecular (ativação de genes como RNAases, transportadores de fosfatos, PEP carboxilase, etc.).

Neste contexto, a determinação dos mecanismos envolvidos na eficiência de utilização de P, bem como a caracterização do sistema radicular, pode auxiliar programas de melhoramento na seleção de genótipos mais eficientes, podendo proporcionar ganhos de produtividade em solos com baixa disponibilidade deste nutriente.

2.4 Importância do alumínio no crescimento e no desenvolvimento de plantas

A toxicidade ao alumínio (Al) é considerada um dos fatores mais importantes que limitam a produtividade agrícola em solos ácidos com $\text{pH} \leq 5,0$ (Aniol, 1990; Bennet & Breen, 1991; Foy et al., 1978; Kochian, 1995), que cobrem uma área de 1,66 milhões de hectares distribuídos em várias regiões do mundo e, aproximadamente, 43% destas áreas estão localizadas na região tropical (Cançado et al., 2002). No Brasil, os solos ácidos encontram-se, principalmente, na região do Cerrado (Embrapa, 2000).

O alumínio em níveis tóxicos no solo pode causar efeitos danosos para as plantas, determinando injúrias e retardando o crescimento (Machado & Pereira, 1990). A baixa fertilidade deste tipo de solo é um problema complexo e as razões para o baixo desenvolvimento das plantas ainda não foram totalmente esclarecidas. A absorção e o acúmulo desse elemento em diferentes partes da planta afetam células e organelas em nível morfológico, citogenético e fisiológico, prejudicando seu desenvolvimento, principalmente do sistema radicular (Mazzocato, 2002).

De acordo com Foy (1976), o alumínio prejudica a absorção de fósforo de duas formas: reduz o crescimento do sistema radicular e liga-se ao fósforo, tanto na superfície quanto no interior das células, formando compostos de baixa solubilidade (Clarkson, 1966). Dessa forma, ocorre a redução na absorção do fósforo, bem como a precipitação do nutriente nas raízes, restringindo a sua translocação para a parte aérea.

A calagem é uma prática cultural que possibilita minimizar os efeitos danosos causados pelo Al e que contribuem para elevar o pH, principalmente na camada arável do solo, tornando o Al menos solúvel, reduzindo sua toxicidade relativa (Marion et al., 1976). Entretanto, muitas vezes, esta prática cultural não é realizada, por não estar ao alcance econômico dos produtores (Pandey et al.,

1994; Zeigler et al., 1995). Além disso, dada a dificuldade técnica de se realizar a calagem abaixo da camada arável, o excesso de Al trocável torna-se especialmente prejudicial no subsolo, porque reduz a profundidade e a ramificação do sistema radicular, tornando as plantas predispostas a outros tipos de estresse, como, por exemplo: o hídrico (Kennedy et al., 1987).

Muitos estudos têm demonstrado que a inibição do crescimento radicular é o sintoma mais visível da toxicidade por Al em plantas, o que resulta na redução e danos do sistema radicular, podendo conduzir a deficiência mineral e ao estresse hídrico por seca (Degenhardt et al., 1998). A redução da parte aérea ocorre em um momento posterior (Jones & Kochian, 1995; Ryan et al., 1993) e parece ser uma consequência dos danos que ocorrem na raiz (Echart & Cavalli-Molina, 2001; Matsumoto et al., 1976).

Dessa forma, o desenvolvimento de materiais tolerantes ao estresse provocado pelo Al constitui uma alternativa de custo relativamente baixo, podendo proporcionar ganhos de produtividade (Duque-Vargas et al., 1994), além de reduzir os riscos da produção nestes solos (Lopes et al., 1987).

2.5 Obtenção de genótipos de milho tolerantes ao alumínio

Como a seleção de plantas tolerantes ao Al tem sido considerada a alternativa mais adequada para aumentar a produtividade em solos ácidos com altas concentrações de Al, o primeiro passo a ser tomado nesta abordagem é estabelecer um sistema rápido e preciso para a seleção de um grande número de plantas (Echart & Cavalli-Molina, 2001).

Em programas de melhoramento genético de milho visando à tolerância ao Al, é comum a realização de seleção em solução nutritiva, contendo níveis tóxicos de Al. Existem várias metodologias para avaliação da tolerância ao Al (Garcia et al., 1979; Magnavaca, 1982; Rhue & Grogan, 1977), principalmente no caso das gramíneas, há um consenso de que características baseadas no

desenvolvimento do sistema radicular são os melhores critérios para avaliação da tolerância.

Cada metodologia tem suas vantagens e desvantagens, técnicas de seleção a campo selecionam germoplasmas sob condições climáticas e de solo naturais e os dados finais refletem uma integração dos efeitos do estresse da toxicidade do Al e todas as condições do solo como o ciclo de crescimento completo. As desvantagens dos testes de campo são o tempo requerido (usualmente um período de crescimento completo), problemas da variabilidade das características do solo, efeitos de resistência diferencial a pragas e doenças, vulnerabilidade do material às intempéries ambientais, como seca ou inundação, e a inability em interpretar o desempenho apresentado pelas plantas, em função da complexidade das interações do meio ambiente.

Em experimentos nos quais são empregados solos sob condições controladas, é difícil selecionar solos que sejam adequados para uso em seleção de plantas tolerantes ao Al visto que, em solos, a toxicidade ao Al não é o único fator limitante. Além disso, o efeito primário do Al nas plantas é a inibição do crescimento da raiz, e as raízes não são de fácil observação. Devido às limitações da seleção a campo e em solo, sob condições controladas, a maioria dos trabalhos de seleção de cultivares tolerantes ao Al tem sido conduzida usando metodologias que utilizam solução de nutrientes.

No caso da cultura do milho, a maioria das cultivares comerciais são suscetíveis ao Al, mas existe variabilidade genética dentro desta espécie. Assim torna-se necessário o desenvolvimento de protocolos e metodologias que auxiliem na seleção de materiais mais tolerantes em um estágio preliminar do programa de melhoramento, reduzindo o número de genótipos que, posteriormente, deverão ser avaliados em solos ácidos. Isto permite uma significativa redução no uso de área e no custo das avaliações (Magnavaca & Bahia-Filho, 1991).

2.6 O sistema radicular

A distribuição de raízes no solo é resultante de uma série de processos complexos e dinâmicos, os quais incluem as interações entre o ambiente, o solo e as plantas em pleno crescimento (Fante Júnior, 1997). Todos estes fatores interagem com as características intrínsecas, ou seja, o genótipo da espécie, resultando em uma arquitetura radicular única para cada planta e sua forma, profundidade e distribuição lateral dependem do potencial genético de cada espécie (Mello, 1997).

A caracterização da distribuição do sistema radicular no solo e o conhecimento de suas variações genéticas são fundamentais para a escolha dos melhores genótipos, ou seja, os mais adaptados às condições de estresse do solo e, conseqüentemente, com maior capacidade de crescimento, desenvolvimento e produtividade nestes solos (Silva, 2003).

A quantidade de raízes, isto é, o comprimento radicular é um importante parâmetro para a determinação da qualidade do sistema radicular, pois irá resultar em plantas que poderão explorar um maior volume de solo e, conseqüentemente absorverem mais ou menos nutrientes e água (Bohm, 1979). Esse fator é particularmente importante onde os nutrientes e a água são escassos, demandando, assim, maior comprimento e quantidade de raízes, para aumentar as chances deste sistema radicular absorver nutrientes e água de que a planta necessita para sua sobrevivência, crescimento e desenvolvimento.

De acordo com Silva (2003), as raízes finas ou de absorção são aquelas que apresentam intensa atividade metabólica, tendo como principal atribuição fisiológica a absorção de água e nutrientes; as raízes de sustentação, mais espessas e suberificadas, são responsáveis pelo suporte estrutural e pela condução de soluções entre o sistema radicular e a parte aérea das plantas.

Em condições naturais, diferentes partes do sistema radicular são submetidas a ambientes contrastantes, dependendo de sua distância em relação à

superfície. Assim, torna-se importante conhecer a contribuição de cada parte do sistema radicular na nutrição de toda planta. É preciso avaliar qual característica de sistema radicular é mais relevante na absorção de nutrientes: comprimento radicular, área superficial, diâmetro médio, volume ou peso de raízes.

Russel (1977) descreve que a área de superfície de raízes é a característica mais relevante na absorção nutrientes pouco móveis no solo. No entanto, para espécies de cereais, quando a concentração externa de nutrientes é similar em toda a superfície de raízes, a eficiência de absorção apresenta maior relação com volume de raízes do que com o comprimento ou área superficial (Costa, 2002).

2.7 Métodos de avaliação do sistema radicular

De acordo com Bohm (1979), tradicionalmente, os estudos sobre crescimento radicular são feitos por meio da avaliação de características como massa seca, comprimento, área explorada, volume de solo explorado, no tempo e no espaço, em conjunto com os fatores do ambiente que influenciam sua distribuição, como: densidade e porosidade do solo, água, ar, nutrientes disponíveis e pH do solo.

Esses métodos indiretos para estudos de raízes não permitem um conhecimento adequado do sistema radicular, como a quantidade de raízes finas e diâmetro médio das raízes, que são importantes parâmetros morfológicos utilizados para determinação da qualidade do sistema radicular. Segundo este mesmo autor, as metodologias utilizadas tradicionalmente para avaliação do sistema radicular de plantas, destacam-se como o principal fator limitante na investigação da morfologia e distribuição do sistema radicular.

Muitos métodos de avaliação do sistema radicular têm sido propostos e freqüentemente produzem resultados inexatos (Costa et al., 2001; Fante Júnior, 1997), e muitas vezes não são operacionais por consumirem muito tempo (Costa

et al., 2000). Portanto, a avaliação do sistema radicular com precisão representa um desafio contínuo para pesquisadores.

Dentre os métodos mais utilizados no estudo de raízes podem-se destacar: o método de trincheira ou parede de perfil; método dos blocos ou monólito; placas com pregos; sonda e rhizotron, tradagem, perfis de solo para filmagens e ou contagem do número de raízes, análise de imagens digitais (Costa, 2002; Jorge et al., 1996; Vasconcelos, 2002a,b). Faroni (2004) ressalta que técnicas isotópicas podem ser associadas a estes métodos, quando a interesse no estudo de cinética de absorção de minerais.

Para a avaliação do sistema radicular em condições naturais, ou seja, *in situ*, tem sido utilizado o método da trincheira ou parede de perfil. Este método consiste na escavação de uma trincheira ao lado da planta que se deseja avaliar o sistema radicular, removendo, posteriormente, uma fina camada da parede do perfil, expondo as raízes com posterior determinação (Böhm, 1979).

O método do monólito, também conhecido por método de blocos consiste na retirada de blocos de solo com dimensões pré-definidas. Posteriormente, estas amostras são lavadas, separadas, tendo seu peso ou comprimentos determinados. No entanto, durante o procedimento de lavagem podem ocorrer perdas de até 40% de raízes conforme o método utilizado (Costa, 2002).

Uma variação do método do monólito ou método de blocos é o método da placa com pregos. Uma placa contendo pregos é pressionada contra a parede da trincheira onde estão as raízes, retirando-se posteriormente, um bloco único. As raízes permanecerão na posição original após a lavagem do solo, em função da presença de pregos. A dificuldade deste método consiste na penetração da placa em perfis de solos argilosos (Jorge et al., 1996).

Outro método bastante utilizado é o rhizotron. Este método consiste na utilização de um recipiente de vidro inserido no solo, no qual a planta se desenvolve e por meio do qual é possível visualizar o desenvolvimento das

raízes *in vivo* (Brasil, 2003). No entanto, devido à facilidade que as raízes encontram para o desenvolvimento próximo à parede de vidro, este é um método mais adequado para estudos fenológicos do que para estudos de distribuição de raízes (Böhm, 1979).

No método da sonda, a ferramenta é utilizada para a retirada de amostras de solos com raízes com diferentes profundidades e distâncias. As principais limitações do método são a lavagem e a retirada de amostras em solos com alto teor de argila. A vantagem é a possibilidade de retirada de grande número de amostras.

A discriminação isotópica também tem demonstrado ser uma poderosa ferramenta em estudos de raiz. Russel & Fillery (1996) destacam a técnica isotópica, por proporcionar um estudo *in situ*, mantendo o padrão natural de decomposição das raízes. Além disso, consegue-se um padrão real de distribuição das raízes no perfil do solo.

Com o uso de computadores, a análise de imagens tem aumentado o potencial para medir raízes, reduzindo o tempo requerido para a medida e permitindo a avaliação de diferentes variáveis de raiz, anteriormente não possíveis de serem mensuradas, como o número de raízes finas e o diâmetro médio das raízes (Costa et al., 2001). As avaliações das características das raízes pelos softwares são feitas rapidamente, com mais exatidão e menor subjetividade que os métodos anteriormente propostos.

2.8 Avaliação do sistema radicular a partir da análise de imagens digitais

Pouco se sabe sobre o sistema radicular e sua interação com a parte aérea durante o crescimento e o desenvolvimento das culturas, quando comparado aos fenômenos somente de parte aérea. Isso se deve, simplesmente ao fato de a aquisição de amostras e a análise de atributos morfológicos, como comprimento total, superfície, diâmetro médio e volume de raízes, serem muito mais tediosas,

demoradas e freqüentemente, apresentarem baixa precisão (Zoon e Van Tienderen, 1990).

No entanto, com o advento do primeiro microcomputador com circuito único integrado, no ano de 1971, foi possível alocar dispositivos eletrônicos microprocessados em praticamente todas as áreas do conhecimento. Muitos equipamentos e métodos tradicionais têm sido substituídos por sistemas baseados na medição eletrônica, para a obtenção e a análise de dados, com o processamento de imagens digitais (Gonzalez & Wintz, 1987, Vieira Junior et al., 2006).

A principal vantagem do processo digital de imagens é fornecer ferramentas para facilitar a identificação e a extração de informações contidas nas imagens, para posterior interpretação. Assim, sistemas de computação são utilizados para atividades interativas de análise e manipulação de imagens, notadamente com relação a forma, cor e textura dos objetos que compõem a imagem (Costa, 2002; Gonzalez & Wintz, 1987; Pratt, 1978; Vieira Júnior et al., 2006).

A análise de imagens digitais tornou o estudo de sistema radicular menos demorado, permitindo medidas mais precisas e menos subjetivas do que características que o olho humano é capaz de detectar (Box, 1996; Collins et al., 1987; Cunningham et al., 1989; Stutte & Stryjewski, 1995). Melhorias nas fontes de luz e desenvolvimentos técnicos na tecnologia de *escanners* permitiram aumentar o contraste de imagens e conseqüentemente, a precisão nos resultados obtidos (Arsenault et al., 1995).

Alguns *softwares* incorporam métodos correção de cor e já não requerem ajustes do limiar de exposição pelo usuário (Kaspar & Ewing, 1997). Isto resultou em exigências de trabalho muito reduzidas comparadas com técnicas anteriores, aumentando a precisão dos resultados obtidos.

Dentre os *softwares* utilizados para a avaliação de características do sistema radicular, destaca-se o sistema *WinRhizo*. A análise desse sistema é fundamentada no método da interseção de fragmentos de raiz em um malha de dimensões conhecidas. Neste método, as raízes são espalhadas aleatoriamente em cima de um anteparo, posteriormente são contadas as interseções, esse valor é então utilizado em uma expressão matemática estimando-se assim o comprimento do sistema radicular (Newman, 1966; Tennant, 1975). Uma desvantagem do método da interseção é o de assumir que as raízes estão distribuídas aleatoriamente, assim erros nas estimativas podem surgir quando esta suposição não é atendida. Em adição, quando ocorre sobreposição das raízes, seu comprimento pode ser subestimado. Uma grande vantagem do sistema *WinRhizo* é corrigir as limitações do método da interseção, aliado a sua facilidade operacional.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRIANUAL 2007 – Anuária da agricultura brasileira. São Paulo: FNP/M&S. 2007. 520 p.

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, n. 7, p. 10-47-52, jul. 1998.

ANGHINONI, I.; MEURER, E. J. Eficiência de absorção de nutrientes pelas raízes. In: FERNANDES, M. F.; TAVARES E. D.; LEAL, M. L. S. (Ed.). **Workshop sobre sistema radicular: metodologias e estudo de casos**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 1999. p. 57-87.

ANIOL, A. Genetics of tolerance to aluminium in wheat (*Triticum aestivum* L. Thell). **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 123, n. 2, p. 223-227, Apr. 1990.

ARSENAULT, J. L.; POULCUR, S.; MEESIER, C.; GUAY, R.; WinRHIZO, a root-measuring system with a unique overlap correction method. **HortScience**, Alexandria, v. 30. p. 906, 1995.

BALIGAR, V. C.; BARBER, S. A.; Genetic differences of corn on ion uptake. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, n. 5, 870-873, Sept./Oct. 1979.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. New York: John Wiley, 1995. 414 p.

BARROW, N. J. The response to phosphate of two annual pasture species. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v. 26, n. 1, p. 14-156, 1975.

BENNET, R. J.; BREEN, C. M. The aluminium signal: new dimensions to mechanisms of aluminium tolerance. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 134, n. 1, p. 153-166, July 1991.

BENNETT, W. Planta nutrient utilization and diagnostic plant symptoms In: BENNETT, W (Ed). **Nutrient deficiencies & toxicities in crop plants**. 2. ed. St. Paul, Minnessota: APS Press, 1994. p. 1-7.

