Melhoramento para adaptação à estresses minerais, com ênfase em adaptação à solos ácidos, tolerância a toxidez de alumínio e eficiência no uso de fósforo em milho

Sidney N. Parentoni, Vera M. C. Alves, Elto E.G.Gama, Manoel X. Santos, Cleso A. P. Pacheco, Paulo E. Guimarãos, Water F. Meirelles, Pedro Hélio E. Ribeiro, Antonio F.C. Bahia Filho, Claudia Guimarães, Edilson Paiva.

Introdução.

Um dos grandes desafios da pesquisa agropecuária tem sido desenvolver soluções tecnológicas que levem a uma redução do risco associado a atividade agrícola. Os fatores de risco na agricultura mais facilmente percebidos pelos produtores tem sido: secas, geadas, doenças e pragas diversas, responsáveis por drásticas reduções na produção. Nos ambientes tropicais, um outro fator importante na redução do risco agrícola (e que pode não ser tão evidente para o produtor) é a capacidade do genótipo de se adaptar favoravelmente à condições adversas do solo como toxidez de alumínio e baixo pH (principalmente na camada abaixo de 20 cm do solo) e ainda a variação exitente entre genótipos quanto a sua eficiência em absorver e utilizar de forma mais eficiente os nutrientes (fósforo, nitrogênio, potássio, etc.) colocados à sua disposição, em face das contínuas variações, principalmente de disponibilidade de água (veranicos).

Na agricultura dita de alta tecnologia, a correção de solo se encarrega de reduzir o efeito tóxico do baixo pH e da saturação de alumínio na camada superficial do solo (0-20 cm). Entretanto, principalmente com o advento do uso de plantio direto, onde as doses de calagem utilizadas tendem a ser cada vez menores e aplicadas superficialmente, existe uma tendência destas limitações (baixo pH e saturações médias a altas de alumínio) ocorrerem cada vez com mais frequência na camada sub-superficial do solo (abaixo de 20 cm). Uma alta saturação sub-superficial de alumínio deve restringir apenas á camada arável, o sistema radicular de genótipos muito sensíveis tanto a toxidez de Al quanto a baixo pH, tornando-os mais vulneráveis a pequenos períodos de seca ou veranicos. No livro " O fósforo em solo tropicais" (Novais et al. 1999), são relatados resultados de diversos estudos realizados em solos da região dos cerrados brasileiros onde tem sido pesquisadas inter-relações entre alternância de períodos de deficits hídricos e disponibilidade de água, com a nutrição mineral do milho, principalmente para fósforo e nitrogênio. Um sumário dos principais pontos de alguns destes estudos são: a) os solos sob cerrado tem baixa capacidade de retenção de água e uma distribuição irregular de chuvas (veranicos), levando a um cenário de repetidos ciclos de umidecimento e secagem durante a estação de crescimento da cultura; b) os latossolos desta área tem alta capacidade de fixação de fósforo sendo que o solo é o grande competidor da planta pelo fósforo disponível; c) pequenas reduções no conteúdo de água nestes solos (muito antes de se atingir o ponto de murcha) reduzem drasticamente a disponibilidade de fósforo para a cultura, e este fenômeno torna-se mais importante com o aumento do teor de argila do solo; d) ao contrário do observado em solos temperados ou em solos de boa fertilidade natural, onde a forma mais comum do

nitrogênio mineral no solo é o nitrato, em solos como Latossolo Vermelho Escuro sob cerrado tem se encontrado N mineral tanto na forma de amônio (principal) quanto na forma de nitrato; e) plantas sob estresse de fósforo tem menor capacidade de absorver água, afetando a absorção de nutrientes via fluxo de massa como é o caso do N; f) a absorção de nitrogênio em milho é drasticamente reduzida sob estresse de fósforo sendo este efeito mais pronunciado sobre a absorção de nitrato do que sobre a absorção de amônio (Magalhães et al., 1996); g) a cultura da soja responde bem à aplicações de fósforo em uma parte localizada do sistema radicular (Machado et al., 1983), enquanto para o milho, o fornecimento de P feito a apenas uma parte do sistema radicular reduz o crescimento da parte aérea (Novais et al., 1985). Os autores sugerem ser esta última, uma das razões da melhor adaptação da soja à áreas recém-abertas de cerrado, enquanto o milho exigiria uma melhor redistribuição do P no perfil do solo (conseguida após alguns anos de cultivo de soja), para atingir melhores produções (Novais et al., 1999).

Estes fatos analisados como um todo, apontam na direção de que, plantas que associem níveis médios a altos de tolerância a alumínio, adaptadas à solos com média a alta acidez e com uma maior eficiência na utilização de fósforo e nitrogênio devem ser mais adaptadas às condições de repetidos ciclos de umidecimento e secagem (veranicos de curta à média duração) que ocorrem nas condições tropicais, principalmente em solos originalmente sob vegetação de cerrado. Verifica-se então que, limitações ambientais que levem a pequenas restrições no suprimento de fósforo devem provocar um efeito cascata em toda a nutrição mineral da planta. Estes fatos indicam que, nas nossas condições de clima e solos tropicais, é necessário que existam programas de melhoramento que busquem obter cultivares com maior tolerância a toxidez de alumínio e maior eficiência na utilização de nutrientes, principalmente fósforo e nitrogênio, visando reduzir o risco da exploração agrícola nas nestes ambientes. Obviamente, no desenvolvimento de cultivares dentro deste tipo de programa de seleção tem-se ainda que buscar resistência às principais doenças e pragas, de forma a maximizar as vantagens adaptativas. Surge então o conceito de seleção para estresses múltiplos (abióticos e bióticos), que tem como objetivo final gerar cultivares que reduzam o risco de insucessos na exploração agrícola.

Um exemplo da importância deste tipo de abordagem pode ser visto em um artigo do USDA publicado recentemente. Menciona-se aí que: "o estudo de plantas e fertilizantes com menor capacidade poluidora do meio ambiente e o desenvolvimento de cultivares com maior eficiência no uso de fertilizantes para produção de grãos, deverá ser o segundo grande desafio a ser vencido no século XXI, ficando apenas atrás da água potável" (USA Geographic Survey, 2000).