- BOHM, W. **Methods of studying root systems**. New York: Springer-Verlag, 1979. 189 p.
- BONSER, A. M.; LYNCH, J. P.; Snapp, S. Effects of phosphorus deficiency on growth angle of basal roots of *Phaseolus vulgaris* L. **The New Phytologist**, Cambridge, v. 132, n. 2, p. 281-288, Feb. 1996.
- BOX, J. E. Modern methods for root investigations. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Ed.). **Plant roots: the hidden half**. New York: Marcel Dekker, 1996. p. 193-237.
- BRASIL, E. C. **Mecanismos envolvidos na eficiência de aquisição de fósforo em genótipos de milho**. 2003. 161 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- CANÇADO, G. M. A.; PARENTONI, S. N.; BORÉM, A.; LOPES, A. L. Avaliação de nove linhagens de milho em cruzamentos dialélicos quanto à tolerância ao alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 4, p. 471-478, abr. 2002.
- CLARK, R. B.; BROWN, J. C. Differential mineral uptake by maize inbreds. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 5, p. 213-227, 1979.
- CLARKSON, D. T. Effect of aluminum on the uptake and on metabolism of phosphorus by barley seedlings. **Plant Physiology**, Rockville, v. 41, n. 1, p. 165-172, Jan. 1966.
- COLLINS, R. P.; GREGORY, H. R.; ROWSE, A.; MORGAN, B.; LANCASHIRE. Improved methods of estimating root length using a photocopier, a light box and bar code reader. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 103, n. 2, p. 277-280, 1987.
- COSTA, C.; DWYER, L. M.; HAMEL, C.; MUAMBA, D. F.; WANG, X. L.; NANTAIS, L.; SMITH, D. L. Root contrast enhancement for measurement with optical scanner-based image analysis. **Canadian Journal of Botany**, Ottawa, v. 79, n. 1, p. 23-29, Jan. 2001.
- COSTA, C.; DWYER, L. M.; HAMILTON, R. I.; HAMEL, C.; NANTAIS, L.; SMITH, D. L. A. Sampling Method for Measurement of Large Root Systems with Scanner-Based Image Analysis. **Agronomy Journal**, Madison, v. 92, n. 4, p. 621-627, July/Aug. 2000.

COSTA, C.; DWYER, L. M.; ZHOU, X.; DUTILLEUL, P.; HAMEL, C.; REID, L. M.; SMITH, D. L. Root Morphology of Contrasting Maize Genotypes. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, n. 1, p. 96-101, Jan./Feb. 2002.

CUNNINGHAM, M.; ADAMS, M. B.; LUXMOORE, R. J.; POST, W. M.; DE ANGELIS, D. L. Quick estimates of root length, using video image analyzer. **Canadian Journal. Forest Research**, Montreal, v. 19, n. 3, p. 335-340, Mar. 1989.

DEGENHARDT, J.; LARSEN, P. B.; HOWELL, S. H.; KOCHIAN, L. V. Aluminium resistance in Arabidopsis mutant alr-104 is caused by an aluminium-induced increase in rhizosphere pH. **Plant Physiology**, Rockville, v. 117, n. 1, p. 19-27, May 1998.

DUQUE-VARGAS, J.; PANDEY, X.; GRANADOS, G.; CEBALLOS, H.; KNAPP, E. Inheritance of tolerance to soil acidity in tropical maize. **Crop Science**, Madison, v. 34, n. 1, p. 50-54, Jan./Feb. 1994.

ECHART, C. L.; CAVALLI-MOLINA, S. Fitotoxicidade do Alumínio: Efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 531-541, jul./set. 2001.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Planaltina, DF). **Ecosistema: o cerrado brasileiro**. Disponível em: <<http://www.cpac.embrapa/unidade.htm>>. Acesso em: 26 nov. 2000.

ERNANI, P. R.; SANTOS, J. C. P.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. Prediction of phosphorus uptake by a mechanistic model in a low phosphorus highly weathered soil as affected by mycorrhizae inoculation. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 17, n. 6, p. 1067-1078, 1994.

FANTE JÚNIOR, L. **Sistema radicular de aveia forrageira avaliado por diferentes métodos, incluindo processamento de imagens digitais**. 1997. 119 p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, SP.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em: <<http://www.fao.org>>. Acesso em: 30 jun. 2006.

FARONI, C. E.; TRIVELIN, P. C. O. **Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar pela técnica da diluição isotópica com ^{15}N** . In: FERTBIO 2004. Lages SBCS/UEDESC, 2004. 1CD-ROM.

FERNANDES, C. **Eficiência de diferentes culturas e híbridos de milho quanto à utilização de fósforo em solos do cerrado**. 2001. 51 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Piracicaba.

FERNANDES, C.; MURAOKA, T. Absorção de fósforo por híbridos de milho cultivados em solo de cerrado. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 781-787, out./dez. 2002.

FÖHSE, D.; N, JUNGK, A. Phosphorus efficiency of plants. I External and internal P requirement and uptake efficiency of different plants species. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 110, n. 1, p. 101-109, Aug. 1988.

FOY, C. D. Differential aluminium and manganese tolerances of plants species and variets in acids soils. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 150-155, Feb. 1976.

FOY, C. D.; CHANEL, R. L.; WRITE, M. C. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review Plant Physiology**, Palo Alto, v. 29, p. 511-566, 1978.

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.

GARCIA, O.; SILVA, W. J.; MASSEL, M. A. S. Na efficient method for screening maize inbreds for aluminium tolerance. **Maydica**, Bergamo, v. 24, n. 2, p. 75-82, Apr./June 1979.

GILBERT, G. A.; ALLAN, D. L.; VANCE, C. P. Phosphorus deficiency in white lupin alters root development and metabolism. In: FLORES, H. E.; LYNCH, J. P.; EISSENSTAT, D. (Ed.). **Advances and perspectives on the function of plant roots**. Rochville: American Society of Plant Physiologists, 1988. p. 394-396.

GONZALEZ, R. C.; WINTZ, P. A. **Digital image processing**. Reading: Addison-Wesley 1987. 431 p.

HOCHING, P. J.; KEERTHISINGLE, G G., SMITH, F. W., RANDALL, P. J. Comparison of the ability of different crop species to access poorly-available soil

phosphorus. In: Tando et al. **Plant Nutrition** – for sustainable food production and environment. Kluwer Academic Publishers, 1997. p. 365-08.

HORN, D.; ERNANI, P. R.; SANGOI, L.; SCHWATZER.; CASSOL, P. C. Parâmetros cinéticos e morfológicos da absorção de nutrientes em cultivares de milho com variabilidade genética contrastante. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 77-85, jan./fev. 2006.

IBGE. **Levantamento sistêmico da produção agrícola**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 30 jun. 2006.

JONES, D. L.; KOCHIAN, L. V. Aluminium of the 1,4,5-triphosphate signal transduction pathway in wheat roots: a role in aluminum toxicity. **Plant cell**, Rockville, v. 7, n. 11, p. 1913-1922, Nov. 1995.

JORGE, L. A. de C. **Recomendações práticas para aquisição de imagens digitais analisadas através do SIARCS**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 1996. 44 p. (Circular Técnica 1).

JUNGK, A. Roots hair and acquisition of plant nutrients from soil. **Journal Plant Nutrition and Soil Science**, Berlin, v. 164, n. 2. p. 121-129, Apr. 2001.

KASPAR, T. C.; EWING, R. P. ROOTEDGE: Software for measuring root length from desktop scanner images. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, n. 6, p. 932-940, Nov./Dec. 1997.

KEERTHISINGHE, G.; HOCKING, P J.; RYAN, P. R.; DELHANIE, E. 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.

KENNEDY, C. W.; CALDWELL., A. G.; HUTCHINSON, R. L.; JONES, J. E. Differences in root and shoot growth and soil moisture extraction between cotton cultivars in acid subsoil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 101, n. 2, p. 241-246, 1987.

KOCHIAN, L. V. Cellular mechanisms of aluminium resistance in plants. **Annual review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 46, p. 237-260, 1995.

LONERAGAN, J. F.; ASHER, C. J. Response of plants to phosphate concentration in solution culture. **Soil Science**, Baltimore, v. 103, n. 5, p. 311-3318, 1967.

LOPES, M. A.; MAGNAVACA, R.; BAHIA-FILHO, A. F. C.; GAMA, E. E. G. Avaliação de populações de milho e seus cruzamentos para tolerância a toxidez de alumínio em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 3, p. 257-263, Mar. 1987.

LYNCH, J. P.; BROWN, K. M. Ethylene and plant response to nutritional stress. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 100, n. 3, p. 613-619, July 1997.

LYNCH, J. P.; BROWN, K. M. Topsoil foraging: an architectural adaptation to low phosphorus availability. **Plant and Soil**, dordrecht, v. 237, n. 2, p. 225-237, Dec. 2001.

MACHADO, E. C.; PEREIRA, A. R. Eficiência de conversão e coeficiente de manutenção da planta inteira, das raízes e da parte aérea em milho e arroz submetidos ao estresse de alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 25, n. 6, p. 845-855, jun. 1990.

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. 362 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.

MACHADO, R. A. F. **Linhagens de milho contrastantes para tolerância à seca e eficiência de utilização de nitrogênio**. 2003. 90 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

MAGNAVACA, R. **Genetic variability and the inheritance of aluminium tolerance in maize (*Zea mays* L.)**. 1982. 135 p. Tese (Ph.D) – University of Nebraska, Lincoln.

MAGNAVACA, R.; BAHIA-FILHO, A. F. C. **Seleção de milho para tolerância ao alumínio**. Sete Lagoas: Embrapa-CNPMS, 1991. 30 p. Apostila.

MARION, G. M.; HENDRICKS, D. M.; DULL, G. R.; FULLER, W. H. Aluminium and silica solubility in soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 121, n. 1, p. 76-85, 1976.

MATSUMOTO, H.; HIRASAWA, F.; TORIKAI, H. Localization of absorbed aluminium in pea root and its binding to nucleic acid. **Plant Cell Physiology**, Kyoto, v. 17, p. 127-137, 1976.

MAZZOCATO, A. C.; ROCHA, P. S. G.; SERENO, M. J. C. M.; BOHNEN, H.; GRONCO, V.; NETO, J. F. B. Tolerância ao alumínio em plântulas de milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 1, p. 19-24, jan./mar. 2002.

MELLO, S. L. M. **Características do sistema radicular de povoamentos de eucaliptos, propagados por sementes e estacas**. 1997. 79 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

MILLER, C. R.; NIELSEN, K. L.; LYNCH, J. P.; D. Adventitious root response in field grown common bean: a possible adaptive strategy to low-phosphorus conditions. In: FLORES, H. E.; LYNCH, J. P.; EISENSTADT, D. (Ed.). **Advances and perspectives on the function of plant roots**. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 1998. p. 394-396.

NEWMAN, E. I. A method of estimating the total length of root in a sample. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 3, n. 1, p. 139-145, 1966.

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, Sep/Oct. 1978.

PANDEY, S.; CEBALHOS, H.; GRANADOS, G.; KNAPP, E. Developing maize that tolerates aluminium toxic soils. In: EDMONDS, G. E.; DEUSTCH, J. A. (Ed.). **Stress tolerance breeding: maize that resist insects, drought, low nitrogen and acid soils**. Mexico: Centro Internacional de Mejoramiento de Maiz y Trigo, 1994. 344 p.

PRATT, W. K. **Digital Image processing**. New York: J. Wiley, 1978. 750 p.

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

RAYN, P. R.; KOCHIAN, L. Interaction between aluminum toxicity and calcium uptake at the root apex in near-isogenic lines of wheat (*Triticum aestivum*) differing in aluminum tolerance. **Plant Physiology**, Rockville, v. 102, n. 3, p. 975-982, July 1993.

RHUE, R. D.; GROGAN, C. O. Screening corn for Al tolerance using different Ca and Mg concentration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 69, n. 5, p. 775-760, Sep./Oct. 1977.

ROWE, H. R.; PHILLIPS, D. A. An instrument for estimating the total length of root in a simple. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 11, n. 1, p. 309-314, 1974.

RUSSEL, C. A.; FILLERY, I. R. P. In situ ¹⁵N labeling of lupim below-ground biomass. **Australian Journal Agricultural Research**, Collingwood, v. 47, n. 7, p. 1035-1046, 1996.

SILVA, A. C. **Variações genéticas em candeia [*Eremanthus erythropapus* (DC.). Maclush]: simbiose e desenvolvimento radicular e estabelecimento inicial em áreas degradadas**. 2003. 133 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

STUTE, G. W.; STRYJEWSKI, E. C. Computer classification of roots from digitized video images. **HortScience**, Alexandria, v. 30, p. 906, 1995.

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

VASCONSELOS, A. C. M. O sistema radicular da cana-de-açúcar e a expressão do potencial de produção. **STAB**, Piracicaba, v. 21, n. 2, p. 20, nov./dez. 2002a.

VASCONSELOS, A. C. M. **Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea de soca de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: cana crua mecanizada e queimada manual**. 2002b. 140 p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal.

VIEIRA JÚNIOR, P. A.; DOURADO NETO, D.; CÍCERO, S. M. .; JORGE, L. A. C.; MANFRON, P. A.; MARTINS, T. N. Estimativa da área foliar em milho através de análise de imagens. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 5, n. 1, p. 58-66, jan./mar. 006.

VILELA, L.; ANGHINONI, I. Morfologia do sistema radicular e cinética da absorção de fósforo em cultivares de soja afetadas pela interação alumínio-fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 8, n. 1, p. 91-96, jan./abr. 1984.

VOSE, P. B. Rationale of selection for specific nutritional characteristics in crop improvement with *Phaseolus vulgaris* L. as a case study. **Plant and Soil**, The Hague, v72, n. 2/3, p351-364, 1983.

ZEIGLER, R. S.; PANDEY, S.; MILES, J.; GOURLEY, L. M. SARKARUNE, S. Advances the selection and breeding of acid tolerant plants: rice, maize, sorghum and tropical forages. In: DATE, R. A.; GRUNDON, N. J.; RAYMENT, G. E.; PROBERT, M. E. (Ed). **Plant-Soil interactions at low pH: principles and management**. Dordrecht: Klumer Academic, 1995. p. 391-406.

ZOON, F. C.; VAN TIENDEREN, P. H. A rapid quantitative measurement of root length and root branching by microcomputer image analysis. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 126, n. 2, p. 301-308, Aug. 1990.

CAPÍTULO 2

ATRIBUTOS MORFOLÓGICOS DE SISTEMA RADICULAR DE GENÓTIPOS DE MILHO CONTRASTANTES PARA TOLERÂNCIA À SECA EM RESPOSTA A ESTRESSE DE FÓSFORO

RESUMO

Este trabalho foi conduzido com o objetivo de avaliar atributos morfológicos de sistema radicular e características de crescimento de parte aérea e raízes de linhagens endogâmicas de milho pré-selecionadas para tolerância à seca do programa de melhoramento genético da Embrapa Milho e Sorgo. Foram utilizadas duas linhagens tolerantes (L1 e L3) e duas sensíveis à seca (L2 e L4), em canteiros experimentais preparados isoladamente para níveis diferenciados de fósforo baixo (4 mg.dm^{-3}) e alto (20 mg.dm^{-3}). O experimento foi implantado manualmente no espaçamento de 0,20 m entre plantas e 0,20 m entre linhas e as parcelas experimentais foram estabelecidas em $0,8 \text{ m}^2$ (quatro linhas de 1,2 m lineares e cinco plantas por metro linear). O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados repetidos três vezes. Foram realizadas três avaliações de morfologia de sistema radicular, com o auxílio do sistema de análise de imagens digitais *WinRHIZO Pro* (Régent Instruments Inc.) e de características de crescimento de raízes e parte aérea aos 14, 21 e 28 DAS (dias após a semeadura). Foram observadas diferenças significativas para atributos morfológicos de raízes a características de crescimento de raízes e parte aérea de genótipos de milho. De modo geral, as linhagens consideradas tolerantes à seca apresentaram sistema radicular diferenciado das linhagens sensíveis, por apresentarem maior comprimento total, área de superfície, volume e maior contribuição de raízes com diâmetro inferior a 0,5 mm no comprimento total das raízes de plantas desenvolvidas em condição de baixa disponibilidade de fósforo.

ABSTRACT

This work was carried out with the objective of evaluating morphological attributes of root system and growth characteristics of root and plant canopy of inbred lines selected for tolerance to drought from the maize breeding program belonging to Embrapa Maize and Sorghum. Two inbred lines tolerant (L1 and L3) and two sensitive (L2 and L4) to drought were seeded in seedling beds with different levels of phosphorus, low (4 mg. dm^{-3}) and high (20 mg. dm^{-3}). The experiment was seeded manually at space 0,20 m among plants and 0,20 m among lines. The experimental plots were established in $0,8 \text{ m}^2$ (four lines of 1.2 linear meters being five plants per linear meter). The experimental design used was randomized complete blocks, with three replications. There were three evaluations of root system morphology by using the digital images system, WinRhizo Pro (Regent Instruments Inc.) and as well as evaluations of roots and plant canopy at 14, 21, 28 (days after seeding). It was observed significant differences for root morphological attributes, root and canopy growth. In general the inbred lines considered tolerant to drought showed root system different from inbred lines sensitive to drought. Those tolerant resulted in a larger root length, surface area, volume, and greater contribution of roots with diameter less than 0.5 mm in plants grown in the condition of low phosphorus availability.

1 INTRODUÇÃO

A diversidade inter e intra-específica para absorção translocação, distribuição e uso do fósforo já foi observada para um grande número de culturas, dentre as quais o milho (Alves, 1988; Baker et al., 1970; Brown, 1974; Clark & Fox, 1978; Schenk & Barber, 1980). Segundo Machado (1999), a variabilidade genética representada por todo germoplasma de milho hoje disponível é imensa, sendo grandes os progressos obtidos pelo melhoramento genético da cultura, com o desenvolvimento de materiais adaptados às condições adversas de clima e solo.

Diferenças genotípicas na eficiência nutricional deste nutriente têm sido atribuídas a uma série de mecanismos que estão relacionados às características de absorção, translocação e utilização do nutriente pela planta, de forma isolada ou em conjunto (Brasil, 2003). As diferenças entre as plantas quanto à capacidade de absorver nutrientes são decorrentes, entre outras características, da variação na magnitude e na morfologia do sistema radicular (Anghinoni et al., 1989).

Embora a adaptação genética de germoplasma de milho em solos com baixa disponibilidade de P esteja associada com a morfologia do sistema radicular, a relação de atributos morfológicos e a eficiência de aquisição de P ainda são pouco entendidas, devido às dificuldades referentes a observação, análise e manipulação do sistema radicular (Brasil, 2003).

Em decorrência da complexidade da estrutura morfológica do sistema radicular das plantas e da sua plasticidade, expressa pela capacidade em alterar a sua configuração em função do ambiente físico, químico e biológico do solo a quantificação do sistema radicular como um todo ainda tem sido insatisfatória. Na maioria das vezes, a quantificação de atributos da morfologia da raiz tem

sido dificultada pelo grande volume de trabalho e pela variabilidade dos resultados obtidos.

Nesse sentido, os objetivos deste trabalho foram caracterizar a morfologia de sistema radicular, avaliar características de crescimento de parte aérea e raiz e utilizar a técnica de análise imagens digitais no estudo de sistema radicular de genótipos de milho contrastantes para tolerância à seca, em resposta a diferentes níveis de fósforo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado nos meses de novembro e dezembro de 2006, na Embrapa Milho e Sorgo, situada no município de Sete Lagoas, MG, localizada a 19° 28' de latitude S e longitude 44° 15' 08" W a 732 m. O clima da região, segundo Köopen, é do tipo Aw (clima de savana com inverno seco).

Foram avaliadas quatro linhagens, sendo duas delas tolerantes (L1 e L3) e duas sensíveis à seca (L2 e L4) com *background* genético e origens distintas, de propriedade do Programa de Melhoramento de Milho, visando tolerância à seca, da Embrapa Milho e Sorgo. Em canteiros experimentais preparados isoladamente para dois níveis diferenciados de fósforo baixo (4 mg.dm⁻³ de solo) e alto (20 mg.dm⁻³ de solo). Os canteiros apresentavam as seguintes características: 12,0 m de comprimento x 1,2 m de largura x 0,4 m de profundidade, sob telado de sombrite 50%, com solos tipo LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO textura média (LEm).

A variabilidade espacial dos canteiros, com relação à fertilidade, foi verificada por meio de análise de solos, como o descrito a seguir. As parcelas experimentais *canteiros* foram separadas em seis subparcelas de dois metros de comprimento, de onde foram retiradas seis amostras simples, que compuseram uma amostra composta de solo, as quais foram enviadas ao Laboratório de Fertilidade de Solos da Embrapa Milho e Sorgo para análise. Os resultados de análise química do solo, encontram-se na Tabela 2.

TABELA 1. Características químicas do solo (camada de 0-20).

Nível de P	pH (H ₂ O)	H+Al -----(cmol _c /dm ³)-----	Al	Ca	Mg	K (mg/dm ³)	P	SB (cmol _c /dm ³)	CTC	V -----(%)-----	m
Baixo P	6,21	4,18	0,18	4,09	0,76	84,00	4,58	5,07	9,24	54,66	3,87
Alto P	5,61	5,80	0,40	3,19	0,21	82,89	20,67	3,62	9,42	38,42	9,98

Os elementos meteorológicos referentes ao período de condução do experimento referem-se aos dados coletados na Estação Meteorológica da Embrapa Milho e Sorgo, situada a, aproximadamente, 1,5 km da área experimental.

O experimento foi implantado, manualmente, no dia 14/11/2006. Para o preparo dos sulcos de plantio, foi utilizado um rastelo de madeira cujas hastes eram espaçadas 0,20 m. A utilização deste implemento foi-se necessária para que as linhas de plantio fossem mais alinhadas possível, e também fosse mantida equidistância entre as plantas que compunham as parcelas experimentais. Procedendo dessa maneira foi possível obter um espaçamento de 0,20 m entre plantas e 0,20 m entre linhas de plantio.

As unidades experimentais foram estabelecidas em 0,8 m² (quatro linhas de 1,2 m lineares e cinco plantas por metro linear), correspondendo a 20 plantas por genótipo. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, repetidos três vezes.

As adubações de base e complementares, visando adequado suprimento de macro e micronutrientes, foram manejadas conforme protocolos para *Fenotipagem de Plantas visando Tolerância à Seca, em Sete Lagoas, MG* (Embrapa Milho e Sorgo, 2005. Não publicado).

Realizaram-se três avaliações de parte aérea e morfologia de sistema radicular, aos 14, 21 e 28 dias após a semeadura (DAS), procedendo-se da

seguinte maneira: em cada avaliação foram coletadas duas plantas por parcela, por repetição, totalizando seis plantas por genótipo por época de avaliação.

Foram coletadas plantas inteiras (sistema radicular e parte aérea) retirando-se blocos de solo, com o auxílio de uma espátula de metal. Este procedimento foi necessário para que fossem reduzidas ao máximo as perdas decorrentes das amostragens. Os blocos de solo contendo planta inteira (sistema radicular e parte aérea) foram transportados imediatamente para o Laboratório do Núcleo de Estresse Abiótico e relação solo-água-planta/Laboratório de Fisiologia Vegetal da Embrapa Milho e Sorgo, em sacos de papel devidamente identificados.

As amostras foram submergidas em bacias contendo água destilada, por 30 minutos. Este procedimento teve por objetivo facilitar o processo de lavagem das raízes, que foi realizado utilizando-se um jato de água, até que os sistemas radiculares das plântulas ficassem livres de partículas de solo (Figura 1). Para evitar perda de material durante esse procedimento, foi utilizado um conjunto de peneiras de 20 e 60 Mesh.

Após o processo de lavagem do sistema radicular, as plantas foram separadas em sistema radicular (SR) e parte aérea (PA), na altura do coleto. As raízes lavadas foram armazenadas em frascos contendo solução de etanol 70%, para evitar sua desidratação.



FIGURA 1. Raízes de genótipos de milho após o processo de lavagem.

Características avaliadas

- a) Matéria seca de parte aérea: após as pesagens da parte aérea (colmo e folhas), o material foi armazenado em sacos de papel e transportado para uma estufa de circulação forçada de ar a 72°C até obtenção de massa constante. Após a secagem, o material vegetal foi pesado para determinação de sua matéria seca.
- b) Matéria seca de raízes: após a determinação das características morfológicas de raiz, o material foi armazenado em sacos de papel e transportado para uma estufa de circulação forçada de ar, a 72°C, até que fosse atingida massa constante. Após a secagem, o material vegetal foi pesado, para a determinação da matéria seca.

c) Determinação da morfologia do sistema radicular: utilizou-se o sistema *WinRHIZO Pro 2007a* (Régent Instr. Inc.), acoplado a um *scanner* profissional *Epson XL 10000* equipado com unidade de luz adicional (TPU). Utilizou-se definição de 400 (dpi) para as medidas de morfologia de raiz, como descrito por Bauhus & Christian (1999), Bouma et al. (2000) e Costa et al. (2002).

As raízes foram dispostas em uma cuba de acrílico de 20 cm de largura por 30 cm de comprimento, contendo, aproximadamente, 1 cm de água (Figura 2). A utilização deste acessório permitiu a obtenção de imagens em três dimensões, evitando também a sobreposição das raízes; as leituras foram realizadas em seis plantas por genótipo por época.

As análises foram realizadas imediatamente após a obtenção das imagens e armazenadas como arquivos TIFF para posterior acesso por meio da planilha excel *XLRhizo* integrada ao sistema. Determinaram-se as seguintes características de raiz: comprimento total de raiz (cm), área de superfície de raiz (cm²), volume de raiz (cm³), diâmetro médio de raiz (mm) e comprimento de raiz por classe de diâmetro (cm). As raízes foram classificadas segundo três classes de diâmetro, como descrito a seguir: raízes muito finas (\emptyset inferior a 0,5 mm), raízes finas ($> 0,5 \emptyset < 2,0$ mm) e raízes grossas ($\emptyset > 2,0$ mm). A definição destas classes foi baseada no critério de classificação de raízes proposto por Bhom (1979).

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (teste de F) e efetuou-se a comparação entre as médias dos tratamentos pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

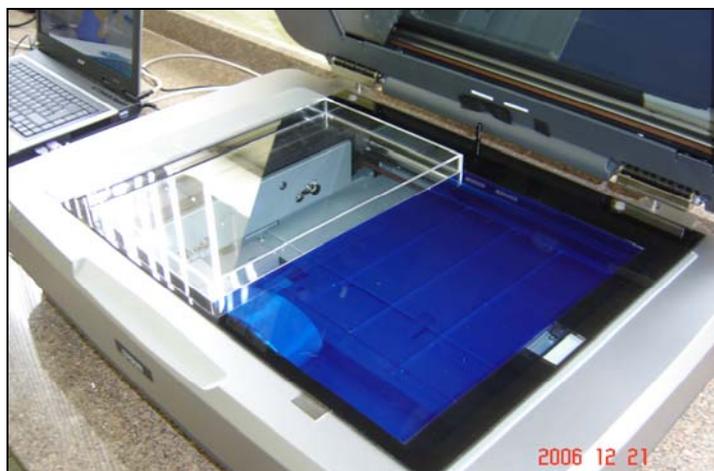


FIGURA 2. Scanner profissional *Epson XL 10000* equipado com cuba de acrílico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Elementos meteorológicos

Os valores obtidos da temperatura média e precipitação durante o período de condução do experimento estão apresentados na (Figura 3). A temperatura média neste período foi de 22,0°C, tendo as amplitudes para a máxima e mínima sido de 24,4° a 32,6°C e de 14,5 a 20,8°C, respectivamente. A umidade relativa média foi de 80,0% e sua amplitude de 64,0% a 94,8%.

Segundo Machado (2003), a temperatura afeta o desenvolvimento da cultura, desde a germinação até o enchimento de grãos. Temperaturas entre 25° a 30°C propiciam melhores condições para germinação e emergência das plântulas. Segundo este autor, temperaturas médias diárias acima de 26°C causam aceleração das fases fenológicas e temperaturas médias diárias inferiores a 15°C podem retardar estes processos. Observa-se também, pela Figura 3, que houve boa disponibilidade hídrica (413,4 mm acumulados), durante a condução do experimento. De acordo com Magalhães et al. (2002) o milho desenvolve-se em regiões cuja precipitação varia entre 300 e 5.000 mm, não havendo, portanto, restrição hídrica durante a condução do experimento.

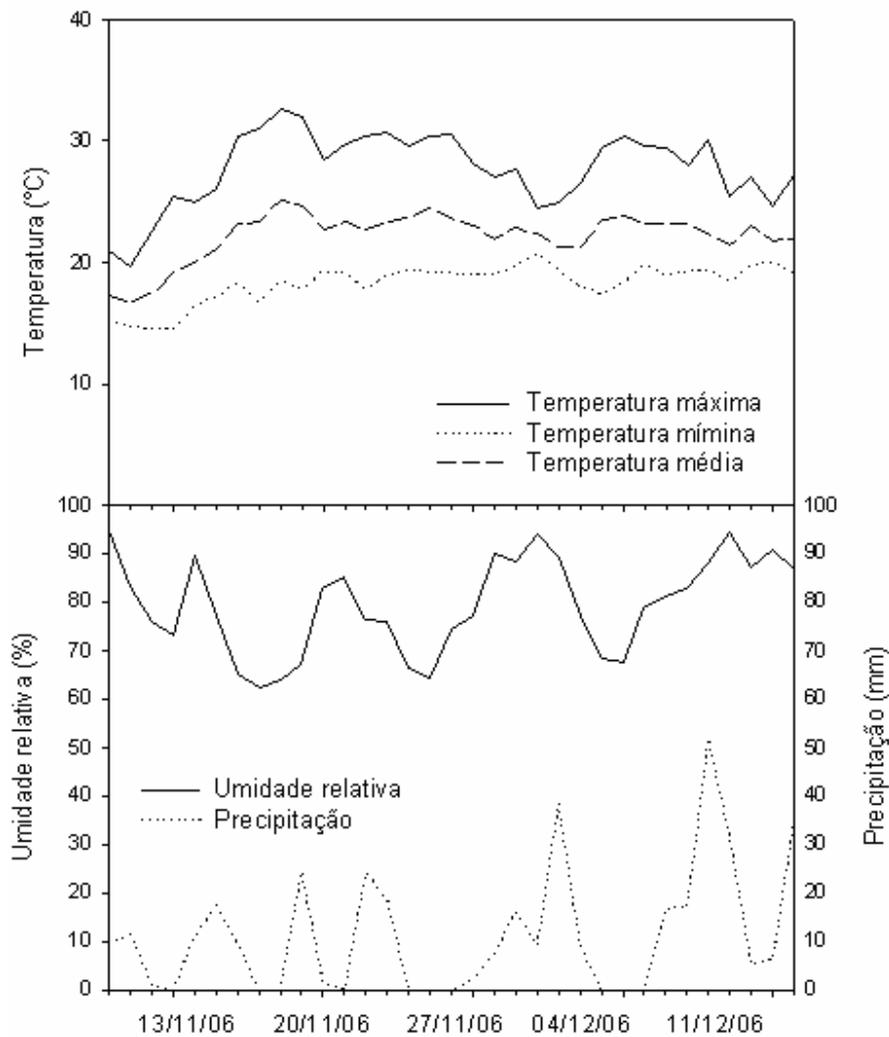


FIGURA 3. Temperatura média diária, temperatura máxima e mínima, precipitação total diária e umidade relativa média diária, durante o período experimental (10/11 a 12/12/2006).

3.2 Produção de matéria seca

A produção de matéria seca da raiz (MSR), matéria seca de parte aérea (MSPA), matéria seca total (MST) e a razão entre matéria seca de raiz (R) e

parte aérea (PA) (R/PA), não apresentaram diferenças significativas entre níveis de fósforo (P) e genótipos, aos 14 DAS (dias após a semeadura) (Tabela 2). A interação genótipos x níveis de P não foi significativa, indicando que o efeito de P foi independente dos genótipos estudados. Resultados significativos foram observados aos 21 DAS, as características MSR e MST apresentaram diferenças entre genótipos, de modo geral, a linhagem tolerante à seca L1 e as linhagens sensíveis L2 e L4 apresentaram resultados superiores à linhagem L3 tolerante à seca (Tabela 3). A produção de MST diferiu de forma significativa, entre genótipos e níveis de P. Observa-se, pela Tabela 3 que, em condição de baixa disponibilidade de fósforo houve maior acúmulo de MST. Aos 28 DAS não houve diferenças significativas entre genótipos e níveis de P para as características avaliadas (Tabela 4).

Observa-se, pelas Tabelas 2, 3, e 4, que houve aumento nos valores obtidos para a característica razão (R/PA), porém, não ocorreram diferenças significativas entre os níveis de P, nas diferentes épocas de avaliação. No entanto, os ganhos obtidos de matéria seca foram mais pronunciados no sistema radicular do que na parte aérea, contribuindo, desta maneira, para os maiores valores da característica (R/PA). Considerando esta característica, a interação nível de P x genótipos foi significativa aos 28 DAS, sugerindo que o efeito dos níveis de P foi dependente dos genótipos estudados e da época de avaliação (Tabela 4).

Estes resultados assemelham-se aos obtidos por Brasil (2003). De acordo com este autor, vários estudos têm demonstrado essa tendência de aumento da razão MS R/PA para diversas espécies, sob condições de deficiência de P (Alves et al., 1988; Halsted & Lynch, 1996; Haynes & Ludecke, 1981). Esse mesmo autor, trabalhando com híbridos e linhagens contrastantes para uso e eficiência de utilização de P, verificou diferenças significativas para a produção de matéria seca de raiz e total para a média de seus tratamentos. O

mesmo foi observado para interação genótipos x níveis de P, demonstrando que essa característica é modificada em função dos genótipos estudados e da época de avaliação.

De acordo com Clarkson et al. (1985), alguns nutrientes limitam o crescimento das plantas, especialmente o N e o P, ocorrendo modificações nas relações fonte-dreno, tornando-se as raízes os drenos preferenciais e os produtos da fotossíntese são voltados para promover a formação e o desenvolvimento do sistema radicular, visando aumentar a área de absorção de nutrientes, o que poderia explicar o aumento na produção de MSR.

Estas informações são importantes, pois sendo um dos objetivos deste trabalho a obtenção de protocolos que possibilite o *screening* precoce de materiais para eficiência na utilização de P. Estes resultados vêm reforçar a hipótese de que os efeitos primários decorrentes da deficiência de P em plantas estão relacionados às características da raiz, que incluem modificações na arquitetura radicular (Nielsen et al., 1998; Hinsinger, 2001; Lynch & Brown, 2001), no padrão de ramificação (Bates & Lynch, 1996; Borch et al., 1999; López-Bacio et al., 2002), no crescimento total de raízes e no alongamento de pêlos radiculares (Bates & Lynch, 1996; Lynch, 1995; Lynch, 1998; López-Bacio et al., 2002).