Uma análise crítica dos programas de melhoramento atuais nos leva a concluir que o moderno melhoramento de plantas tem produzido cultivares altamente produtivos quando associados a um sistema intensivo de utilização de insumos. A filosofia dos programas de melhoramento de plantas desenvolvidos principalmente a partir da década de 40 até meados da década de 80 tem se baseado na capacidade da pesquisa na área de solos em desenvolver tecnologia para manejo de nutrientes e para corrigir deficiência dos solos. Dentro desta linha, o fitomelhorista em geral conduz seu programa utilizando a mais moderna tecnologia desenvolvida na área de correção de

solos. Neste sistema, a presença de qualquer variabilidade genética para tolerância a estresse de solo não será identificada, podendo, de fato, estar-se selecionando para uma reduzida eficiência no uso de insumos. A importância do trabalho de melhoramento para tolerância a estresses é enfatizada por Duvick, 1992. O autor afirma que, um dos fatores responsáveis por manter uma taxa de crescimento na média de produtividade de milho americana de 74 kg/ha/ano nos últimos 70 anos, tem sido o ganho obtido em adaptação a estresses abióticos (baixa fertilidade, seca e baixas ou altas temperaturas) e estresses bióticos (resistência a pragas e doenças).

O Brasil possui grandes formações ecofisiográficas de solos com alta freqüência de acidez, associada à toxidez de alumínio, como por exemplo: a região dos cerrados; a área de Latossolos Amarelos presentes nas chamadas terras altas da região Amazônica e nos tabuleiros costeiros da orla litorânea do país e ainda os planaltos subtropicais que vão do Sul do Paraná ao Norte do Rio Grande do Sul. Este fato faz com que, estudos em adaptação de plantas a solos ácidos, com ênfase em tolerância a toxidez de alumínio tenham sido historicamente uma importante linha da pesquisa agrícola no país. O esforço conjunto de investigação conduzido por várias instituição públicas e privadas tanto na área de manejo e fertilidade de solos, quanto na área de melhoramento de plantas para adaptação a solos ácidos, foi responsável por exemplo, com que de 1970 a 1999, a área cultivada na região dos cerrados mais que dobrasse, com a produtividade média crescendo 60% e a produção de grãos passando de 6 para mais de 27 milhões de ton. grãos/ano. Nas últimas três décadas, 15 milhões de ha de cerrado no Brasil passaram a ser utilizados para produção agrícola, produzindo 30% da safra do país de arroz, milho e soja, 20% do café e 15% do feijão. Outros 35 milhões de ha de pastagens melhoradas implantados na região dos cerrados suportam hoje um rebanho de 53 milhões de cabeça de gado, produzindo 40% da carne e 12% do leite do país.

Todo este progresso na área de adaptação de plantas cultivadas a ambientes com acidez (superficial e ou sub-superficial), foi fruto de pesquisas principalmente nas áreas de nutrição mineral de plantas, manejo de agrosistemas e genética e melhoramento. O advento de novas técnicas como a biologia molecular devem, num futuro próximo, somar conhecimentos às disciplinas tradicionais já mencionadas, contribuindo para o desenvolvimento de cultivares cada vez mais adaptados à estes ambientes.

Avaliação da tolerância a toxidez de alumínio/adaptação a solos ácidos.

Crescer plantas no campo em solos ácidos tem sido a base de programas de seleção para tolerância a alumínio e adaptação a solos ácidos. Avaliações em campo envolvem a seleção de plantas individuais (no caso de autógamas) ou linhagens superiores (autógamas ou alógamas) avaliadas em fileiras curtas e teste posterior em ensaios repetidos em vários ambientes. A vantagem deste tipo de avaliação sobre aquelas conduzidas em casa de vegetação é que o crescimento dos genótipos é feito nas condições naturais de solo e clima sendo obtidos dados de produção que refletem os efeitos do estresse durante todo o ciclo de desenvolvimento da planta. Os maiores

problema em avaliações em campo são a alta variabilidade das áreas experimentas e o confundimento causado pela resistência diferencial dos genótipos à pragas e doenças e sua tolerância diferencial a fatores como seca e acamamento, associados ainda ao tempo necessário para a avaliação (uma estação de crescimento).

A forma mais simples de se avaliar tolerância a toxidez de alumínio em milho tem sido o uso de solução nutritiva, onde se utiliza um controle sem Al. e a mesma solução com níveis tóxicos de Al. Dois efeitos principais causados pelo alumínio em estudos em solução nutritiva tem sido relatados na literatura: a) o alumínio causa distúrbios na absorção, transporte e utilização de nutrientes como Ca, K e P; b) raízes imersas em solução com concentração apropriada de alumínio (variável com a espécie de planta), mostram redução acelerada da elongação de raiz. Por este motivo, redução no crescimento de raiz tem sido o parâmetro mais utilizado para se determinar tolerância de genótipos ao alumínio. Em geral o critério de seleção utilizados nestes ensaios se baseia na redução no crescimento da raiz seminal de plântulas crescidas por 5 a 7 dias na solução com alumínio, comparado com uma solução controle sem alumínio. O índice de seleção utilizado pode ser o crescimento líquido da raiz seminal; CL = comprimento da raiz após 5 dias na solução (CF), menos o comprimento da raiz antes de ir para a solução (CI). Pode-se ainda utilizar o crescimento relativo da raiz seminal que é obtido dividindo-se CL por CI. Os valores obtidos são corrigidos pelos mesmos dados obtidos na solução sem Al. Estudo de avaliação em solução nutritiva com 6 ppm de alumínio envolvendo famílias F3:4 obtidas do cruzamento entre uma linhagem de milho altamente tolerante a alumínio (Cateto Al 237/67) e outra susceptível (L53) mostrou alta herdabilidade no sentido amplo para CRRS ao nível de médias de famílias, (**h2m** = 95.6%) enquanto as herdabilidades ao nível de plantas individuais no sentido amplo (**h2p**) e no sentido restrito (**h2r**) mostraram valores mais baixos (49,2% e 32,8%), indicando que o uso de CRRS ao nível de média de famílias é um índice mais confiável do que CRRS obtido ao nível de plantas individuais (Martins et al, 1999).

Dentre as plantas cultivadas, existe grande variabilidade quanto ao seu grau de tolerância a toxidez de alumínio (Tabela 1). No grupo das extremamente tolerantes incluem-se mandioca, braquiaria e caupi e no extremo de suscetibilidade estão cenoura, espinafre, algodão e feijão de cor. Howeler et al. 1991 relatam que em seqüência decrescente de tolerância a alumínio tem-se capim andropogon, capim braquiária, mandioca, estilosantes, capim jaraguá, café, arroz, capim elefante, milho, feijão preto, soja, sorgo, pueraria, algodão e feijão de cor.

Herança da tolerância a toxidez de alumínio/adaptação a solos ácidos.

Em geral, estudos de herança da tolerância a toxidez de alumínio tem sido feitos em condições controladas (geralmente solução nutritiva), enquanto a determinação de variabilidade genética e a seleção tem sido realizadas em solo com alta saturação de alumínio, onde, além da toxidez de alumínio, diversos outros fatores de restrição ao desenvolvimento de plantas irão interferir no desempenho dos genótipos aí avaliados.

A grande maioria dos estudos de herança da tolerância a alumínio tem sido conduzida em trigo e nesta cultura estes estudos apontam na direção de que um pequeno número de genes controlariam esta característica, baseado em distribuição bimodal de fenótipos com segregação do tipo 3:1 para tolerância/sensibilidade geralmente encontrada. Outros estudos sugerem que tolerância a alumínio nesta espécie seja controlada por dois ou três genes (Camargo 1981). Tolerância a alumínio tem sido estudada também em outras gramíneas mas em menor intensidade que em trigo, e uma grande variação de tipos de herança tem sido encontrada. Por exemplo, herança monogênica e digênica tem sido relatada em cevada, centeio e sorgo,enquanto em milho tem sido encontrada herança poligênica. Resultados de estudo de herança da tolerância a alumínio em várias culturas são mostrados na Tabela 2.

Quanto ao modo de ação gênica, tolerância a alumínio tem sido reportada como característica dominante. Entretanto, vários estudos demonstram que tanto o número de genes quanto o modo de ação gênica encontrado pode variar de acordo com o nível de alumínio utilizado na solução. Em geral não tem sido verificado efeito materno ou citoplasmático na herança da tolerância a alumínio.

Adicionalmente à existência de genes maiores conferindo grande variação para tolerância a alumínio, existem evidências sugerindo que genes modificadores podem ter papel importante em modular o efeito de genes maiores de tolerância, baseado por exemplo ne transferência incompleta de um gene maior de tolerância a toxidez de alumínio obtida via retrocruzamento (Delhaize et al., 1993a; Jonhson et al. 1997).

Para a característica produção em solos ácidos em milho, estimativas de componentes genéticos em populações avaliadas em solos ácidos com alta saturação de alumínio tem sido feitas pelo programa de pesquisa do CIMMYT (Narro et. al., 1999). Um sumário destes resultados segue abaixo: a) Duque-Vargas et al., 1994 encontraram que a variância genética aditiva (σ^2_A) foi de magnitude próxima da variância de dominância (σ^2_D) para rendimento de grãos (0,15 e 0,13 respectivamente) e que a interação σ^2_A x ambiente foi altamente significativa; b) Borrero et al., 1995 verificaram que σ^2_D foi mais importante que σ^2_A e novamente observou-se alta interação σ^2_A x ambiente, e A herdabilidade no sentido restrito para peso de grãos em solos ácidos foi de 35%; c) Salazar et. al., 1997 mostrou inexistência de efeito materno para produção de grãos em solos ácidos; d) Ceballos et. al., 1998, mostraram que, para peso de grãos, tanto em solo ácido como não ácido os efeitos de dominância foram superiores aos efeitos epistáticos; e) análise de trialelos a partir de 50 linhagens da população de milho SA8 enontrou que efeitos de CGC e CEC para produção de grãos em solos ácidos foram altamente significativos, sendo observada uma super-estimação dos efeitos de CGC. Os componentes de variância do tipo σ^2_{AD} e σ^2_{AA} explicaram 79% e 19% da variância genética, sendo ambos altamente significativos e a σ^2_A explicou menos de 2% da variância genética total.

Deve-se observar que enquanto a maioria dos estudos de herança da tolerância a alumínio é conduzida em ambiente controlado de laboratório (ensaios de solução nutritiva conduzidos em casa de vegetação, câmara de crescimento, etc.), os programas de seleção visam obter genótipos tolerantes a alumínio mas com bom desempenho em solos ácidos e se possível também com capacidade de responder à melhoria do ambiente. Neste caso,

existe um confundimento entre seleção para tolerância a alumínio e seleção para adaptação a todo um contínuo de características que limitam a produção das culturas em solos ácidos. Observa-se também que a grande maioria dos trabalhos na área de melhoramento para esta característica consiste somente na caracterização da variabilidade genética existente. Um menor número de estudos tem sido realizado em algumas espécies com utilização de um programa de seleção mais elaborado, visando melhoramento para tolerância a alumínio e adaptação a solos ácidos.

Seleção para tolerância a toxidez de alumínio/adaptação a solos ácidos e eficiência na utilização de fósforo.

De acordo com Devine, 1976 , para se obter resultados satisfatórios em um programa de melhoramento, para tolerância a solos ácidos com ênfase em tolerância a toxidez de alumínio, são necessárias as seguintes informações: a) existência de técnicas de seleção para identificar tolerância; b) existência de variabilidade genética na espécie estudada; c) a característica deve ser herdável e estimativas de herdabilidade devem estar disponíveis; d) não devem existir correlações genotípicas altamente negativas entre tolerância e características agronomicamente importantes; e) deve ser possível fazer estimativas a nível de campo do progresso obtido com a seleção para estresse. Este componentes são inter-relacionados de várias maneiras. Por exemplo, um bom screening deve levar a um melhor entendimento da genética da tolerância; progresso obtido para produção a nível de campo sugere a inexistência de correlações negativas com produção; a escolha do método de screening pode influenciar o método de melhoramento utilizado e vice-versa.

Um ponto importante a ser considerado na seleção é o nível de estresse a ser utilizado, tanto em solução nutritiva quanto em solo, para maximizar a diferença entre genótipos. No caso de culturas alógamas, o uso de híbridos em estudos de campo envolvendo estresses como toxidez de alumínio e acidez de solo, traz algumas vantagens em relação a avaliação de linhagens per se: a) plântulas de híbridos exibem maior vigor; b) híbridos em geral são mais tolerantes a estresses e produzem mais grãos que o pai mais tolerante; c) híbridos tendem a produzir maior sistema radicular que suas linhagens parentais, explorando maior volume de solo; d) estudos em ambiente sob estresse envolvendo linhagens em culturas alógamas apresentam alta variabilidade entre e dentro de parcelas experimentais, levando a altos coeficiente de variação e baixa capacidade de se detectar diferenças entre tratamentos. Trabalho pioneiro nesta área é relatado por Bahia Filho et al., 1978 que, avaliando 363 linhagens de milho em solo com 55% de saturação de Al verificaram que, 60 dias após o plantio, 68,7% delas estavam mortas, 3,6% receberam nota 4 e nenhuma delas recebeu nota 5, numa escala visual de 1 a 5 (1 significando plantas mortas e 5 indicando muito bom aspecto visual). Um fato observado em avaliações de dialelos de linhagens em solução nutritiva com alumínio, tem sido um grau razoável de correlação entre capacidade combinatória das linhagens para a variável crescimento relativo de raiz seminal em solução nutritiva, com o comportamento "per se" da linhagem para esta variável (Parentoni et al., 1995). Esta observação indica importância de efeitos aditivos no controle desta característica em milho e permitiria utilizar a avaliação "per se" de linhagens em solução nutritiva para inferir seu

potencial de uso em cruzamentos visando tolerância a toxidez de alumínio.