TABELA 2. Produção de matéria seca da raiz, parte aérea, total e razão matéria seca de raiz/parte aérea de genótipos de milho, em resposta a níveis baixo (4 mg.dm^{-3}) e alto (20 mg.dm^{-3}) de P, aos 14 DAS.

Genótipos	Nível de P		Média
	Baixo	Alto	
14 DAS			
*Matéria seca de raiz (g planta^{-1})			
L1 (T)	5,71 a	6,51 a	6,11 a
L2 (S)	6,90 a	6,61 a	6,76 a
L3 (T)	5,25 a	6,28 a	5,77 a
L4 (S)	7,24 a	7,53 a	7,39 a
Média	6,28 A	6,73 A	
*Matéria seca de parte aérea (g planta^{-1})			
L1 (T)	8,86 a	9,52 a	9,19 a
L2 (S)	8,94 a	9,58 a	9,26 a
L3 (T)	8,17 a	8,82 a	8,49 a
L4 (S)	8,86 a	8,82 a	8,84 a
Média	8,70 A	9,19 A	
*Matéria seca total (g planta^{-1})			
L1 (T)	14,57 a	16,03 a	15,30 a
L2 (S)	15,84 a	16,19 a	16,02 a
L3 (T)	13,42 a	15,10 a	15,10 a
L4 (S)	16,11 a	16,36 a	16,23 a
Média	14,99 A	15,92 A	
*Razão matéria seca de raiz/parte aérea			
L1 (T)	0,64 a	0,69 a	0,66 a
L2 (S)	0,76 a	0,69 a	0,73 a
L3 (T)	0,64 a	0,71 a	0,67 a
L4 (S)	0,81 a	0,85 a	0,83 a
Média	0,72 A	0,74 A	

* Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente, pelo teste de Scott-Knott, a 5%, S – sensível à seca, T – tolerante à seca, ^{ns} – não significativo.

TABELA 3. Produção de matéria seca da raiz, parte aérea, total e razão matéria seca de raiz/parte aérea de genótipos de milho, em resposta a níveis baixo (4 mg.dm⁻³) e alto (20 mg.dm⁻³) de P, aos 21 DAS.

Genótipos	Nível de P		Média
	Baixo	Alto	
21 DAS			
*Matéria seca de raiz (g planta ⁻¹)			
L1 (T)	7,58 b	6,45 b	7,01 b
L2 (S)	6,89 b	8,28 b	7,58 b
L3 (T)	5,87 a	5,51 a	5,69 a
L4 (S)	8,30 b	6,93 b	7,62 b
Média	7,16 A	6,80 A	
*Matéria seca de parte aérea (g planta ⁻¹)			
L1 (T)	9,33 a	8,05 a	8,69 a
L2 (S)	9,02 a	9,30 a	9,16 a
L3 (T)	8,24 a	8,15 a	8,20 a
L4 (S)	9,67 a	8,48 a	9,07 a
Média	9,07 A	8,50 A	
*Matéria seca total (g planta ⁻¹)			
L1 (T)	16,91 b	14,51 b	15,71 b
L2 (S)	15,91 b	17,58 b	16,75 b
L3 (T)	14,11 a	13,66 a	13,89 a
L4 (S)	17,97 b	15,42 b	16,70 b
Média	16,20 B	15,30 A	
*Razão matéria seca de raiz/parte aérea			
L1 (T)	0,81 a	0,80 a	0,80 a
L2 (S)	0,76 a	0,89 a	0,83 a
L3 (T)	0,71 a	0,68 a	0,69 a
L4 (S)	0,86 a	0,81 a	0,84 a
Média	0,79 A	0,80 A	

* Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente, pelo teste de Scott-Knott, a 5%, S – sensível à seca, T – tolerante à seca, ^{ns} – não significativo.

TABELA 4. Produção de matéria seca da raiz, parte aérea, total e razão matéria seca de raiz/parte aérea de genótipos de milho, em resposta a níveis baixo (4 mg.dm^{-3}) e alto (20 mg.dm^{-3}) de P, aos 28 DAS.

Genótipos	Nível de P		Média
	Baixo	Alto	
28 DAS			
*Matéria seca de raiz (g planta^{-1})			
L1 (T)	11,09 a	7,37 a	9,23 a
L2 (S)	5,85 a	9,07 a	7,46 a
L3 (T)	7,98 a	9,83 a	8,72 a
L4 (S)	8,67 a	9,17 a	8,92 a
Média	8,36 A	8,86 A	
*Matéria seca de parte aérea (g planta^{-1})			
L1 (T)	10,16 a	9,93 a	10,04 a
L2 (S)	9,20 a	10,35 a	9,78 a
L3 (T)	9,60 a	7,92 a	8,93 a
L4 (S)	10,68 a	9,77 a	10,23 a
Média	9,91 A	9,49 A	
*Matéria seca total (g planta^{-1})			
L1 (T)	21,26 a	17,31 a	19,28 a
L2 (S)	19,43 a	19,43 a	17,24 a
L3 (T)	17,59 a	17,76 a	17,66 a
L4 (S)	19,36 a	18,95 a	19,15 a
Média	19,41 A	18,36 A	
*Razão matéria seca de raiz/parte aérea			
L1 (T)	1,09 a	0,74 a	---
L2 (S)	0,64 a	0,87 a	---
L3 (T)	0,83 a	1,24 b	---
L4 (S)	0,81 a	0,94 a	---
Média	0,84 A	0,93 A	

* Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente pelo teste de Scott-Knott, a 5%, S – sensível à seca, T – tolerante à seca, ns – não significativo.

3.3 Atributos morfológicos da raiz

3.3.1 Comprimento total, área de superfície, diâmetro médio e volume de raiz

As características comprimento total (CTR), área de superfície (ASR), diâmetro médio (DMR) e volume de raiz (VR) não apresentaram diferenças significativas entre genótipos submetidos a estresse de P, aos 14 DAS. No entanto, houve diferença significativa entre genótipos, considerando plantas desenvolvidas no maior nível de P. Em geral, as linhagens tolerantes à seca L1 e L3 apresentaram os maiores valores de CTR, ASR e VR, em comparação com as linhagens sensíveis (Tabela 5).

Uma possível explicação para estes resultados está no fato de que, aos 14 DAS, as plântulas ainda estão sendo nutridas por reservas de P, oriundas do endosperma das sementes; isso fica mais evidente pelos resultados observados aos 21 DAS (Tabela 6). As linhagens tolerantes à seca L1 e L3 apresentaram os maiores valores para as características CTR, ASR e VR. Esses resultados seriam um indício de que essas linhagens são mais eficientes na aquisição de nutrientes, pois plantas com maior sistema radicular teriam maior capacidade de absorver nutrientes pouco móveis, no solo como é o caso do P.

As características de sistema radicular em resposta à baixa disponibilidade de P não diferiram significativamente entre genótipos, aos 28 DAS (Tabela 7). No entanto, na média dos genótipos, os efeitos foram significativos para as características ASR e VR. Em geral, as linhagens L1 e L3 tolerantes à seca e a linhagem sensível L2 apresentaram resultados superiores ao da linhagem sensível L4.

Estes resultados assemelham-se aos obtidos por Lynch (1995) e Schachtman et al. (1998) que consideram a área de superfície e o comprimento de raízes as principais características de sistema radicular responsáveis pela

eficiência na utilização de P, devido ao fato deste nutriente apresentar baixa mobilidade no solo e ser transportado via difusão (Horst et al., 2001). Pois, ao absorver este nutriente, a planta está contribuindo para a heterogeneidade espacial, o que dificulta, posteriormente, a sua absorção (Lynch & Brown, 2001).

No entanto, Kramer (1983) descreve que a capacidade do sistema radicular em absorver água e nutrientes não tem relação direta com o aumento do comprimento ou área de superfície de raiz, pois, enquanto novas raízes com alta capacidade de absorção estão sendo produzidas, raízes mais velhas tornam-se menos permeáveis. De acordo com Hopkins (1995), as modificações anatômicas que ocorrem durante a maturidade dos tecidos, por suberização, cutinização, formação de tecidos secundários, entre outros, que determinarão o padrão de absorção pelas partes mais velhas da raiz.

O aumento das características de sistema radicular em resposta à baixa disponibilidade de P tem sido observado, frequentemente, para várias espécies vegetais (Alves et al., 1988; Föhse et al., 1988; Machado et al., 2001) e vem reforçar a hipótese de que as raízes tornam-se drenos preferenciais de fotoassimilados quando alguns nutrientes são fatores limitantes para o crescimento das plantas, principalmente P e N. Essa pode ser uma estratégia de adaptação desenvolvida para aumentar a eficiência de absorção quando há limitação desses nutrientes (Föhse et al., 1988; Horst et al., 2001).

Segundo Parentoni et al. (1999), genótipos de milho ineficientes para a utilização de P quando cultivados em solução nutritiva com omissão desse elemento não apresentaram diferenças quanto à morfologia do sistema radicular, enquanto que os eficientes aumentaram a massa e o comprimento de raízes em baixa disponibilidade de P.

É interessante destacar que os estudos de sistemas radiculares em condições de campo apresentam algumas limitações que, muitas vezes, podem

manifestar em altos coeficientes de variação. Isso foi particularmente observado por Pagotto (2001), em estudo com gramíneas tropicais em condições de campo. Dessa forma, o estudo de raiz por meio da análise de imagens digitais, torna-se uma metodologia promissora, pois permitiu discriminar o crescimento diferencial de sistema radicular de genótipos de milho em fase precoce do desenvolvimento, e com baixos coeficientes de variação na média inferiores a 30%.

TABELA 5. Comprimento total, área de superfície, diâmetro e volume médio de raiz de genótipos de milho, em resposta a níveis baixo (4 mg.dm⁻³) e alto (20 mg.dm⁻³) de P, aos 14 DAS.

Genótipos	Nível de P		Média
	Baixo	Alto	
14 DAS			
*Comprimento total de raiz (cm.planta ⁻¹)			
L1 (T)	477,04 a	548,43 b	512,73 b
L2 (S)	339,00 a	339,87 a	339,43 a
L3 (T)	378,32 a	451,01 b	414,66 b
L4 (S)	275,71 a	548,43 a	293,80 a
Média	367,51 A	471,93 A	
*Área de superfície de raiz (cm ² .planta ⁻¹)			
L1 (T)	58,40 a	66,12 b	62,26 b
L2 (S)	43,21 a	42,14 a	42,67 a
L3 (T)	52,32 a	59,65 b	55,99 b
L4 (S)	35,44 a	38,22 a	36,83 a
Média	43,34 A	51,53 A	
*Diâmetro médio de raiz (mm.planta ⁻¹)			
L1 (T)	0,39 a	0,51 a	0,45 a
L2 (S)	0,40 a	0,39 a	0,39 a
L3 (T)	0,43 a	0,41 a	0,42 a
L4 (S)	0,41 a	0,39 a	0,40 a
Média	0,40 A	0,43 A	
*Volume de raiz (cm ³ .planta ⁻¹)			
L1 (T)	0,57 a	0,63 b	0,60 b
L2 (S)	0,44 a	0,41 a	0,42 a
L3 (T)	0,57 a	0,63 b	0,60 b
L4 (S)	0,36 a	0,37 a	0,37 a
Média	0,48 A	0,51 A	

* Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente, pelo teste de Scott-Knott, a de 5%, S – sensível à seca, T – tolerante à seca, ^{ns} – não significativo.

TABELA 6. Comprimento total, área de superfície, diâmetro e volume médio de raiz de genótipos de milho, em resposta a níveis baixo (4 mg.dm⁻³) e alto (20 mg.dm⁻³) de P, aos 21 DAS.

Genótipos	Nível de P		Média
	Baixo	Alto	
21 DAS			
*Comprimento total de raiz (cm.planta ⁻¹)			
L1 (T)	544,22 b	611,40 a	577,81 b
L2 (S)	365,21 a	276,50 a	320,85 a
L3 (T)	672,84 b	493,55 a	583,20 b
L4 (S)	367,48 a	445,69 a	406,59 a
Média	553,98 A	456,78 A	
*Área de superfície de raiz (cm ² .planta ⁻¹)			
L1 (T)	70,34 a	83,36 a	76,85 b
L2 (S)	53,64 a	40,79 a	47,21 a
L3 (T)	92,92 b	71,21 a	82,06 b
L4 (S)	50,00 a	63,88 a	56,94 a
Média	66,73 A	64,80 A	
*Diâmetro médio de raiz (mm.planta ⁻¹)			
L1 (T)	0,41 a	0,43 a	0,42 a
L2 (S)	0,46 a	0,46 a	0,46 a
L3 (T)	0,44 a	0,47 a	0,46 a
L4 (S)	0,43 a	0,44 a	0,44 a
Média	0,44 A	0,45 A	
*Volume de raiz (cm ³ .planta ⁻¹)			
L1 (T)	0,72 a	0,91 a	0,82 b
L2 (S)	0,63 a	0,48 a	0,55 a
L3 (T)	1,02 b	0,82 a	0,93 b
L4 (S)	0,54 a	0,73 a	0,63 a
Média	0,73 A	0,74 A	

* Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente, pelo teste de Scott-Knott, a 5%, S – sensível à seca, T – tolerante à seca, ^{ns} – não significativo.

TABELA 7. Comprimento total, área de superfície, diâmetro e volume médio de raízes de genótipos de milho, em resposta a níveis baixo (4 mg.dm⁻³) e alto (20 mg.dm⁻³) de P, aos 28 DAS.

Genótipos	Nível de P		Média
	Baixo	Alto	
28 DAS			
*Comprimento total de raiz (cm.planta ⁻¹)			
L1 (T)	560,50 a	1000,71 a	780,60 a
L2 (S)	519,07 a	665,84 a	592,46 a
L3 (T)	739,63 a	684,73 a	712,17 a
L4 (S)	396,74 a	500,44 a	448,59 a
Média	553,98 A	712,93 A	
*Área de superfície de raiz (cm ² .planta ⁻¹)			
L1 (T)	69,95 a	129,34 a	99,65 b
L2 (S)	69,96 a	94,73 a	82,34 b
L3 (T)	101,89 a	92,79 a	97,34 b
L4 (S)	51,28 a	67,92 a	59,60 a
Média	73,27 A	96,16 B	
*Diâmetro médio de raiz (mm.planta ⁻¹)			
L1 (T)	0,41 a	0,41 a	0,41 a
L2 (S)	0,44 a	0,44 a	0,44 a
L3 (T)	0,43 a	0,43 a	0,43 a
L4 (S)	0,41 a	0,43 a	0,42 a
Média	0,42 A	0,43 a	
*Volume de raiz (cm ³ .planta ⁻¹)			
L1 (T)	0,70 a	1,34 a	1,02 b
L2 (S)	0,75 a	1,09 a	0,92 b
L3 (T)	1,12 a	1,00 a	1,06 b
L4 (S)	0,52 a	0,73 a	0,63 a
Média	0,77 A	1,04 B	

* Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente, pelo teste de Scott-Knott, a 5%, S – sensível à seca, T – tolerante à seca, ^{ns} – não significativo.

3.3.2 Comprimento de raízes por classe de diâmetro

A utilização do sistema análises de imagens digitais *WinRhizo* permitiu a classificação do comprimento do sistema radicular, em função de suas classes de diâmetro.

Diferenças entre o comprimento de raízes muito finas, finas e grossas foram observadas a partir dos 14 DAS. Nesta avaliação, a interação genótipos x níveis de P foi significativa para a característica raízes muito finas, indicando que o efeito de níveis de P foi dependente dos genótipos estudados e da época de avaliação (Tabela 8).

De modo geral, as linhagens tolerantes à seca L1 e L3 apresentaram os maiores comprimentos de raízes aos 21 DAS, nas classes de diâmetro muito finas e finas (Tabela 9). Aos 28 DAS, houve diferença significativa somente para raízes classificadas como finas em resposta à baixa disponibilidade de P, tendo a L3 tolerante à seca se destacado das demais (Tabela 10). Na média, as linhagens tolerantes à seca L1 e L3 e a linhagem sensível L2 apresentaram resultados superiores aos apresentados pela L4 sensível à seca. O comportamento diferencial apresentado pelos genótipos tolerantes à seca pode ser um indício de que esses materiais são mais eficientes na aquisição de P, pois, plantas com sistema radicular composto por raízes com menor diâmetro médio possuem maior área de superfície, que poderia aumentar a absorção de nutrientes pouco móveis no solo como o P.

Roselem et al. (1994) observaram que um genótipo de milho com alta eficiência na aquisição e utilização de nutrientes do solo apresentou maior proporção de raízes finas. Schenk & Barber (1980) sugerem que a formação de raízes mais finas e longas seria um mecanismo utilizado pelas plantas para aumentar a área superfície de absorção de nutrientes.

De acordo com Nielsen & Barber (1978), juntamente com a melhoria nas características de absorção, sistemas radiculares mais finos possuem

geometria mais favorável à absorção de nutrientes pouco móveis no solo. Clarkson & Hanson (1980) consideram que, de maneira geral, um sistema radicular com maior número de ramificações e com raízes com menor diâmetro seria mais efetivo na absorção de nutrientes.

Costa et al. (2002), ao trabalharem com três diferentes genótipos de milho contrastantes para características de arquitetura de parte aérea e morfologia de sistema radicular, observaram que a maior contribuição para o comprimento total do sistema radicular foi devido a raízes com classes de diâmetro entre 0,2 a 0,4 mm. Estes resultados estão de acordo com os já relatados para a cultura do milho. Pallant et al. (1993) observaram que 70% das raízes são pertencentes à classe de raízes muito finas (diâmetro inferior a 0,5 mm).