Dentro do programa de adaptação de milho a solos ácidos conduzido pela EMBRAPA, dados de correlação entre peso de espigas ou grãos em solo ácido com 36 a 60% de saturação de Al e tolerância a toxidez de alumínio em solução nutritiva para um grande número de genótipos, tem encontrado correlações médias (próximas de 0,5) indicando, como seria esperado, que toxidez de alumínio não é o único fator envolvido na adaptação de milho a solos ácidos. Deve ser enfatizado que, no campo, a seleção é feita para solos ácidos e não apenas para Al. Isso porque, por exemplo, para que possamos obter um nível de 45% de saturação de Al no solo, os níveis de fósforo, cálcio e magnésio não podem estar altos. Além disso existem estudos mostrando que nem sempre, genótipos tolerantes a toxidez de alumínio em solução nutritiva são também tolerantes a baixo pH e vice-versa, tornando ainda mais complicada a transferência direta de resultados de solução nutritiva para campo. Assim, no campo, se faz seleção para todo um complexo ligado a solos ácidos e não apenas para Al. Deste modo, materiais selecionados como altamente tolerantes a Al em solução nutritiva podem apresentar performance apenas mediana em solo com diferentes níveis de acidez e vice - versa.

Um dos aspectos importantes em programas de seleção conduzidos em um limitado número de ambientes contrastantes (ex.,solo ácido e fértil) é a escolha de índices de seleção apropriados, que permitam selecionar simultaneamente genótipos com boa tolerância ao estresse e capazes de responder a melhoria do ambiente. Estes ensaios em geral avaliam simultaneamente em ambiente com e sem estresse um grande número de genótipos. O índice mais simples utilizado para separar cultivares tolerantes e sensíveis tem sido dividir a produção no nível sem estresse pela produção obtida no nível com estresse. Um problema com o uso deste índice é que o mesmo tende a favorecer cultivares de baixa produção e não responsivos à melhoria do ambiente. Maiores detalhes sobre índices de seleção para avaliações conduzidas em ambientes contrastantes podem ser encontrados em Parentoni et. al., 2000. Depois de uma fase inicial de identificação de genótipos eficientes em um número limitado de ambientes, estes materiais passam por avaliação em grande número de locais e pelo menos 4 anos de ensaios, dentro do programa de melhoramento.

O Brasil foi o país pioneiro em melhoramento de plantas para adaptação a solos ácidos, sendo que os primeiros trabalhos de seleção conduzidos com trigo iniciaram-se em 1914, muito antes da existência de qualquer base teórica sobre os processos que ocorrem na relação solo-planta em condições de acidez do solo (Borlaug et al., 1997). A sintomatologia observada em cultivares de trigo plantados em solos ácidos nesta época era denominada de "crestamento". Por volta de 1942 pesquisadores brasileiros foram capazes de atribuir os sintomas de "crestamento" à acidez do solo e no final da década ficou demonstrado que a causa principal destes sintomas era a toxidez de alumínio no solo. Desde esta época, crescer plantas no campo em solos ácidos tem sido a base de programas de seleção para tolerância a alumínio e adaptação a acidez, sendo que ao longo do tempo, grandes progressos foram obtidos no desenvolvimento de cultivares para estas condições. Apesar de eficiente, esta metodologia apresenta algumas limitações tais como: a) áreas experimentais nestas condições em geral tem alta variabilidade, diminuindo a precisão

dos experimentos; b) existe um confundimento entre tolerância a acidez com a resistência diferencial dos genótipos a diversos outros estresses nutricionais e ainda com sua resistência diferencial a pragas e doenças e sua tolerância a outros fatores como seca e acamamento; c) o tempo exigido para cada avaliação é longo (são necessárias avaliações por pelo menos dois anos). Por estas razões, foram desenvolvidas metodologias de screening para fatores específicos de estresse, como por exemplo tolerância a toxidez de alumínio. A metodologia mais comum neste caso tem sido o uso de solução nutritiva com níveis tóxicos de alumínio os quais variam de acordo com a cultura. Deve-se ressaltar que esta metodologia estuda apenas o efeito isolado da toxidez de alumínio, enquanto a nível de solo acido existe uma complexa inter-relação entre toxidez de alumínio, baixo pH, deficiências minerais e disponibilidade de água por exemplo em função de variação de tamanho do sistema radicular entre genótipos tolerantes e sensíveis.

O programa de melhoramento de milho para adaptação a solos ácidos da EMBRAPA-Milho e Sorgo iniciou-se em 1975, sendo que ainda no início da década de 60 já vinham sendo conduzidos trabalhos de pesquisa em fertilidade de solos e nutrição de plantas em milho em solo sob cerrado. Este programa tem contado com uma equipe multidisciplinar nas áreas de genética e melhoramento de plantas, fertilidade de solos, nutrição de plantas, estatística e fitopatologia (Bahia Filho et. al., 1997). Durante as décadas de 70 e 80, a grande prioridade do programa foi gerar germoplasma adaptado a solos ácidos, baseado principalmente no binômio tolerância a alumínio e produção em solos ácidos e férteis. A partir da década de 90 foi feita uma ampla caracterização de grande parte do germoplasma elite do programa (incluindo materiais que não haviam sido previamente selecionados em condição de solo ácido), quanto a sua tolerância a toxidez de alumínio, adaptação a solos com diferentes níveis de acidez e sua eficiência na utilização de fósforo (Parentoni et. al., 1999). Trabalhos de eficiência de utilização de nitrogênio nestes materiais estão em fase preliminar.

Dentro do programa de seleção em milho para adaptação a solos ácidos, três tipos básicos de resposta à estresses tem sido observado entre diferentes cultivares (variedades, híbridos e linhagens de milho), quando avaliados em solução nutritiva com Al., em solos ácidos e em solos férteis. O primeiro grupo é formado por cultivares altamente tolerantes a Al. em solução nutritiva, capazes de obter razoáveis níveis de produção em solo com alta acidez, mas que não respondem a melhoria do ambiente. Um exemplo típico deste grupo tem sido a variedade de milho BR 136. Um segundo grupo seriam cultivares muito sensíveis a Al. em solução nutritiva, com baixíssima adaptação a solos com níveis médios a altos de acidez, mas altamente responsivos à correção do ambiente. Neste grupo estão alguns híbridos comerciais que foram obtidos principalmente a partir de germoplasma de origem temperada. Um terceiro grupo, inclui cultivares com média a alta tolerância a Al. em solução nutritiva, alta adaptação a solos ácidos e grande capacidade de resposta a melhoria do ambiente (uso de corretivos e fertilizantes). Este tem sido o tipo de resposta procurado dentro do programa de melhoramento para adaptação a solos ácidos da EMBRAPA-Milho e Sorgo

Nas avaliações em solo ácido, o programa tem utilizado áreas sob Latossolo

Vermelho Escuro, textura argilosa e níveis de saturação de Al. na camada superficial variando de 36 a 60%. Tem sido verificado que, para screening de linhagens, não deve se ultrapassar níveis de cerca de 45% de saturação de Al. no solo pois a morte de grande número de genótipos reduz muito a precisão experimental.