A maior contribuição no comprimento total de raízes com diâmetro inferior a 0,5 mm, para uma mesma massa, associado à melhoria de características da cinética de absorção, tem sido citada como estratégia utilizada pelas plantas, em condição de baixo suprimento de P, possibilitando o aumento da área de superfície de raiz e favorecendo o aumento da eficiência de absorção de nutrientes pouco móveis no solo como no caso do P (Brasil, 2003).

TABELA 8. Comprimento de raiz por classes de diâmetro, muito finas (\emptyset inferior a 0,5 mm), raízes finas ($> 0,5 \emptyset < 2,0$ mm), raízes grossas ($\emptyset > 2,0$ mm) de genótipos de milho, em resposta a níveis baixo (4 mg.dm^{-3}) e alto (20 mg.dm^{-3}) de P, aos 14 DAS.

Genótipos	Nível de P		Média
	Baixo	Alto	
14 DAS			
*Raízes muito finas (cm.planta ⁻¹)			
L1 (T)	378,75 b	324,34 b	---
L2 (S)	180,39 a	251,94 a	---
L3 (T)	175,23 a	337,33 b	---
L4 (S)	209,01 a	232,07 a	---
Média	235,84 A	286,42 B	
*Raízes finas (cm.planta ⁻¹)			
L1 (T)	94,39 a	90,50 a	92,44 a
L2 (S)	84,41 a	85,76 a	85,09 a
L3 (T)	99,24 a	110,71 a	104,98 a
L4 (S)	63,47 a	77,91 a	70,69 a
Média	85,32 A	91,22 A	
*Raízes grossas (cm.planta ⁻¹)			
L1 (T)	3,49 a	2,56 b	3,03 b
L2 (S)	2,22 a	1,70 a	1,96 a
L3 (T)	3,47 a	2,56 b	3,30 b
L4 (S)	3,01 a	1,41 a	1,41 a
Média	3,04 B	2,05 A	

* Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente, pelo teste de Scott-Knott, a 5%, S – sensível à seca, T – tolerante à seca, ^{ns} – não significativo.

TABELA 9. Comprimento de raiz por classes de diâmetro, raízes muito finas (\emptyset inferior a 0,5 mm), raízes finas ($> 0,5 \emptyset < 2,0$ mm), raízes grossas ($\emptyset > 2,0$ mm) de genótipos de milho, em resposta a níveis baixo (4 mg.dm³) e alto (20 mg.dm³) de P, aos 21 DAS.

Genótipos	Nível de P		Média
	Baixo	Alto	
21 DAS			
*Raízes muito finas (cm.planta ⁻¹)			
L1 (T)	409,70 b	457,14 b	433,42 b
L2 (S)	243,07 a	174,83 a	208,95 a
L3 (T)	482,66 b	347,50 b	415,08 b
L4 (S)	271,52 a	330,18 b	300,85 a
Média	351,73 A	327,41 A	
*Raízes finas (cm.planta ⁻¹)			
L1 (T)	129,30 a	147,82 a	138,56 b
L2 (S)	117,55 a	98,55 a	108,05 a
L3 (T)	184,10 b	141,18 a	162,64 b
L4 (S)	91,94 a	110,09 a	101,01 a
Média	124,50 A	124,27 A	
*Raízes grossas (cm.planta ⁻¹)			
L1 (T)	4,82 a	5,84 a	5,33 a
L2 (S)	4,06 a	2,82 a	3,44 a
L3 (T)	5,35 a	3,90 a	4,62 a
L4 (S)	3,64 a	5,09 a	4,37 a
Média	4,46 A	4,41 A	

* Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente, pelo teste de Scott-Knott, a 5%, S – sensível à seca, T – tolerante à seca, ^{ns} – não significativo.

TABELA 10. Comprimento de raiz por classes de diâmetro, raízes muito finas (\varnothing inferior a 0,5 mm), raízes finas ($> 0,5 \varnothing < 2,0$ mm), raízes grossas ($\varnothing > 2,0$ mm) de genótipos de milho, em resposta a níveis baixo (4 mg.dm^3) e alto (20 mg.dm^3) de P, aos 28 DAS.

Genótipos	Nível de P		Média
	Baixo	Alto	
28 DAS			
*Raízes muito finas (cm.planta ⁻¹)			
L1 (T)	432,71 a	768,95 b	600,00 a
L2 (S)	372,19 a	467,36 a	419,78 a
L3 (T)	521,72 a	492,01 a	492,01 a
L4 (S)	296,50 a	370,15 a	370,15 a
Média	405,78 A	544,61 A	
*Raízes finas (cm.planta ⁻¹)			
L1 (T)	122,07 a	222,97 a	172,52 b
L2 (S)	142,85 a	192,25 a	167,55 b
L3 (T)	211,88 b	187,08 a	199,48 b
L4 (S)	96,82 a	125,39 a	110,10 a
Média	143,40 A	181,92 B	
*Raízes grossas (cm.planta ⁻¹)			
L1 (T)	5,11 a	7,88 a	6,50 a
L2 (S)	3,47 ^a	5,47 a	4,47 a
L3 (T)	5,06 a	4,84 a	4,95 a
L4 (S)	3,02 a	4,22 a	3,62 a
Média	4,16 A	5,60 A	

* Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente, pelo teste de Scott-Knott, a 5%, S – sensível à seca, T – tolerante à seca, ^{ns} – não significativo.

4 CONCLUSÕES

Genótipos de milho tolerantes e sensíveis à seca, cultivados em diferentes níveis de P, apresentaram alterações em atributos morfológicos de raiz e características de crescimento de raízes e parte aérea. Em geral, as linhagens pré-selecionadas para tolerância à seca apresentaram sistemas radiculares mais desenvolvidos em relação às linhagens sensíveis, indicando que estes materiais, quando selecionados para eficiência no uso da água, são indiretamente selecionados para eficiência na utilização de P.

A técnica de análise de imagens digitais de sistemas radiculares permitiu discriminar genótipos de milho contrastantes para tolerância à seca, em resposta a níveis diferenciados de P, tendo, aos 21 DAS, sido observados os resultados mais significativos.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, V. M. C.; VASCONSELOS, C. A.; PITTA, G. V. E.; MAGNAVACA, R. Seleção de genótipos de milho para eficiência a fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 23, n. 10, p. 1083-1090, out. 1988.

ANGHINONI, I.; VOLKART, C. R.; FATTORE, N.; RENANI, P. R. Morfologia de raízes e cinética de absorção de nutrientes em diversas espécies e genótipos de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v. 13, n. 3, p. 355-361, set./dez. 1989.

BAKER, D. E.; JARRE, A. E.; MARSHALL, L. E.; THOMAS, N. I. 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.

BATES, T.; LYNCH, J. P. Stimulation of root hair elongation in *Arabidopsis thaliana* by low phosphorus availability. **Plant Cell and Environment**, Oxford, v. 19, n. 5, p. 529-538, June 1996.

BAUHUS, J.; CHRISTIAN MESSIER. Evaluation of Fine Root Length and Diameter Measurements Obtained Using WinRhizo Image Analysis. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, n. 1, p. 142-147, Jan./Feb. 1999.

BOHM, W. **Methods of studying root systems**. New York: Springer-Verlag, 1979. 189 p.

BORCH, K.; BOUMA, T. J.; LYNCH, J. P.; BROWN, K. M. Ethylene: Aregulator of root architecture response to soil phosphorus availability. **Plant Cell and Environment**, Oxford, v. 22, n. 4, p. 425-431, Apr. 1999.

BOUMA, T. J.; NIELSON, K. L.; KOUTSTAAL, B. A. S. Sample preparation and scanning protocol for computerised analysis of root length and diameter. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 218, p. 185-196, 2000.

BRASIL, E. C. **Mecanismos envolvidos na eficiência de aquisição de fósforo em genótipos de milho**. 2003. 161 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

- CLARK, R. B.; BROWN, J. C. Differential mineral uptake by maize inbreds. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 5, p. 213-227, 1974.
- CLARKSON, D. T. Factors affecting mineral nutrient acquisition by plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 36, p. 77-115, 1985.
- CLARKSON, D. T.; HANSON, J. B. The mineral nutrition of higher plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 3, p. 239-298, 1980.
- COSTA, C.; DWYER, L. M.; ZHOU, X.; DUTILLEUL, P.; HAMEL, C.; REID, L. M.; SMITH, D. L. Root morphology of contrasting maize genotypes. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, n. 1, p. 96-101, Jan./Feb. 2002.
- 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.
- FÖHSE, D.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Phosphorus efficiency of plants. I External and internal P requirement and uptake efficiency of different plants species. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 110, n. 1, p. 101-109, Aug. 1988.
- HALSTED, M.; LYNCH, J. Phosphorus responses of C3 and C4 species. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 47, n. 297, p. 497-505, Apr. 1996.
- HAYNES, R. J.; LUDECKE, T. E. Yield, root morphology and chemical composition of two pasture legumes as affected by lime and phosphorus application to an acid soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 62, n. 2, p. 241-254, 1981.
- HINSINGER, P. How do plant roots acquire minerals nutrients? Chemical process involved in the rhizosphere. **Advances in Agronomy**, New York, v. 64, p. 225-265, 1998.
- HORST, W. J.; KAMH, M.; JIBRIN, J. M.; CHUDE, V. O. Agronomic measurements for increasing P availability to crops. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 237, n. 2, p. 211-233, Dec. 2001.
- HOPIKINS, W. G. **Introduction to plant physiology**. New York: John Wiley, 1995. 464 p.
- KRAMER, J. P. **Water relations of plants**. Orlando: Academic Press, 1983. 489 p.

LÓPEZ-BUCCIO, J.; HERNÁNDEZ-ABREU, E.; SANDEZ-CALDERÓN, L.; NIETO-JACOBO, M. F.; SIMPSON, J.; HERRERA-ESTRELA, L. Phosphato availability alters architecture and causes changes in hormone sensitivity in Arabidopsis root system. **Plant Physiology**, Rockville, v. 129, n. 1, p. 244-256, May 2002.

LYNCH, J. P. The role of nutrient efficient crops in modern agriculture. **Journal Crop of production**, Binghamton, v. 1, p. 241-264, 1998.

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

LYNCH, J. P.; BROWN, K. M. Topsoil foraging: an architectural adaptation to low phosphorus availability. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 237, n. 2, p. 225-237, Dec. 2001.

MACHADO, A. T. Variedade entre genótipos de milho para eficiência em níveis de fósforo. **Bragantia**, Campinas, v. 58, n. 1, p. 109-124, 1999.

MACHADO, C. T. T.; GUERRA, J. G. M.; ALMEIDA, D. L.; MACHADO, A. T. Variabilidade entre genótipos de milho para eficiência no uso de fósforo. **Bragantia**, Campinas, v. 58, n. 1, p. 109-124, 1999.

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

MACHADO, R. A. F. **Linhagens de milho contrastantes para tolerância à seca e eficiência de utilização de nitrogênio**. 2003. 90 p. Tese (Doutorado), Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; CARNEIRO, N. P.; PAIVA, E. **Fisiologia do milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. 65 p. 2002. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 22).

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, Sep./Oct. 1978.

NIELSEN, K. L.; MILLER, C. R.; BECK, D.; LYNCH, J. P. Fractal geometry of root system: Field observations of contrasting genotype of common bean

(Phaseolus vulgaris L.) grown under different phosphorus regimes. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 206, n. 2, p. 181-190, 1998.

ROSOLEN, C. A.; ASSIS, J. S.; SANTIAGO, A. D. Root grown and mineral nutrition of corn. **Communication in Soil Science and Planta Analysis**, New York, v. 25, n. 13-14, p. 2491-2499, 1994.

SCHACHTMAN, D. P.; REID, R. J.; AYLING, S. M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. **Plant Physiology**, Rockville, v. 116, n. 2, p. 147-153, Feb. 1998.

SHENK, N. 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, n. 1, p. 65-76, 1980.

PAGOTTO, D. S. **Comportamento do sistema radicular do capim tanzânia (Panicum maximum, Jacq) sob irrigação e submetido a diferentes intensidades de pastejo**. 2001. 51 p. Dissertação (Mestrado) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

PALLANT, E.; HOLMGREN, R. A.; SCHULER, G. E.; MCCRAKEN, K. L.; DRBAL, B. Using a fine root extraction device to quantify small diameter maize root (0,025 mm) in field soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 153, p. 273-279, 1993.

PARENTONI, S. N.; GAMA, E. E. G.; SANTOS, M. X.; LOPES, M. A.; ALVES, V. M. C.; BAHIA FILHO, A. F. C.; VASCONCELLOS, C. A.; MAGNAVACA, R.; PACHECO, C. A. P.; MEIRELLES, W. F.; GUIMARÃES, P. E. O.; SILVA, A. E.; NASPOLINI FILHO, W.; MORO, J. R.; VIANA, R. T.; PITTA, G. V. E.; FRANCA, G. E.; PURCINO, A. A. C.; SOUZA, I. R. P.; ARRIEL, I. E.; MACHADO, A. T.; CORREA, L. A.; OLIVEIRA, A. C.; PAIVA, E. Adaptação de milho a solos ácidos: Tolerância à toxidez de alumínio e eficiência no uso de nutrientes no programa de pesquisa da EMBRAPA - Milho e Sorgo. In: REUNION LATINOAMERICANA DEL MAIZ, 18., 1999, Sete Lagoas. **Memórias...** Sete Lagoas: EMBRAPA -Milho e Sorgo; México: CIMMYT, 1999. p. 179-199.

CAPÍTULO 3

ATRIBUTOS MORFOLÓGICOS DE SISTEMA RADICULAR DE GENÓTIPOS DE MILHO CONTRASTANTES PARA TOLERÂNCIA À SECA EM RESPOSTA A ESTRESSE DE ALUMÍNIO

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo avaliar parâmetros morfológicos do sistema radicular e características de crescimento de linhagens endogâmicas de milho pré-selecionadas para tolerância à seca, do programa de melhoramento genético da Embrapa Milho e Sorgo, sendo duas linhagens tolerantes (L1 e L3) e duas sensíveis à seca (L2 e L4), em canteiros experimentais preparados isoladamente, para níveis diferenciados de saturação por Al (m%), baixo m% = 13, intermediário m% = 20 e alto m% = 60. O experimento foi implantado manualmente, no espaçamento de 0,20 m entre planta e 0,20 m entre linhas e as parcelas experimentais foram estabelecidas em 0,8 m² (quatro linhas de 1,2 m lineares e cinco plantas por metro linear). O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, repetidos duas vezes. Foram realizadas duas avaliações de morfologia do sistema radicular, com o auxílio do sistema de análise de imagens digitais *WinRHIZO* e de características de crescimento de raízes e parte aérea, aos 14 e 28 DAS (dias após a semeadura). Foram observadas diferenças significativas para atributos morfológicos de raízes e características de crescimento de raízes e parte aérea de genótipos de milho. De modo geral, as linhagens consideradas tolerantes à seca destacaram-se das sensíveis, por apresentarem maior comprimento total, área de superfície e volume de raízes. A utilização do sistema de análise digitais *WinRhizo* possibilitou a determinação do comprimento de raízes por classe de diâmetro. De modo geral as linhagens tolerantes à seca apresentaram maior contribuição de raízes muito finas (\emptyset inferior a 0,5 mm). Estas alterações dos atributos morfológicos de sistema radicular, podem ser um indicio de que linhagens selecionadas para maior eficiência no uso da água, são indiretamente selecionadas para eficiência na aquisição de nutrientes.

ABSTRACT

The objectives of this work were to evaluate morphological parameters of root system and growth characteristics of maize inbred lines selected to drought from the maize breeding program belonging to Embrapa Maize and Sorghum. Two inbred lines tolerant (L1 and L3) and two sensitive to drought (L2 and L4) were planted in seedling beds with different levels of aluminum saturation (m%), being low m%=13, intermediate m%=20 and high m%=60. The experiment was seeded manually at space 0,20 m among plants and 0,20 m among lines. The experimental plots were established in 0,8 m² (four lines of 1.2 linear meters being five plants per linear meter). The experimental design used was randomized complete blocks, with two replications. Two evaluations of root morphology were accomplished by using digital images techniques through WinRhizo, as well as the characteristics of root and canopy growth were evaluated at 14 and 28 days after seeding. There were significant differences for root morphological attributes and characteristics of growth for root and canopy of maize plants. In general the inbred lines tolerant to drought showed superior performance compared to the sensitive ones. Those tolerant sowed larger root length, surface area, volume and greater number of fine roots (diameter less than 0.5 mm). The use of digital image system WinRhizo make possible the determination of root length by diameter class. These alterations in the root system morphological attributes may be an indication that the inbred lines selected to better water efficiency are indirectly selected for a better efficiency in nutrients acquisition.

1 INTRODUÇÃO

A toxidez do alumínio (Al) é o fator mais limitante à produtividade agrícola em solos ácidos (Kocian, 1995), que cobrem uma área de 1,66 milhões de hectares, distribuídos em várias regiões do mundo, e aproximadamente 43% destas áreas estão localizadas na região tropical (Pandey et al., 1994). No Brasil, os solos de cerrado ocupam cerca de 24,5% do território. O alumínio, em níveis tóxicos no solo, pode causar efeitos danosos para as plantas, determinando injúrias e retardando o crescimento (Mazzocato et al., 2002). A absorção e o acúmulo desse elemento em diferentes partes da planta afetam células e suas organelas em nível morfológico, citogenético e fisiológico, prejudicando seu desenvolvimento e principalmente, o da parte radicular (Foy, 1978; Kumar et al., 1995; Wagatsuma et al., 1995).