Uma primeira fase do programa de adaptação de milho a solos ácidos da EMBRAPA compreendeu o período do final da década de 70 ao final dos anos 80. Alguns estudos mais relevantes durante este período foram: screenings de variedades e linhagens (Gama et. al., 1986; Bahia Filho et. al., 1978;), avaliação de resposta à melhoria ambiental (Naspolini Filho et. al., 1981; Gama et al. 1986); avaliações do germoplasma disponível para tolerância a toxidez de alumínio em solução nutritiva (Lopes et. al., 1986); capacidade combinatória deste germoplasma em solução nutritiva e em solos ácidos e férteis (Lopes et al., 1987; Eleutério et. al., 1988). Neste período, foram ainda conduzidos estudos comparando germoplasma temperado e tropical de milho quanto à sua tolerância a toxidez de alumínio, estudos de alterações na tolerância a toxidez de alumínio após seleção para produção em solos ácidos e estudos de herança da tolerância a toxidez de alumínio em solução nutritiva (Magnavaca et. al., 1987a,c). Iniciou-se um programa de desenvolvimento de híbridos de milho para solo ácidos, conforme descrito em Bahia Filho et. al., 1997, o qual levou ao desenvolvimento dos primeiros híbridos duplos provenientes do programa de seleção para adaptação a solos ácidos (Magnavaca et. al., 1988). Esta primeira fase do programa de seleção de milho para tolerância à alumínio e adaptação a solos ácidos é descrita em detalhes em Parentoni et al., 1999.

Conforme discutido acima, durante as décadas de 70 e 80, a grande prioridade do programa foi gerar germoplasma adaptado a solos ácidos, baseado principalmente no binômio tolerância a alumínio e produção em solos ácidos e férteis. A partir da década de 90 aos objetivos anteriores, foram adicionados os seguintes: a) caracterização do germoplasma disponível para eficiência na utilização de fósforo; b) obtenção de genótipos contrastantes com diferentes níveis de adaptação a solos ácidos para serem utilizados em estudos de mecanismos e estudos de biologia molecular ligados à tolerância à toxidez de alumínio e eficiência na utilização de fósforo; c) estudos de capacidade combinatória de linhagens elites do programa de tolerância a estresses minerais em solução nutritiva com Al., em solos ácidos e férteis e sob ambiente com e sem estresse de fósforo; d) identificação de genótipos que associem tolerância a múltiplos estresses com alta produtividade e estabilidade de produção.

A condução de estudos de eficiência na utilização de fósforo tem mostrado maior nível de complexidade do que aqueles inicialmente encontrados nos estudos de tolerância a toxidez de Al. Um deles é que, até o momento, não está disponível uma metodologia de screening em solução nutritiva que seja comprovadamente eficaz para determinar eficiência na utilização de fósforo. Um dos problemas é que, sendo o fósforo um nutriente absorvido via difusão, é difícil em solução nutritiva, obter um ambiente que imponha as mesmas restrições de acesso ao nutriente que acontecem no solo. Um complicador adicional foi demonstrado por Alves et. al., 1988 que mostrou que o teor de P encontrado na semente tem grande influência sobre os resultados obtidos com estudos com plântulas em solução nutritiva, e que este problema não é resolvido quando se retira o resto da semente logo após a germinação. A inexistência

de uma metodologia simples e rápida de screening para eficiência na utilização de fósforo, levou ao desenvolvimento de uma técnica de avaliação de cultivares em solo com e sem estresse de fósforo com o objetivo de se identificar genótipos contrastantes quanto a sua eficiência na utilização deste nutriente. Baseado no conceito de nível crítico de fósforo em latossolos, obtido a partir da quantidade de P recuperada pelo extrator e a quantidade de P adicionada ao solo, foram identificados níveis de 5 e 10 ppm de P, representando respectivamente 50% e 100 % do nível crítico para o Latossolo Vermelho Escuro (LE) da região de Sete Lagoas-MG (Bahia Filho et. al., 1997). Uma área de LE fase cerrado foi então corrigida para pH próximo de 5 sendo que metade da área teve seu nível de fósforo corrigido para 5 ppm e a outra metade para 10 ppm. Um primeiro grupo de 100 híbridos simples formado a partir de linhagens provenientes do programa de adaptação a solos ácidos e também de linhagens sem seleção prévia para condição de acidez foi avaliado nestas áreas no verão 94/95 (Parentoni et. al., 1996 ; Parentoni et al., 1999). O critério de seleção utilizado no caso de avaliação per se de genótipos foi produção sob estresse de fósforo (5 ppm P), dividido pela produção no nível sem estresse de fósforo (10 ppm de P). Buscou-se também identificar genótipos eficientes e responsivos ao fósforo. Os experimentos foram irrigados, buscando-se reduzir a interação água x fósforo. Foi verificada uma redução média de peso de espigas entre níveis de P de 16,7%, com uma amplitude de variação entre níveis para os genótipos avaliados de menos de 1% até 40% de redução. Outras alterações fenotípicas verificadas no ambiente com estresse de fósforo foram: aumento no ciclo da planta (florescimento e umidade na colheita) respectivamente de 3 dias e 2,8% de umidade; redução na altura de planta próximo de 12%.