Muitos estudos têm mostrado que a inibição do crescimento da raiz é o sintoma visível mais rápido da toxicidade do Al em plantas, o que resulta na redução e em danos no sistema radicular, podendo conduzir à deficiência mineral e estresse hídrico (Degenhardt et al., 1998). A redução do crescimento da parte aérea ocorre em um momento posterior (Jones & Kochian, 1995; Ryan et al., 1993) e parece ser uma consequência dos danos que ocorrem na raiz (Matsumoto et al., 1976).

No caso da cultura do milho, a maioria das cultivares comerciais são suscetíveis ao Al, mas existe variabilidade genética dentro desta espécie, quanto à tolerância ao alumínio. Dessa forma, o desenvolvimento de materiais tolerantes ao estresse provocado pelo Al constitui uma alternativa de custo relativamente baixo, podendo proporcionar ganhos estáveis de produtividade (Duque-Vargas et al., 1994), além de reduzir riscos da produção nestes solos (Lopes et al., 1987; Martins et al., 1999).

Nesse sentido os objetivos deste trabalho foram caracterizar a morfologia de sistema, avaliar características de crescimento de parte aérea e raiz e utilizar a técnica de análise de imagens digitais no estudo de sistema radicular de genótipos de milho contrastantes para tolerância à seca, em resposta a níveis diferenciados de saturação de alumínio.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado nos meses de novembro e dezembro de 2006, na Embrapa Milho e Sorgo situada no município de Sete Lagoas, MG, localizada a 19°28' de latitude S e longitude 44°15'08" W a 732 m de altitude. O clima da região, segundo Köopen, é do tipo Aw (clima de savana com inverno seco).

Foram avaliadas quatro linhagens, sendo duas delas tolerantes (L1 e L3) e duas sensíveis à seca (L2 e L4) com *background* genético e origens distintas, oriundas do Programa de Melhoramento de Milho da Embrapa Milho e Sorgo, que tem como objetivo, em uma de suas linhas de pesquisa, a tolerância à seca. Os canteiros experimentais foram preparados isoladamente para três níveis diferenciados de saturação por alumínio (m%): baixo m% = 13, intermediário m% = 20 e alto m% = 60. Estes canteiros apresentavam as seguintes características: 12,0 m de comprimento x 1,2 m de largura x 0,4 m de profundidade, sob telado de sombrite 50% com solos tipo LATOSSOLO VERMELHO ESCURO textura média (LEm).

A variabilidade espacial dos canteiros em relação à disponibilidade de nutrientes foi verificada por meio da análise de solos. As parcelas experimentais foram separadas em seis subparcelas de dois metros de comprimento, de onde foram retiradas seis amostras simples que compuseram uma amostra composta de solo, as quais foram enviadas ao Laboratório de Fertilidade de Solos da Embrapa Milho e Sorgo para análise. Os resultados da análise química do solo, são apresentados na Tabela 11.

TABELA 11. Características químicas do solo (camada de 0-20).

Nível de Al	pH (H ₂ O)	H+Al	Al	Ca	Mg	K	P	SB	CTC	V	m
		----- (cmolc/dm ³) -----				-- (mg/dm ³) --		(cmolc/dm ³)		----- (%) -----	
Al alto	4,93	9,70	1,84	0,94	0,12	69,67	13,57	1,24	10,94	11,46	59,71
Al interm	5,46	5,95	0,67	2,12	0,24	91,92	10,88	2,60	8,56	30,51	20,69
Al baixo	5,61	5,66	0,52	2,82	0,45	85,53	15,77	3,49	9,15	38,16	13,00

Os elementos meteorológicos: precipitação total diária, temperatura máxima e mínima, temperatura média diária e umidade relativa média diária, correspondentes ao período experimental, referentes a observações realizadas na Estação Meteorológica da Embrapa Milho e Sorgo, situada a aproximadamente 1,5 km da área experimental, encontram-se na Figura 3, do capítulo anterior.

O experimento foi implantado manualmente no dia 14/11/2006. Para o preparo dos sulcos de plantio foi utilizado um rastelo de madeira cujas hastes eram espaçadas 0,20 m. A utilização deste implemento foi necessária para que as linhas de plantio fossem alinhadas e fosse mantida a equidistância de 0,20 m entre plantas e entre linhas que compunham as parcelas experimentais.

As unidades experimentais foram estabelecidas em 0,8 m² (quatro linhas de 1,2 m lineares e cinco plantas por metro linear), correspondendo a 20 plantas por genótipo. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, repetidos duas vezes.

As adubações de base e complementares, visando adequado suprimento de macro e micronutrientes, foram manejadas conforme protocolos para *Fenotipagem de Plantas visando Tolerância a Seca, em Sete Lagoas, MG* (Embrapa Milho e Sorgo, 2005. Não publicado).

Realizaram-se três avaliações de parte aérea e morfologia de sistema radicular, aos 14 e 28 DAS (dias após a semeadura), procedendo-se da seguinte maneira: em cada avaliação, foram coletadas três plantas por parcela por repetição, totalizando seis plantas por genótipo por época de avaliação.

Foram coletadas plantas inteiras (sistema radicular e parte aérea) retirando-se blocos de solo. Os blocos foram retirados com o auxílio de uma espátula de metal e este procedimento foi necessário para que fossem reduzidas ao máximo as perdas decorrentes das amostragens. Os blocos de solo contendo planta inteira (sistema radicular e parte aérea) foram transportados imediatamente para o Laboratório do Núcleo de Estresses Abióticos e relação solo-água-plantas/Laboratório de Fisiologia Vegetal da Embrapa Milho e Sorgo em sacos de papel devidamente identificados.

As amostras foram submergidas em bacias contendo água destilada por 30 minutos. Este procedimento teve por objetivo facilitar o processo de lavagem das raízes, que foi realizado utilizando-se um jato de água, até que o sistema radicular das plantas ficassem livres de partículas de solo. Para evitar perda de material durante o processo de lavagem das raízes, foi utilizado um conjunto de peneiras de 20 e 60 Mesh.

Após o processo de lavagem das raízes, as plantas foram separadas em sistema radicular (SR) e parte aérea (PA) na altura do coleto. As raízes lavadas foram armazenadas em frascos contendo solução de etanol 70%, para evitar a desidratação das raízes.

Características avaliadas

- a) Matéria seca de parte aérea: após as pesagens da parte aérea (colmo e folhas), o material foi armazenado em sacos de papel e transportado para uma estufa de circulação forçada de ar, a 72°C até que fosse atingido peso

constante. Após a secagem, o material vegetal foi pesado para determinação de sua matéria seca.

- b) Matéria seca de raízes: após a determinação das características morfológicas de raiz, o material foi armazenado em sacos de papel e transportado para uma estufa de circulação forçada de ar a 72°C até que fosse atingido peso constante. Após a secagem, o material vegetal foi pesado, para determinação de sua matéria seca.
- c) Determinação da morfologia do sistema radicular: utilizou-se o sistema *WinRHIZO Pro 2007a* (Régent Instr. Inc.), acoplado a um *scanner* profissional *Epson XL 10000* equipado com uma unidade de luz adicional (TPU). Foi utilizada definição de 400 (dpi) para as medidas de morfologia, como descrito por Bauhus & Christian (1999), Bouma et al. (2000), e Costa et al. (2002).

As raízes foram dispostas em uma cuba de acrílico de 20 cm de largura por 30 cm de comprimento, contendo, aproximadamente, 1 cm de água. A utilização deste acessório permitiu a obtenção de imagens em três dimensões, evitando-se também a sobreposição das raízes. As leituras foram realizadas em seis plantas por genótipo por época de avaliação.

As análises foram realizadas imediatamente após a obtenção das imagens e armazenadas como arquivos TIFF para posterior acesso por meio da planilha excel *XLRhizo* integrada ao sistema. Foram determinadas as seguintes características de raiz: comprimento total de raiz (cm), área de superfície de raiz (cm²), volume de raiz (cm³), diâmetro médio de raiz (mm) e comprimento de raiz por classe de diâmetro (cm).

As raízes foram classificadas segundo três classes de diâmetro, como descrito a seguir: raízes muito finas (\emptyset inferior a 0,5 mm), raízes finas ($> 0,5 \emptyset < 2,0$ mm) e raízes grossas ($\emptyset > 2,0$ mm) (adaptado de Bhom, 1979).

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (teste de F) e efetuando-se a comparação entre as médias dos tratamentos pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Produção de matéria seca

A produção de matéria seca de raiz (MSR) não diferiu significativamente entre genótipos e níveis de saturação por alumínio, aos 14 DAS (Tabela 12). No entanto, a matéria seca de parte aérea (MSPA) e a total (MST) apresentaram diferenças significativas entre genótipos somente no nível intermediário de saturação por Al, destacando-se as linhagens sensíveis à seca L2 e L4 (Tabela 12). Na média as linhagens sensíveis à seca L2 e L4 apresentaram as maiores produções de MSPA. A interação nível de Al x genótipos foi significativa para a característica MST, indicando que o efeito dos níveis de saturação por Al foi dependente dos genótipos estudados. Com relação à razão matéria seca de raiz/parte aérea (R/PA) não houve diferenças significativas entre genótipos e níveis de saturação por alumínio, aos 14 DAS (Tabela 12).

Verifica-se, pela Tabela 13, que aos 28 DAS houve diferenças significativas entre níveis de saturação por Al para as características MSR, MST e razão R/PA. Na média observa-se que os genótipos sensíveis à seca L2 e L4 apresentaram os maiores valores para as características produção de MSR e MST. Observa-se também pela (Tabela 13), que o maior nível de saturação por Al, foi responsável pela maior redução na produção de MSR, indicando os efeitos primários do Al são observados na raiz. A produção de MSPA diferiu significativamente entre genótipos nos níveis baixo e intermediário de saturação por Al, a linhagem L4 sensível à seca destacou-se das demais. A produção de MST apresentou diferenças entre genótipos somente no nível intermediário de saturação por alumínio. Na média as linhagens sensíveis L2 e L4 destacaram-se das linhagens tolerantes à seca L1 e L3.

Não houve diferenças significativas entre genótipos, considerando a característica razão R/PA. Observa-se, pela Tabela 13, que o maior nível de

saturação proporcionou a menor razão R/PA, sugerindo novamente que o efeito do Al foi mais pronunciado nas raízes do que na parte aérea.

De acordo com Horn et al. (2006), a razão R/PA seria um parâmetro importante na avaliação de genótipos em níveis diferenciados de saturação por Al, devido ao fato de uma alta razão R/PA ser desejável, em condições de baixa disponibilidade de nutrientes e água no solo.

TABELA 12. Produção de matéria seca da raiz, parte aérea, total e razão matéria seca de raiz/parte aérea de genótipos de milho, em resposta a níveis diferenciados de saturação por Al (m%), baixo m% = 13, intermediário m% = 20 e alto m% = 60%, aos 14 DAS.

Genótipos	Nível de Al			Média
	Baixo	Intermediário	Alto	
14 DAS				
*Matéria seca de raiz (g planta ⁻¹)				
L1 (T)	6,58 a	4,13 a	8,80 a	6,50 a
L2 (S)	7,42 a	7,91 a	5,89 a	7,07 a
L3 (T)	6,02 a	4,60 a	6,99 a	5,87 a
L4 (S)	6,31 a	6,79 a	7,32 a	6,81 a
Média	6,58 A	5,86 A	7,25 A	
*Matéria seca de parte aérea (g planta ⁻¹)				
L1 (T)	8,33 a	7,94 a	9,17 a	8,48 a
L2 (S)	9,45 a	9,33 b	9,26 a	9,35 b
L3 (T)	8,74 a	7,6 a	8,23 a	8,19 a
L4 (S)	8,93 a	8,22 b	9,83 a	8,99 b
Média	8,86 B	8,27 A	9,12 B	
*Matéria seca total (g planta ⁻¹)				
L1 (T)	4,95 a	4,05 a	6,00 a	---
L2 (S)	5,65 a	5,75 b	5,05 a	---
L3 (T)	4,95 a	4,05 a	5,10 a	---
L4 (S)	5,10 a	5,00 b	5,70 a	---
Média	5,16 B	4,71 A	5,46 B	
*Razão matéria seca de raiz/parte aérea				
L1 (T)	0,79 a	0,52 a	0,96 a	0,76 a
L2 (S)	0,78 a	0,84 a	0,63 a	0,76 a
L3 (T)	0,69 a	0,60 a	0,86 a	0,72 a
L4 (S)	0,70 a	0,82 a	0,75 a	0,76 a
Média	0,74 A	0,70 A	0,79 A	

* Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente, pelo teste de Scott-Knott, a 5%, S – sensível à seca, T – tolerante à seca, ^{ns} – não significativo.

TABELA 13. Produção de matéria seca da raiz, parte aérea, total e razão matéria seca de raiz/parte aérea de genótipos de milho, em resposta a níveis diferenciados de saturação por Al (m%), baixo m% = 13, intermediário m% = 20 e alto m% = 60%, aos 28 DAS.

Genótipos	Nível de Al			Média
	Baixo	Intermediário	Alto	
28 DAS				
*Matéria seca de raiz (g planta ⁻¹)				
L1 (T)	9,12 a	8,48 a	5,69 a	7,76 a
L2 (S)	11,82 a	11,02 a	6,72 a	9,85 b
L3 (T)	9,25 a	8,24 a	5,50 a	8,24 a
L4 (S)	10,11 a	9,99 a	9,20 a	9,76 b
Média	10,07 B	9,43 B	6,18 A	
*Matéria seca de parte aérea (g planta ⁻¹)				
L1 (T)	11,11 a	10,56 a	10,75 a	10,81 a
L2 (S)	10,97 a	10,89 a	11,32 a	11,06 a
L3 (T)	11,23 a	10,87 a	11,36 a	11,15 a
L4 (S)	12,22 b	12,28 b	10,64 a	11,71 b
Média	11,38 A	11,15 A	11,02 A	
*Matéria seca total (g planta ⁻¹)				
L1 (T)	6,75 a	6,35 a	5,50 a	6,20 a
L2 (S)	7,60 a	7,30 b	6,00 a	6,96 b
L3 (T)	6,85 a	6,40 a	5,65 a	6,30 a
L4 (S)	7,45 a	7,45 b	6,60 a	7,16 b
Média	7,16 B	6,87 B	5,93 A	
*Razão matéria seca de raiz/parte aérea				
L1 (T)	0,81 a	0,79 a	0,54 a	0,71 a
L2 (S)	1,07 a	1,00 a	0,60 a	0,89 a
L3 (T)	0,82 a	0,75 a	0,48 a	0,68 a
L4 (S)	0,82 a	0,80 a	0,86 a	0,83 a
Média	0,88 B	0,84 B	0,62 A	

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente, pelo teste de Scott-Knott, a 5%, S – sensível à seca, T – tolerante à seca, ^{ns} – não significativo.

3.2 Atributos morfológicos de raiz

3.2.1 Comprimento total, área de superfície, diâmetro médio e volume de raiz

De modo geral, as linhagens tolerantes à seca L1 e L3 apresentaram os melhores resultados para as características comprimento total (CTR), área de superfície (ASR) e volume de raiz (VR), sobretudo aos 14 DAS (Tabelas 14, 15, 16 e 17). O diâmetro médio de raízes (DMR) apresentou diferenças significativas somente no maior nível de saturação por Al e na média dos genótipos, observa-se pela (Tabela 16), o maior nível de saturação por alumínio foi responsável pelos maiores valores de DMR aos 14 DAS.

Esses resultados sugerem que o melhoramento genético visando tolerância à seca está relacionado com a tolerância ao alumínio, uma vez que a inibição do crescimento do sistema radicular é o primeiro sintoma observado em plantas submetidas a níveis tóxicos de alumínio.

De acordo com Horn et al. (2006), a disponibilidade dos nutrientes aos vegetais é influenciada por fatores de solo, que determinam seu movimento até as raízes, e por atributos morfológicos e fisiológicos, que determinam sua absorção, translocação e utilização pelas plantas. Segundo esse mesmo autor, a morfologia do sistema radicular é determinada pelo comprimento, superfície, diâmetro médio, volume de raízes e dos pêlos radiculares.

Martins et al. (1999), trabalhando com duas linhagens endogâmicas consideradas sensíveis, uma linhagem e uma variedade de polização livre consideradas tolerantes ao Al, observaram que os materiais tolerantes apresentaram os maiores valores para os índices fenotípicos, comprimento relativo de raiz seminal (CRRS) e comprimento líquido de raiz seminal (CLRS). Os maiores valores apresentados neste experimento para os atributos morfológicos de sistema radicular CTR, ASR e VR podem sugerir que as

linhagens selecionadas para maior eficiência no uso da água (EUA) são indiretamente selecionadas para tolerância ao estresse causado pelo alumínio.

Observa-se, pela Tabela 18, que as linhagens tolerantes à seca apresentaram os maiores valores para a relação comprimento total de raiz/matéria seca de parte aérea (CTR/MSPA), demonstrando que estes materiais investem a maior parte dos seus fotoassimilados na produção de raízes. Essa seria uma característica desejável, pois materiais com maior sistema radicular seriam mais eficientes na aquisição de nutrientes e água. De forma semelhante às linhagens tolerantes à seca, apresentaram os maiores valores para a relação comprimento total de raiz/matéria seca de raiz (CTR/MSR), indicando que estes materiais conseguem aumentar sua superfície de absorção, para uma mesma massa (consumo metabólico).

TABELA 14. Comprimento total de raízes (CTR) de genótipos de milho, em resposta a níveis diferenciados de saturação por Al (m%) baixo m% = 13, intermediário m% = 20 e alto m% = 60 aos 14 e 28 DAS.

Genótipos	*Comprimento de raiz (cm.planta ⁻¹)			Média
	Al-Baixo	Al-Interm	Al-Alto	
14 DAS (dias após a semeadura)				
L1 (T)	519,478 a	364,191 a	571,561 b	485,076 b
L2 (S)	354,163 a	328,911 a	249,809 a	310,961 a
L3 (T)	422,219 a	508,364 a	515,601 b	482,061 b
L4 (S)	291,839 a	401,976 a	292,735 a	328,850 a
Média	396,924 A	400,860 A	407,426 A	
28 DAS (Dias após a semeadura)				
L1 (T)	954,951 b	842,262 b	878,979 b	892,064 b
L2 (S)	351,181 a	392,685 a	582,169 a	442,011 a
L3 (T)	974,601 b	994,736 b	774,815 a	914,717 b
L4 (S)	668,901 a	447,690 a	745,042 a	620,544 a
Média	737,408 A	669,343 A	745,251 A	

*Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente, pelo teste de Scott-Knott, a 5%, S – sensível à seca, T – tolerante à seca, ^{ns} – não significativo.

TABELA 15. Área de superfície de raiz (ASR) de genótipos de milho, em resposta a níveis diferenciados de saturação por Al (m%) baixo m% = 13, intermediário m% = 20 e alto m% = 60 aos 14 e 28 DAS.

Genótipos	*Área de superfície de raiz (cm ² .planta ⁻¹)			Média
	Al-Baixo	Al-Interm	Al-Alto	
14 DAS (dias após a semeadura)				
L1 (T)	61,90 a	46,05 a	75,64 b	61,20 b
L2 (S)	42,44 a	39,55 a	37,01 a	39,67 a
L3 (T)	54,30 a	67,09 a	79,67 b	67,02 b
L4 (S)	37,53 a	54,44 a	43,24 a	45,07 a
Média	49,04 A	51,78 A	58,89 A	
28 DAS (dias após a semeadura)				
L1 (T)	125,96 a	116,90 a	121,98 a	121,61 a
L2 (S)	59,09 a	50,17 a	84,59 a	64,61 a
L3 (T)	131,64 a	140,68 a	112,16 a	128,16 a
L4 (S)	164,25 a	60,95 a	107,04 a	110,74 a
Média	120,23 A	92,17 A	106,44 A	

*Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente, pelo teste de Scott-Knott, a 5%, S – sensível à seca, T – tolerante à seca, ^{ns} – não significativo.

TABELA 16. Diâmetro médio de raiz (DMR) de genótipos de milho, em resposta a níveis diferenciados de saturação por Al (m%) baixo m% = 13, intermediário m% = 20 e alto m% = 60 aos 14 e 28 DAS.

Genótipos	*Diâmetro médio de raiz (mm.planta ⁻¹)			Média
	Al-Baixo	Al-Interm	Al-Alto	
14 DAS (dias após a semeadura)				
L1 (T)	0,38 a	0,40 a	0,42 a	0,40 a
L2 (S)	0,38 a	0,37 a	0,47 b	0,41a
L3 (T)	0,41 a	0,42 a	0,49 b	0,44 b
L4 (S)	0,41 a	0,42 a	0,47 b	0,43 b
Média	0,39 A	0,40 A	0,46 B	
28 DAS (Dias após a semeadura)				
L1 (T)	0,42 a	0,43 a	0,43 a	0,43 a
L2 (S)	0,54 a	0,40 a	0,48 a	0,47 a
L3 (T)	0,43 a	0,45 a	0,46 a	0,44 a
L4 (S)	0,92 a	0,43 a	0,46 a	0,61 a
Média	0,58 A	0,43 A	0,46 A	

*Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente, pelo teste de Scott-Knott, a 5%, S – sensível à seca, T – tolerante à seca, ^{ns} – não significativo.

TABELA 17. Volume de raiz (VR) de genótipos de milho, em resposta a níveis diferenciados de saturação por Al (m%) baixo m% = 13, intermediário m% = 20 e alto m% = 60 aos 14 e 28 DAS.

Genótipos	*Volume de raiz (cm ³ .planta ⁻¹)			Média
	Al-Baixo	Al-Interm	Al-Alto	
14 DAS (dias após a semeadura)				
L1 (T)	0,58 a	0,46 a	0,79 b	0,62 b
L2 (S)	0,40 a	0,37 a	0,43 a	0,40 a
L3 (T)	0,55 a	0,70 a	0,98 b	0,74 b
L4 (S)	0,38 a	0,59 a	0,51 a	0,49 a
Média	0,48 A	0,53 A	0,68 B	
28 DAS (Dias após a semeadura)				
L1 (T)	1,32 a	1,30 a	1,36 a	1,32 a
L2 (S)	0,79 a	0,51 a	0,98 a	0,76 a
L3 (T)	1,42 a	1,58 a	1,29 a	1,43 a
L4 (S)	1,85 a	0,66 a	1,22 a	1,24 a
Média	1,35 A	1,01 A	1,21 A	

*Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente, pelo teste de Scott-Knott, a 5%, S – sensível à seca, T – tolerante à seca, ^{ns} – não significativo.

Tabela 18. Razão comprimento total de raiz/matéria seca de parte aérea (CTR/MSPA) e comprimento total de raiz/matéria seca de raiz (CTR/MSR), média dos genótipos nos três níveis de saturação por Al aos 14 e 28 DAS.

Genótipos	14 DAS	28 DAS
* CTR/MSPA		
L1 (T)	57,20 b	85,52 b
L2 (S)	33,25 a	39,96 a
L3 (T)	58,85 b	82,03 b
L4 (S)	36,57 a	52,99 a
* CTR/MSR		
L1 (T)	74,62 b	114,95 b
L2 (S)	43,98 a	44,87 a
L3 (T)	82,12 b	111,00 b
L4 (S)	482,8 a	63,58 a

*Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente pelo teste de Scott-Knott, a 5%, S – sensível à seca, T – tolerante à seca, ^{ns} – não significativo, DAS = dias após a semeadura.

3.2.2 Comprimento de raízes por classe de diâmetro

A determinação do comprimento de raízes por classe de diâmetro foi feita utilizando-se o sistema *WinRHIZO*. As linhagens tolerantes à seca, na média, apresentaram os maiores valores de comprimento nas classes de raízes muito finas, finas e grossas, sobretudo aos 14 DAS. Observa-se, pelas Tabelas 19, 20 e 21, que a maior contribuição para o comprimento total de raiz das raízes pertencentes à classe de diâmetro inferior a 0,5 mm (raízes muito finas).

O comprimento de raízes finas diferiu significativamente somente no maior nível de saturação por Al e na média dos genótipos aos 14 DAS. Em geral, as linhagens tolerantes à seca L1 e L3 apresentaram resultados superiores as sensíveis L2 e L4 (Tabela 21).

Com relação ao comprimento de raízes grossas, houve diferenças significativas somente aos 14 DAS. A interação nível de Al x genótipos foi

significativa, indicando que o efeito dos diferentes níveis de saturação por Al foi dependente dos genótipos estudados (Tabela 21).

Para Vilela & Anghinoni (1984) a eficiência de absorção dos nutrientes possui relação direta com o comprimento e o diâmetro médio de raízes, porque esses atributos morfológicos de sistema radicular influenciam a superfície de absorção de nutrientes.

Variações na morfologia radicular e nos parâmetros cinéticos entre genótipos de milho têm sido observadas (Anghinoni et al., 1989; Baligar & Barber, 1979) evidenciando a importância da melhoria dessas características por meio de programas de melhoramento genético para a obtenção de cultivares mais eficientes na absorção de nutrientes.

Schenk & Barber (1979) avaliaram parâmetros morfológicos em sistemas radiculares com diferentes disponibilidades de P e observaram que eles variaram somente quando a concentração do nutriente era baixa. Isso pode estar relacionado com o mecanismo utilizado pela planta de incrementar a emissão de raízes mais finas e longas, com o objetivo de aumentar a eficiência na absorção de nutrientes, sob condição de estresse.

TABELA 19. Comprimento de raiz na classe de diâmetro, raízes muito finas (\emptyset inferior a 0,5 mm) de plântulas de genótipos de milho, em resposta a níveis diferenciados de saturação por Al (m%), baixo m% = 13, intermediário m% = 20 e alto m% = 60 aos 14 e 28 DAS.

Genótipos	Raízes muito finas (mm.planta ⁻¹)			Média
	Al-Baixo	Al-Interm	Al-Alto	
14 DAS (dias após a semeadura)				
L1 (T)	409,94 a	270,38 a	441,979 b	374,10 b
L2 (S)	279,34 a	301,98 a	160,780 a	247,37 a
L3 (T)	318,09 a	383,07 a	354,544 b	351,90 b
L4 (S)	211,65 a	287,96 a	202,416 a	234,01 a
Média	304,74 A	310,85 A	289,93 A	
28 DAS (dias após a semeadura)				
L1 (T)	898,58 b	626,33 a	653,54 a	726,15 b
L2 (S)	212,41 a	274,85 a	390,13 a	292,46 a
L3 (T)	712,96 b	686,74 a	532,58 a	644,09 b
L4 (S)	469,92 a	329,83 a	529,40 a	443,05 a
Média	573,47 A	479,44 A	526,41 A	

*Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente, pelo teste de Scott-Knott, a 5%, S – sensível à seca, T – tolerante à seca, ^{ns} – não significativo.

TABELA 20. Comprimento de raiz na classe de diâmetro, raízes finas (> 0,5 Ø < 2,0 mm) de genótipos de milho, em resposta a níveis diferenciados de saturação por Al (m%), baixo m% = 13, intermediário m% = 20 e alto m% = 60 aos 14 e 28 DAS.

Genótipos	Raízes finas (mm.planta ⁻¹)			Média
	Al-Baixo	Intermediário	Alto	
14 DAS (dias após a semeadura)				
L1 (T)	105,14 a	91,11 a	124,91 b	107,05 b
L2 (S)	72,82 a	76,33 a	86,67 a	78,61 a
L3 (T)	101,47 a	120,66 a	154,89 b	125,67 b
L4 (S)	77,77 a	109,72 a	88,28 a	91,93 a
Média	89,30 A	99,46 A	113,69 A	
28 DAS (dias após a semeadura)				
L1 (T)	217,85 a	207,24 a	218,20 a	214,43 a
L2 (S)	131,82 a	115,36 a	187,65 a	144,94 a
L3 (T)	255,17 a	255,17 a	236,24 a	264,00 a
L4 (S)	193,78 a	112,82 a	209,98 a	172,20 a
Média	199,65 A	184,00 A	213,02 A	

*Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente, pelo teste de Scott-Knott, a 5%, S – sensível à seca, T – tolerante à seca, ^{ns} – não significativo.

TABELA 21. Comprimento de raiz na classe de diâmetro, raízes grossas ($\emptyset > 2,0$ mm) de genótipos de milho, em resposta a níveis diferenciados de saturação por Al (m%), baixo m% = 13, intermediário m% = 20 e alto m% = 60 aos 14 e 28 DAS.

Genótipos	Raízes grossas (mm.planta ⁻¹)			Média
	Al-Baixo	Al-Interm	Al-Alto	
14 DAS (dias após a semeadura)				
L1 (T)	3,78 b	2,16 a	4,07 b	---
L2 (S)	1,70 a	2,26 a	2,19 a	---
L3 (T)	2,12 a	4,07 b	5,64 b	---
L4 (S)	1,97 a	3,70 b	1,66 a	---
Média	2,39 A	3,05 A	3,34 A	
28 DAS (dias após a semeadura)				
L1 (T)	7,27 a	7,92 a	6,48 a	7,22 a
L2 (S)	6,53 a	1,94 a	3,95 a	4,14 a
L3 (T)	5,11 a	5,98 a	5,30 a	5,46 a
L4 (S)	4,55 a	4,62 a	4,91 a	4,69 a
Média	5,86 A	5,12 a	5,16 a	

*Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente, pelo teste de Scott-Knott, a 5%, S – sensível à seca, T – tolerante à seca, ^{ns} – não significativo.

4 CONCLUSÕES

Genótipos de milho tolerantes e sensíveis à seca, cultivados em diferentes níveis de saturação por Al, apresentaram alterações em atributos morfológicos de raiz e características de crescimento de raízes e parte aérea. Em geral, as linhagens pré-selecionadas para tolerância à seca apresentaram sistemas radiculares mais desenvolvidos, em relação às linhagens sensíveis, indicando que estes materiais, quando selecionados para eficiência no uso da água, são indiretamente selecionados para tolerância ao estresse por Al.

A técnica de análise de imagens digitais de sistemas radiculares permitiu discriminar genótipos de milho contrastantes para tolerância à seca, em resposta a níveis diferenciados de Al, a partir dos 14 DAS.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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, n. 3, p. 355-361, set./dez. 1989.
- BALIGAR, V. C.; BARBER, S. A. Genetic differences of corn on ion uptake. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, n. 5, 870-873, Sept./Oct. 1979.
- BAUHUS J.; CHRISTIAN MESSIER. Evaluation of Fine Root Length and Diameter Measurements Obtained Using WinRhizo Image Analysis. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, n. 1, p. 142-147, Jan./Feb. 1999.
- BOUMA T. J.; NIELSON, K. L.; KOUTSTAAL, B. A. S. Sample preparation and scanning protocol for computerised analysis of root length and diameter. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 218, p. 185-196, 2000.
- COSTA, C.; DWYER, L. M.; ZHOU, X.; DUTILLEUL, P.; HAMEL, C.; REID, L. M.; SMITH, D. L. Root Morphology of Contrasting Maize Genotypes. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, n. 1, p. 96-101, Jan./Feb. 2002.
- DEGENHARDT, J.; LARSEN, P. B.; HOWELL, S. H. Aluminium resistance in Arabidopsis mutant alr-104 is caused by an aluminium-induced increase in rhizosphere pH. **Plant Physiology**, Rockville, v. 117, n. 1, p. 19-27, May 1998.
- DUQUE-VARGAS, J.; PANDEY, X.; GRANADOS, G.; CEBALLOS, H.; KNAPP, E. Inheritance of tolerance to soil acidity in tropical maize. **Crop Science**, Madison, v. 34, n. 1, p. 50-54, Jan./Feb. 1994.
- FOY, C. D.; CHANEL, R. L.; WRITE, M. C. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review Plant Physiology**, Palo Alto, v. 29, p. 511-566, 1978.
- HORN, D.; ERNANI, P. R.; SANGOI, L.; SCHWATZER.; CASSOL, P. C. Parâmetros cinéticos e morfológicos da absorção de nutrientes em cultivares de milho com variabilidade genética contrastante. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 77-85, jan./fev. 2006.
- JONES, D. L.; KOCHIAN, L. V. Aluminium of the 1,4,5-triphosphate signal transduction pathway in wheat roots: a role in aluminum toxicity. **Plant cell**, Rockville, v. 7, n. 11, p. 1913-1922, Nov. 1995.

- KOCHIAN, L. V. Cellular mechanisms of aluminium resistance in plants. **Annual review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 46, p. 237-260, 1995.
- KUMAR, P. B. A. N.; DUSHENKOV, V.; MOTTO, H. Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. **Environmental Science Technology**, Washington, v. 29, n. 5, p. 1232-1238, May 1995.
- LOPES, M. A.; MAGNAVACA, R.; BAHIA-FILHO, A. F. C.; GAMA, E. E. G. Avaliação de populações de milho e seus cruzamentos para tolerância a toxidez de alumínio em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 3, p. 257-263, mar. 1987.
- MARTINS, P. R.; PARENTONI, S. N.; LOPES, M. A.; PAIVA, E. Eficiência de índices fenotípicos de comprimento de raiz seminal na avaliação de plantas individuais de milho quanto à tolerância ao alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 10, p. 1897-1904, out. 1999.
- MATSUMOTO, H.; HIRASAWA, F.; TORIKAI, H. Localization of absorbed aluminium in pea root and its binding to nucleic acid. **Plant Cell Physiology**, Kyoto, v. 17, n. 1, p. 127-137, 1976.
- MAZZOCATO, A. C.; ROCHA, P. S. G.; SERENO, M. J. C. M.; BOHNENH, H.; GRONGO, VANDERLISE.; NETO, J. F. B. Tolerância ao alumínio em plântulas de milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 1, p. 19-24, jan./mar. 2002.
- PANDEY, S.; CEBALHOS, H.; GRANADOS, G.; KNAPP, E. Developing maize that tolerates aluminium toxic soils. In: EDMENDES, G. E.; DEUSTCH, J. A. (Ed). **Stress tolerance breeding: maize that resist insects, drought, low nitrogen and acid soils**. Mexico: Centro Internacional de Mejoramiento de Maiz y Trigo, 1994. 344 p.
- RAYN, P. R.; KOCHIAN, L. Interaction between aluminum toxicity and calcium uptake at the root apex in near-isogenic lines of wheat (*Triticum aestivum*) differing in aluminum tolerance. **Plant Physiology**, Rockville, v. 102, n. 3, p. 975-982, July 1993.
- 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. 5, p. 880-883, Sept./Oct. 1999.

VILELA, L.; ANGHINONI, I. Morfologia do sistema radicular e cinética da absorção de fósforo em cultivares de soja afetadas pela interação alumínio-fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 8, n. 1, p. 91-96, jan./abr. 1984.