Para conseguir-se uma melhor discriminação entre genótipos quanto a seus níveis de eficiência a fósforo, tem-se trabalhado nos últimos anos com níveis de P no solo de 2 ppm e 15 ppm respectivamente, o que tem levado a uma redução média na produção entre níveis de cerca de 30% com amplitude de variação de 0 a 80% . Estudos de avaliação do conteúdo de P nas diversas partes da planta (colmo, folhas, palhas e grãos) nestas duas áreas, utilizando 90 híbridos simples de milho indicaram alta correlação entre absorção de P e produção de grãos no nível baixo - 2 ppm de P (Figura 1), indicando que, nestas condições, eficiência de absorção pode ser mais importante que outras formas de eficiência interna de uso de P tais como translocação para os grãos, remobilização, etc. Até o presente já foram avaliados para eficiência na utilização de P cerca de 700 híbridos e 150 linhagens de milho. Com base na frequência em que apareciam algumas linhagens tanto dentre os híbridos mais eficientes à P quanto naqueles menos eficientes, foram selecionadas linhagens candidatas a eficiência ou ineficiência a este nutriente e foram obtidos diversos dialelos entre estas linhagens. O processo de avaliação de um grande grupo de híbridos simples, identificação de linhagens mais frequentes entre os híbridos contrastantes quanto à sua eficiência a fósforo, obtenção de dialelo entre estas linhagens e avaliação deste dialelo em solos ácidos e férteis e sob 2 níveis de fósforo, já foi repetido 3 vezes até o momento (Parentoni et. al., 1999). Foi avaliado um primeiro dialelo entre 8 linhagens, um segundo entre 9 linhagens e um terceiro entre 13 linhagens. Alguns pontos verificados nestes estudos foram: a) os efeitos de capacidade geral de combinação (CGC) e capacidade específica de combinação (CEC) foram significativos nos 3 dialelos, entretanto os efeitos aditivos (ϕg) para peso de espigas sob estresse de fósforo tem se mostrado superiores aos efeitos não aditivos (ϕs); b) a interação CGC x ambiente (com e sem restrição de fósforo) foi significativa nos 3 dialelos, enquanto a interação CEC x

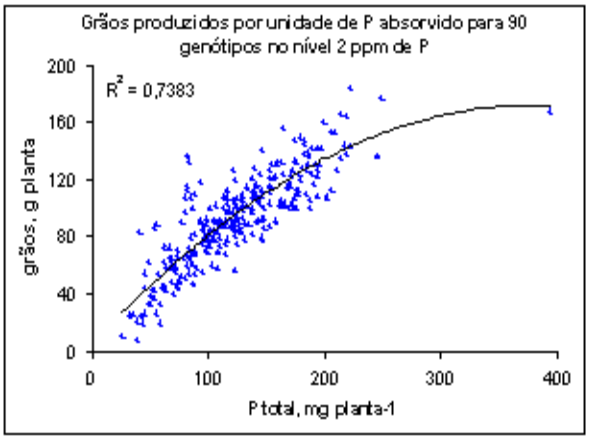
ambiente (com e sem restrição de fósforo) foi não significativa nos 3 dialelos. Mudanças na capacidade combinatória de uma linhagem entre o ambiente sem estresse de fósforo para o ambiente com estresse de fósforo tem sido utilizadas para identificar linhagens contrastantes quanto a sua capacidade de produzir híbridos com maior ou menor grau de adaptação ao estresse de fósforo. Foram identificadas linhagens capazes de produzir híbridos com alta eficiência na utilização de fósforo e linhagens que só produzem híbridos superiores em ambiente sem estresse de fósforo.

Linhagens originárias de avaliações per se e em combinações híbridas para tolerância a toxidez de alumínio, adaptação a solos com diferentes níveis de acidez e eficiência na utilização de fósforo tem sido intensivamente utilizadas como parentais em híbridos experimentais do programa da EMBRAPA. A partir deste grupo de linhagens foram desenvolvidos híbridos como os BRS 3060, BRS 3150, BRS 3151, BRS 3003, BRS 1001 e BRS 1010. Este último híbrido (avaliado com o código de HS-16 B) tem associado alta produtividade (foi o primeiro colocado na Rede de Ensaios Nacionais Precoces nos anos de 99/2000 e 2000/2001 e o segundo colocado em 2001/2002) associado a uma ampla adaptabilidade aos ambientes do Brasil Central e uma alta estabilidade de produção (França et al., 2002). Estes resultados apontam no sentido de que programas de seleção para adaptação à estresses minerais devem ser ferramentas valiosas na geração de genótipos superiores.

Genótipos identificados como parte desta linha de pesquisa em adaptação a estresses minerais tem sido avaliados em solos ácidos da África (Camarões) e América Central (Guadaloupe), mostrando ótimo desempenho nestas condições.

Os padrões contrastantes para tolerância a toxidez de alumínio, adaptação à solos ácidos e eficiência a fósforo identificados dentro do programa de seleção para estes estresses, vem sendo utilizados em estudos de biologia molecular da tolerância a estresses minerais. No cado de tolerância a toxidez de alumínio, o uso de marcadores moleculares permitiram identificar 5 QTLs que explicam 60% da variação fenotípica observada para esta característica (Ninamango et al. - submetido revista Euphytica, 2002). Trabalhos usando a técnica de "differential display" tem permitido identificar genes envolvidos na tolerância a alumínio e eficiência na utilização de fósforo.

Figura 1 - Gráficos com a produção de grãos em g/planta (eixo y) e a quantitade de P total absorvida (mg/planta), para 90 genótipos de milho avaliados em um Le sob 2 níveis de P (2 ppme 15 ppm). Embrapa-Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.



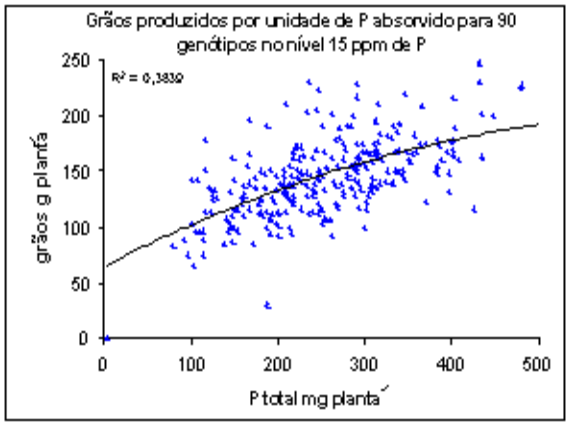


Tabela 1 - Tolerância a alumínio em várias culturas, a partir de referências de diversos autores. EMBRAPA-Milho e Sorgo, Sete Lagoas - MG (ver referências em Parentoni et al., 2001).