WAGATSUMA, T.; ISHIKAWA, S.; OBATA, H.; TAWARAJA, K.; KATOHDA, S. Plasma membrane of younger and outer cells is the primary specific site for aluminum toxicity in roots. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 171, n. 1, p. 105-112, Apr. 1995.

ANEXOS

TABELA 1A. Resumo da análise de variância para as características matéria seca de parte aérea (MSPA), matéria seca de raiz (MSR), matéria seca total (MST) e relação matéria seca da parte aérea/raiz (MSR/MSPA) de plantas avaliadas aos 14 DAS (dias após a semeadura), em resposta a níveis diferenciados de P.

FV	GL	Quadrado Médio			
		MSPA	MSR	MST	MSR / MSPA
Nível de P	1	1,356602 ^{ns}	1,268220 ^{ns}	5,251897 ^{ns}	0,002460 ^{ns}
Bloco(Nível de P)	4	0,612008 ^{ns}	2,294887 ^{ns}	2,754225 ^{ns}	0,031452**
Genótipos	3	0,747677 ^{ns}	3,090554 ^{ns}	4,741318 ^{ns}	0,034867 ^{ns}
Nível de P x Genótipos	3	0,181175 ^{ns}	0,509993 ^{ns}	0,816650 ^{ns}	0,005943 ^{ns}
Resíduo	12	0,599823	1,26096	2,368503	0,014732
CV (%)		8,65	17,25	9,96	16,64

^{ns} Não significativo; CV (%), coeficiente de variação; ** Significativo, a 5% de probabilidade

TABELA 2A. Resumo da análise de variância para as características matéria seca de parte aérea (MSPA), matéria seca de raiz (MSR), matéria seca total (MST) e relação matéria seca da parte aérea/raiz (MSR/MSPA) de plantas avaliadas aos 21 DAS (dias após a semeadura), em resposta a níveis diferenciados de P.

FV	GL	Quadrado Médio			
		MSPA	MSR	MST	MSR / MSPA
Nível de P	1	1,932905 ^{ns}	0,802638 ^{ns}	5,225733 ^{ns}	0,000876 ^{ns}
Bloco(Nível de P)	4	0,440671 ^{ns}	3,308121 ^{ns}	2,700493 ^{ns}	0,056539**
Genótipos	3	1,159244 ^{ns}	4,891980**	10,725730**	0,025824 ^{ns}
Nível de P x Genótipos	3	0,919227 ^{ns}	2,320539 ^{ns}	5,893238 ^{ns}	0,012570 ^{ns}
Resíduo	12	0,550434	1,131974	1,782665	0,017016
CV (%)		8,45	15,24	8,47	16,39

^{ns} Não significativo; CV (%), coeficiente de variação; ** Significativo, ao nível de 5% de probabilidade

TABELA 3A. Resumo da análise de variância para as características matéria seca de parte aérea (MSPA), matéria seca de raiz (MSR), matéria seca total (MST) e relação matéria seca da parte aérea /raiz (MSR/MSPA) de plantas avaliadas aos 28 DAS (dias após a semeadura), em resposta a níveis diferenciados de P.

FV	GL	Quadrado Médio			
		MSPA	MSR	MST	MSR / MSPA
Nível de P	1	0,435673 ^{ns}	0,797183 ^{ns}	0,053915 ^{ns}	0,044582 ^{ns}
Bloco(Nível de P)	4	9,512856 ^{ns}	37,579449**	79,483021 **	0,135880**
Genótipos	3	1,750726 ^{ns}	3,612351 ^{ns}	2,277468 ^{ns}	0,049432 ^{ns}
Nível de P x Genótipos	3	2,090864 ^{ns}	13,315899 ^{ns}	17,457778 ^{ns}	0,141509**
Resíduo	12	0,702809	4,600925	7,515294	0,025065
CV (%)		8,57	24,99	14,92	18,23

^{ns} Não significativo; CV (%), coeficiente de variação; ** Significativo, a 5% de probabilidade

TABELA 4A. Resumo da análise de variância para as características comprimento total de raiz (CTR), área de superfície de raiz (ASR), diâmetro médio de raiz (DMR) e Volume de raiz (VR) de plantas avaliadas aos 14 DAS (dias após a semeadura), em resposta a níveis diferenciados de P.

FV	GL	Quadrado Médio			
		CTR	ASR	DMR	VR
Nível de P	1	12304,070357 ^{ns}	105,361742 ^{ns}	0,002166 ^{ns}	0,003725 ^{ns}
Bloco(Nível de P)	4	19615,125463 ^{ns}	406,165351 ^{ns}	0,008411 ^{ns}	0,053603 ^{ns}
Genótipos	3	54964,303606**	823,930872**	0,003556 ^{ns}	0,086610**
Nível de P x Genótipos	3	1743,784045 ^{ns}	25,950124 ^{ns}	0,006902 ^{ns}	0,002624 ^{ns}
Resíduo	12	8852,823901	152,014432	0,007202	0,017597
CV (%)		24,12	24,94	20,22	26,43

^{ns} Não significativo; CV (%), coeficiente de variação; ** Significativo, a 5% de probabilidade

TABELA 5A. Resumo da análise de variância para as características comprimento total de raiz (CTR), área de superfície de raiz (ASR), diâmetro médio de raiz (DMR) e Volume de raiz (VR) de plantas avaliadas aos 21 DAS (dias após a semeadura), em resposta níveis diferenciados de P.

FV	GL	Quadrado Médio			
		CTR	ASR	DMR	VR
Nível de P	1	5636,626950 ^{ns}	21,982290 ^{ns}	0,001634 ^{ns}	0,000234 ^{ns}
Bloco(Nível de P)	4	6496,210761 ^{ns}	51,799997 ^{ns}	0,001907 ^{ns}	0,006385 ^{ns}
Genótipos	3	101366,872221**	1621,215388**	0,002240 ^{ns}	0,170201 ^{ns}
Nível de P x Genótipos	3	23442,651014 ^{ns}	492,134706 ^{ns}	0,000312 ^{ns}	0,066232 ^{ns}
Resíduo	12	14042,19698	256,105872	0,000858	0,033926
CV (%)		25,1	24,33	6,54	25,05

^{ns} Não significativo; CV (%), coeficiente de variação; ** Significativo, a 5% de probabilidade

TABELA 6A. Resumo da análise de variância para as características comprimento total de raiz (CTR), área de superfície de raiz (ASR), diâmetro médio de raiz (DMR) e Volume de raiz (VR) de plantas avaliadas aos 28 DAS (dias após a semeadura), em resposta a níveis diferenciados de P.

FV	GL	Quadrado Médio			
		CTR	ASR	DMR	VR
Nível de P	1	151584,574960 ^{ns}	3153,379600**	0,000140 ^{ns}	0,427467**
Bloco(Nível de P)	4	49282,842154 ^{ns}	676,920277 ^{ns}	0,002492 ^{ns}	0,075082 ^{ns}
Genótipos	3	127410,070120 ^{ns}	2037,401923**	0,000918 ^{ns}	0,226252 ^{ns}
Nível de P x Genótipos	3	64019,639014 ^{ns}	1199,048569 ^{ns}	0,000179 ^{ns}	0,149619 ^{ns}
Resíduo	12	40236,92047	582,397087	0,001058	0,065697
CV (%)		31,67	28,48	7,57	28,13

^{ns} Não significativo; CV (%), coeficiente de variação; ** Significativo, a 5% de probabilidade

TABELA 7A. Resumo da análise de variância para as características comprimento de raiz por classe de diâmetro, raízes muito finas ($\varnothing < 0,5$ mm) RMF, raízes finas ($0,5 \text{ mm} > \varnothing < 2,0$ mm) RF, raízes pequenas ($\varnothing > 2,0$ mm) RP, de plantas avaliadas aos 14 DAS (dias após a semeadura), em resposta a níveis diferenciados de P.

FV	GL	Quadrado Médio		
		RMF	RF	RP
Nível de P	1	15360,945624**	204,668642 ^{ns}	5,880600**
Bloco(Nível de P)	4	16988,265489**	972,716258 ^{ns}	0,402152 ^{ns}
Genótipos	3	23718,460905**	1231,317154 ^{ns}	1,806849**
Nível de P x Genótipos	3	12317,693315**	110,293412 ^{ns}	0,295256 ^{ns}
Resíduo	12	2654,322476	502,242891	0,5489
CV (%)		19,73	25,38	28,97

^{ns} Não significativo; CV (%), coeficiente de variação; ** Significativo, a 5% de probabilidade

TABELA 8A. Resumo da análise de variância para as características comprimento de raiz por classe de diâmetro, raízes muito finas ($\varnothing < 0,5$ mm) RMF, raízes finas ($0,5 \text{ mm} > \varnothing < 2,0$ mm) RF, raízes pequenas ($\varnothing > 2,0$ mm) RP, de plantas avaliadas aos 21 DAS (dias após a semeadura), em resposta a níveis diferenciados de P.

FV	GL	Quadrado Médio		
		RMF	RF	RP
Nível de P	1	3449,820237 ^{ns}	239,231147 ^{ns}	0,017334 ^{ns}
Bloco(Nível de P)	4	6101,984399 ^{ns}	142,316811 ^{ns}	1,297751 ^{ns}
Genótipos	3	66138,424346**	4873,432577**	3,680584 ^{ns}
Nível de P x Genótipos	3	13126,073983 ^{ns}	1357,835177 ^{ns}	3,372095 ^{ns}
Resíduo	12	9194,385209	673,827715	2,794846
CV (%)		28,24	20,35	37,62

^{ns} Não significativo; CV (%), coeficiente de variação; ** Significativo, a 5% de probabilidade

TABELA 9A. Resumo da análise de variância para as características comprimento de raiz por classe de diâmetro, raízes muito finas ($\varnothing < 0,5$ mm) RMF, raízes finas ($0,5 \text{ mm} > \varnothing < 2,0$ mm) RF, raízes pequenas ($\varnothing > 2,0$ mm) RP, de plantas avaliadas aos 28 DAS (dias após a semeadura), em resposta a níveis diferenciados de P.

FV	GL	Quadrado Médio		
		RMF	RF	RP
Nível de P	1	84737,198241 ^{ns}	8901,009084**	12,368268 ^{ns}
Bloco(Nível de P)	4	35116,402532 ^{ns}	1685,746988 ^{ns}	4,748645 ^{ns}
Genótipos	3	79170,345991 ^{ns}	8269,987502**	8,745409 ^{ns}
Nível de P x Genótipos	3	35966,529671 ^{ns}	4059,112946 ^{ns}	2,452997 ^{ns}
Resíduo	12	26950,13751	1579,257289	3,213611
CV (%)		35,29	24,43	36,65

^{ns} Não significativo; CV (%), coeficiente de variação; ** Significativo, a 5% de probabilidade

TABELA 10A. Resumo da análise de variância para as características matéria seca de parte aérea (MSPA), matéria seca de raiz (MSR), matéria seca total (MST) e relação matéria seca da parte aérea / raiz (MSR / MSPA) de plantas avaliadas aos 14 DAS (dias após a semeadura), em resposta a níveis diferenciados de saturação por alumínio.

FV	GL	Quadrado Médio			
		MSPA	MSR	MST	MSR / MSPA
Nível de P	1	1,514478**	3,886732 ^{ns}	1,140000**	0,024553 ^{ns}
Bloco(Nível de P)	4	0,445358 ^{ns}	9,871948**	0,841250**	0,155390**
Genótipos	3	1,612583**	1,610083 ^{ns}	0,688194**	0,002609 ^{ns}
Nível de Al x Genótipos	3	0,412698 ^{ns}	4,222087 ^{ns}	0,661111**	0,049690 ^{ns}
Resíduo	12	0,343659	1,513777	0,139028	0,0285
CV (%)		6,69	18,74	7,29	22,45

^{ns} Não significativo; CV (%), coeficiente de variação; ** Significativo, a 5% de probabilidade

TABELA 11A. Resumo da análise de variância para as características matéria seca de parte aérea (MSPA), matéria seca de raiz (MSR), matéria seca total (MST) e relação matéria seca da parte aérea / raiz (MSR / MSPA) de plantas avaliadas aos 28 DAS (dias após a semeadura), em resposta níveis diferenciados de saturação por alumínio.

FV	GL	Quadrado Médio			
		MSPA	MSR	MST	MSR / MSPA
Nível de P	1	0,271133 ^{ns}	24,436526**	3,282917**	0,157778**
Bloco(Nível de P)	4	2,501035**	10,134959 ^{ns}	1,982500**	0,051974 ^{ns}
Genótipos	3	0,863384**	8,784438 ^{ns}	1,383889**	0,056135 ^{ns}
Nível de Al x Genótipos	3	0,617988 ^{ns}	1,754257 ^{ns}	0,065139 ^{ns}	0,028332 ^{ns}
Resíduo	12	0,210183	2,966737	0,355833	0,023909
CV (%)		4,10	19,65	8,96	19,73

^{ns} Não significativo; CV (%), coeficiente de variação; ** Significativo, a de 5% de probabilidade

TABELA 12A. Resumo da análise de variância para as características comprimento total de raiz (CTR), área de superfície de raiz (ASR), Diâmetro médio de raiz (DMR) e Volume de raiz (VR) de plantas avaliadas aos 14 DAS (dias após a semeadura), em resposta a níveis diferenciados de saturação por alumínio.

FV	GL	Quadrado Médio			
		CTR	ASR	DMR	VR
Nível de P	1	225,183896 ^{ns}	206,610226 ^{ns}	0,010226**	0,084320**
Bloco(Nível de P)	4	32124,523862**	514,812006**	0,000035 ^{ns}	0,052858**
Genótipos	3	53900,540419**	1008,219295**	0,002154**	0,131453**
Nível de Al x Genótipos	3	14132,906527 ^{ns}	238,764478 ^{ns}	0,000537 ^{ns}	0,028958 ^{ns}
Resíduo	12	4919,38114	95,448021	0,000241	0,012741
CV (%)		17,46	18,35	3,67	19,89

^{ns} Não significativo; CV (%), coeficiente de variação; ** Significativo, a 5% de probabilidade

TABELA 13A. Resumo da análise de variância para as características comprimento total de raiz (CTR), área de superfície de raiz (ASR), Diâmetro médio de raiz (DMR) e Volume de raiz (VR) de plantas avaliadas aos 28 DAS (dias após a semeadura), em resposta a níveis diferenciados de por alumínio.

FV	GL	Quadrado Médio			
		CTR	ASR	DMR	VR
Nível de P	1	13941,765876 ^{ns}	1574,601014 ^{ns}	0,049538 ^{ns}	0,228919 ^{ns}
Bloco(Nível de P)	4	18681,209345 ^{ns}	487,501249 ^{ns}	0,040350 ^{ns}	0,090553 ^{ns}
Genótipos	3	309322,940979**	4939,585161 ^{ns}	0,039928 ^{ns}	0,524212 ^{ns}
Nível de Al x Genótipos	3	33423,400485 ^{ns}	1628,649326 ^{ns}	0,036299 ^{ns}	0,215409 ^{ns}
Resíduo	12	58840,5418	1652,111074	0,042232	0,245796
CV (%)		33,82	38,24	41,76	41,50

^{ns} Não significativo; CV (%), coeficiente de variação; ** Significativo, a de 5% de probabilidade

TABELA 14A. Resumo da análise de variância para as características comprimento de raiz por classe de diâmetro, raízes muito finas ($\varnothing < 0,5$ mm) RMF, raízes finas ($0,5 \text{ mm} > \varnothing > 2,0$ mm) RF, raízes pequenas ($\varnothing > 2,0$ mm) RP, de plantas avaliadas aos 14 DAS (dias após a semeadura), em resposta a níveis diferenciados de saturação por alumínio.

FV	GL	Quadrado Médio		
		RMF	RF	RP
Nível de P	1	926,362198 ^{ns}	1200,696102 ^{ns}	2,052706**
Bloco(Nível de P)	4	15731,173349**	1348,029620 ^{ns}	3,512639**
Genótipos	3	30591,580758**	2458,090909**	4,400650**
Nível de Al x Genótipos	3	11252,165968 ^{ns}	491,615584 ^{ns}	2,961510**
Resíduo	12	3685,174341	501,533498	0,496725
CV (%)		20,11	22,21	23,91

^{ns} Não significativo; CV (%), coeficiente de variação; ** Significativo, a 5% de probabilidade

TABELA 15A. Resumo da análise de variância para as características comprimento de raiz por classe de diâmetro, raízes muito finas ($\emptyset < 0,5$ mm) RMF, raízes finas ($0,5 \text{ mm} > \emptyset < 2,0$ mm) RF, raízes pequenas ($\emptyset > 2,0$ mm) RP, de plantas avaliadas aos 28 DAS (dias após a semeadura), em resposta a níveis diferenciados de saturação por alumínio.

FV	GL	Quadrado Médio		
		RMF	RF	RP
Nível de P	1	17682,910275 ^{ns}	16,87,589296 ^{ns}	1,407649 ^{ns}
Bloco(Nível de P)	4	4405,634471 ^{ns}	1242,567117 ^{ns}	1,821481 ^{ns}
Genótipos	3	230854,116188**	16206,773407**	10,809231 ^{ns}
Nível de Al x Genótipos	3	27845,973757 ^{ns}	2955,997157 ^{ns}	3,566663 ^{ns}
Resíduo	12	37647,64421	4138,797386 ^{ns}	3,943664
CV (%)		36,86	32,35	36,88

^{ns} Não significativo; CV (%), coeficiente de variação; ** Significativo, a 5% de probabilidade