Extremamente Alta	Muito Alta	Alta	Media	Baixa	Muito Baixa
Andropogon Gayanus [2]	Arroz [1,5,8]	Centeio [8]	Batata Doce[10] Milho[2,4,5]	Cebola[1]	Cenoura[1]
Braquiaria Decubens[2]	Café [4]	Aveia [1]	Amendoim[10] Repolho[1]	Cevada[1]	Espinafre[1]
Mandioca[3]	Batata [8]	*Aegilopis Uniarista* [9]	Trigo[1] Milheto[1]	Beterraba[1]	Aipo[1]
Stylosanthes capitata[2]	Pigeon pea (*Cajanus Caja*) [8]		Ervilha[1] Berinjela[1]	Abóbora[1]	Algodão[6]
Capim Jaraguá (*Hyparrenia rufa*)[2]	*Pueraria phaseoloides* [11]		Soja[1] Paspalum[15]	Sorgo[1,4,7]	Feijão de cor [7]
Caupi (*Vigna unguiculata*) [8]	Seringueira [16]		Capim Elefante[4]	Nabo[1]	Alfafa[14]
Stylosanthis Guianensis [8]	Dendê [16]		*Trifolium subterraneum*[14]	Feijão Preto[4]	
Araquis (*Arachis hypogea*) [8]			*Lotus penduculatus*[14]	Centrosema[11]	
				Leucena[12]	

1-Tanaka and Hayakawa, 1975 (citado por Duncan et al. 1990);. 2- Spain, 1979; 3 Howeler, 1985; 4 Sanchez, 1976; 5- Salina and Sanches, 1977; 6- Kamprath 1970; 7-Gourley,1987; 8- Little 1988 (2 a 8 citados por Howeler, 1991); 9- Miller et al. 1997; 10- Howeler et. al. 1991; 11- Ziegler et al. 1995; 12- Kerridge et al. 1991; 13- Kurniatun et al. 1995; 14- Wheeler and Dodd, 1995; 15 Mackay, 1991; 16-Yost,1996.

Tabela 2. Herança da tolerância a toxidez de alumínio em diversas culturas. . EMBRAPA-Milho e Sorgo, Sete Lagoas - MG, (ver ref. em Parentoni et al., 2001).

Cultura (Espécie)	Genes para tolerância	Tipo de avaliação	Referências
Aveia (Avena sativa L.)	1 a 2 dominantes	Recresc. de raiz	Sanchez-Chacon, 1998;Wagner, 1999
Cevada *(Hordeum vulgare* L.)	1 dominante	Hematoxilina	Minnela & Sorrells, 1997
	Mongênica a poligênica	Crescimento raiz	Xu et al., 1993
	Monogênica	-	Reid 1971, citado por Garvin, 1999.
Arroz *(Oriza sativa* L.)	Poligênica aditiva	Índice de 0 a 1	Wu et al., 1997
	Poligênica aditiva	Crescimento raiz	Khatiwada et al.,1996
	Poligência aditiva	Crescimento raiz e massa seca	Ferreira et al., 1988
	Poligênica (tolerân. foi dominante)	Crescimento raiz	Ferreira et al, 1997
Centeio *(Secale cereale* L.)	1 a 2 dominantes	Recrescimento de raiz	Gallego & Benito, 1997
	Monogênica	-	Chrzastek et al., 1995
Trigo *(Triticum aestivum* L.)	Monogênica dominante	Recrescimento de raiz	Lagos et al., 1991
	Monogênica dominante	Recrescimento de raiz	Camargo, 1981
	2 aditivos	Índice 1a 10, avaliação a campo	Nodari et al, 1982
	2 dominantes ou 1 recessivo	Crescimento de raiz	Rajaram et al.,1991
	Monogênica dominância incompleta	Coloração com hematolina	Wheller, et al.1992
	2 a 3 dominantes	-	Aniol, 1997
	1 dominante	Hematoxilina	Jonhnson et al.1997
	Monogênica	-	Luo &Dvorak, 1995
	2 genes	-	Sorrells et al. 1996
	Monogênica	-	Delhaize et al. 1993
	1 dominante	Crescim. de raiz	Basu et al., 1997
Sorgo (*Sorghum Bicolor L.*)	1 dominante	Crescim. de raiz	Schaffert et al.2000
	Poligênica	Núm. raízes –solo	Flores et al., 1990
Milho (*Zea Mays L.*)	Monogência	Crescim. de raiz	Rhue et al., 1978
	Poligência	Crescim. de raiz	Magnavaca, 1987b
	Poligência	Cresc. de raiz	Lima et al. 1995
	Monogênica	**Escala visual**	Moon et al.,1997
Alfafa (Medicago)	**Poligênica**	Massa seca	Campbell et al.1993
Soja (*Glycine max*)	Poligênica aditiva	Crescimento raiz –	Spehar, 1996; Bianchi-Hall et al. 1998.

	Poligência	Cresc. de raiz	Lima et al. 1995
	Monogênica	**Escala visual**	Moon et al.,1997
Alfafa (Medicago)	**Poligênica**	Massa seca	Campbell et al.1993
Soja (*Glycine max*)	Poligênica aditiva	Crescimento raiz –	Spehar, 1996; Bianchi-Hall et al. 1998.

Literatura citada.

Alves, V.M.C.; Vasconcelos, C.A., Pitta, G.V.E., Maganavaca, R. 1988. Seleção de genótipos de milho para eficiência a fósforo. Pesq. agrop. Bras. 23(10): 1083-1090.

Bahia Filho, A.F.C., França, G.E., Pitta, G.V.E., Magnavaca, R, Mendes, J.F., Bahia F.G.F.T.C , Pereira, P., 1978. Avaliação de linhagens e populações de milho em condições de elevada acidez. Anais da XI Reunião Brasileira de Milho e Sorgo. Piracicaba, 26-30 julho 1976. pp 51-58. ESALQ, Piracicaba, Brasil.

Bahia Filho, A.F.C., Magnavaca, R., Schaffert, R., Alves, V.M. 1997 Identification, utilization and economic impact of maize germplasm tolerant to low levels of phosphorus and toxic levels of exchangeable aluminum in Brazilian soils. IN Proceedings of the Fourth International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, 17-24 March, 1996. p. 59-70.

Borlaug, N.E.; Doswell, C.R. 1997. The Acid Lands: One Of Agriculture Last Frontiers. In: Moniz, A.C.; Furlani, A.M.C.; Schaffert, R.E.; Fageria, N.K.; Rosolem, C.A.; Cantarella, H.(Eds.) Plant-Soil Interactions at Low pH: sustainable agriculture and forest production. Campinas: Brazil Soil Science Society, 1997. p.5-15.

Borrero, J.C. S.; Pandey, H.; Ceballos, R. Magnavaca, R.; Bahía Filho, A.F.C. Genetic Variances, for Tolerance to Soil Acidity in a Tropical Maize Population. **Maydica** v.40, p.283-288, 1995.

Camargo, C.E.O. Melhoramento do trigo: I. Hereditariedade da tolerância à toxicidade do alumínio. Bragantia, v.40, p.33-45, 1981.

Ceballos, H.; Pandey, S.; Narro, L.; Pérez-Velásquez, J.C. Additive, dominant, and Epistatic Efeccts for Maize Grain Yield in Acid and Non-acid soils. **Theorethical Applied of Genetics**, v.96, p.662-668, 1998.

Delhaize, E., P.R. Ryan, P.J. Randall. 1993. Aluminum tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L). II. Aluminum-stimulated excretion of malic acid root apices. Plant Physiol. 103:695-702

Duque-Vargas, J.; Pandey, S.; Granados, G.; Ceballos, H.; Knapp, E. Inheritance of tolerance to Soil Acidity in Tropical Maize.**Crop Science**, v.34, p.50-54, 1994.

Duvick, D.N. 1992. Genetic contributions to advances in yield of U.S. maize. Maydica 37:69-79.

Eleutério, A.; Gama, E.E.G.; Morais, A.R. Capacidade de combinação e heterose em híbridos intervarietais de milho adaptados às condições de cerrado. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v.23, p.247-253, 1988.

França, F.T., Parentoni, S.N., Santos, M.X., Oliveira, ªC., Gama, E.E., Pacheco, C.A P.,

Guimarães, P. E.O ., Correia, L.A . 2002 - Adaptabilidade e Estabilidade de Genótipos Avaliados no Ensaio Nacional de Milho Precoce nas safras de 1999-2000 e 2000-2001. IN Congresso Brasileiro de Milho e Sorgo, Florianópolis, Setembro 2002.

Gama, E.E.G., Magnavaca, R., Morais, A.R., Oliveira, A.C. 1986. Comportamiento de cinco poblaciones de maiz y de sus respectivos hibridos interpoblaciones em suelos fertiles y acidos. Mémoria da XII Reunion de Maiceros de la Zona Andina, Quito, Peru, 29, set. a 3 out. pp. 77-96. CIMMYT, México.

Johnson Jp.; Carver Bf.; Baligar Vc. Expression of aluminum tolerance tranfserred from Atlas 66 to hard winter wheat. **Crop Science**, v.37, p.103-108, 1997.

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 Agropecuaria Brasileira**, v.22, p.257-263, 1987.

Machado, R.P.; Novais,R.F.; Sediyama,C.S. ; Borges,A.C. Efeito da localização de doses de fósforo em relação ao sistema radicular, sobre o comportamento da soja, com utilização de técnica de raízes subdivididas. **Revista Ceres**, v.30, p.295-307, 1983.

Magalhães, J.V. 1996. Absorção e translocação de nitrogênio por plantas de milho submetidas a períodos crescentes de omissão de fósforo na solução nutritiva. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, MG. Brasil.

Magnavaca, R., Gardner C.O and Clark R.B. 1987a. Evaluation of maize inbred lines for aluminum tolerance in nutrient solution. In Genetic aspects of plant mineral nutrition. Eds H W Gabelman and B C Longhman. Pp 255-265. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht/Boston/Lancaster.

MAGNAVACA, R., GARDNER C.O AND CLARK R.B. 1987c. Comparitions of maize populations for aluminum tolerance in nutrient solution. In: GABELMAN, H.W.; LONGHMAN, B.C. Genetic aspects of plant mineral nutrition. Dordrecht: Martinus Nijhoff, 1987c. p.189-199..

Magnavaca, R.,, Gama,E.E.G., Bahia Filho,A.F.C., Ferandes, F.T. 1988. Obtenção de híbridos duplos de milho para tolerância a toxidez de alumínio. Pesq. agrop. Bras. 23, 971-977.

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 a tolerância ao alumínio. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v.34, p.1897-1904, 1999.

NARRO,L.C.; De LEON,C.; SALAZAR,F.; ARIAS, M.P. Programa de Maiz del CIMMYT para tolerância a suelos ácidos. In: REUNIÓN LATINOAMERICANA DEL MAIZ, 18., 1999, Sete Lagoas, MG. **Memorias**... Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS/Mexico: CIMMYT, 1999. p.65-72.

Naspolini Filho, V.; Bahia Filho, A.F.C.; Vianna R.T.; Gama, E.E.G.; Vasconcelos C.A.;

Magnavaca, R. Comportamento de linhagens e de híbridos simples de milho (Zea mays L.) em solos sob vegetação de Cerrado. **Ciencia e Cultura**, v.33, p. 722-727, 1981.

Novais,R.F.; Ferreira, R. P.; Neves, J.C.L.; Barros, N.V. Absorção de fósforo e crescimento do milho com sistema radicular parcialmente exposto à fonte de fósforo. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v.20, p.749-754, 1985.

Novais,R.F., and Smyth, T.J., 1999. Fósforo em solo e planta em condições tropicais.Roberto Ferreira de Novais, T.Jot Smyth-Viçosa-MG: UFV,DPS 399 p.

Parentoni, S.N., Bahia Filho, A.F.C., Gama, E.E.G., Lopes, M.A., Guimarães, P.E.O; Santos, M.X.. 1995. "Capacidade Combinatória de linhagens elite de milho em solo ácido e fértil." In: Proceedings of III Latin American Maize Researchers Meeting. Editors: Gonzalo Ávila and Ligia Céspedes, Cochabamba, Bolívia. Vol. 1 - pg. 35-46.

Parentoni, S.N., Bahia Filho, A.F.C., Gama, E.E.G., Lopes, M.A., Guimarães, P.E.O., Santos, M.X. 1997. Diallel analysis in acid and fertile soils of maize inbred lines differing in their levels of aluminum tolerance and phosphorus efficiency. IN Proceedings of the Fourth International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, 17-24 March, 1996. P. 230.

Parentoni, S.N., Gama,E.E.G., Santos, M.X., Lopes,M.A., Alves, V.M.C., Bahia Filho,A.F.C., Vasconcelos, C.A., Magnavaca,R., Pacheco,C.A.P. 1999. Adaptação de milho a solos ácidos: tolerância a toxidez de alumínio e eficiência no uso de nutrientes no Programa de Pesquisa da EMBRAPA-Milho e Sorgo. In: REUNION LATINOAMERIACA DEL MAIZ, 18., 1999, Sete Lagoas, 1999. Memorias... Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS/México-CIMMYT, 684p. p. 179-202.

Parentoni, S.N., Alves, V.M.C., Milach, S., K., Cançado, G.M.A, Bahia Filho, A.F.C. 2001. Melhoramento para tolerância a alumínio como fator de adaptação a solos ácidos em plantas cultivadas. IN: Melhoramento Genético de Plantas e Microoganismos. ESALQ-USP, ed. Luciano Lourenço Nass. p.783-851.

Salazar, F.; Pandey, S.; Narro, L.; Pérez, J.C.; Ceballos, H.; Parentoni, S.N.; Bahía Filho, A.F.C. Diallel Analysis of Acid-Soil Tolerant and Intolerant Tropical Maize Populations. Crop Science, v.37, v.1457-1462, 1997.

USDA 2000. The Future of Planet Earth: Scientific Challenges in the Coming Century. U.S. Geological Survey, MS119 National Center, Reston, VA 20192, USA. URL . News Release <http://www.usgs.gov/public/press/public_affairs/press_releases/pr1160m.html>