

LUIZ ANTÔNIO ZANÃO JÚNIOR

**RESISTÊNCIA DO ARROZ À MANCHA-PARDA MEDIADA POR
SILÍCIO E MANGANÊS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

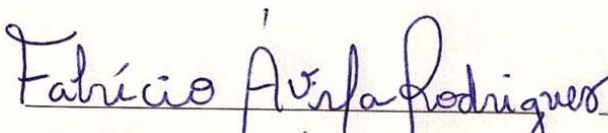
VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2007

LUIZ ANTÔNIO ZANÃO JÚNIOR

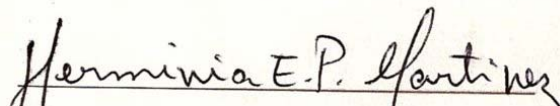
**RESISTÊNCIA DO ARROZ À MANCHA PARDA-MEDIADA POR
SILÍCIO E MANGANÊS**

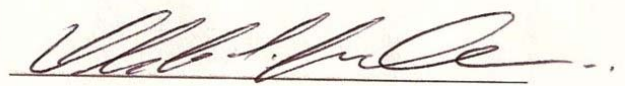
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

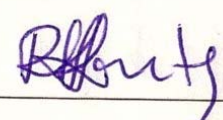
APROVADA: 20 de março de 2007.


Prof. Fabrício de Ávila Rodrigues
(Co-Orientador)


Prof. Gaspar Henrique Komdörfer


Prof.ª Hermínia E. Prieto Martinez


Prof. Olinto Liparini Pereira


Prof. Renildes Lúcio Ferreira Fontes
(Orientador)

À minha mãe Maria Lúcia Vieira Zanão e ao meu pai Luiz Antônio Zanão, pela luta diária, sacrifício, abdicação, amor, amizade, educação, incentivo e pelo exemplo de vida durante todos esses anos,

À minha irmã, pela cumplicidade,

Aos meus sobrinhos Yuri e Yara, pelo carinho.

Aos meus avós paternos e maternos, pelo curto, porém intenso tempo em que convivemos, que deixaram boas lembranças.

Ao meu bom Deus, por colocar todos no meu caminho e me manter feliz e fortalecido neste mundo (Obrigado Senhor, palavras não são suficientes),

A todos os professores, heróis, que passaram por minha vida, desde a minha alfabetização,

À Sociedade Brasileira, pagadora de impostos, que financiou meus estudos desde os meus primeiros contatos com o lápis e o caderno,

Dedico

Ao meu único e verdadeiro amor,
pelo carinho e compreensão e pela
constante felicidade que me
proporciona.... minha doce Maristela,

Ofereço

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua infinita bondade, por não me deixar cair, sempre segurando minha mão.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Solos, pela oportunidade oferecida e por acreditar no meu potencial.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo auxílio financeiro.

Ao professor Renildes Lúcio Ferreira Fontes, pela orientação, disposição, presteza, confiança e todo o apoio na realização deste trabalho.

Ao professor Fabrício de Ávila Rodrigues pela co-orientação, incentivo e disposição.

Ao professor Júlio Cesar Lima Neves pela participação valiosa neste trabalho, pelo auxílio estatístico e pelas sugestões.

Ao professor Victor Hugo Alvarez V., pelo grande exemplo, pelo auxílio e dicas e pela disposição em contribuir sempre.

À professora Hermínia E. Prieto Martinez e ao professor Olinto Liparini Pereira pela participação na defesa desta tese e pelas observações.

Ao professor Gaspar Henrique Korndörfer, pelo esforço em participar da defesa desta tese, pelas dicas e por sempre contribuir quando consultado.

Ao Dr. Anne Sitarama Prabhu, da EMBRAPA-CNPAF, pelo fornecimento do inóculo e pelas sugestões.

Aos professores do Departamento de Solos, pela atenção recebida e pela participação em minha formação.

A todos os funcionários do Departamento de Solos que contribuíram para a realização deste trabalho, em especial aos laboratoristas, Carlos Fonseca e Cláudio; à Luciana, pela competência, e ao Ciro, pelo auxílio na casa de vegetação.

Ao Departamento de Fitopatologia da UFV, pelo empréstimo de alguns equipamentos e pela infraestrutura disponível para realização de um dos experimentos.

Aos colegas do Laboratório de Interação Patógeno-Hospedeiro, em especial à Dalila, Vivian e Juliana, por cuidar do fungo e me auxiliar a inoculá-lo, e à Renata Resende e à Márcia Varela, entre outros, pelos bons momentos na análises de compostos fenólicos e lignina, e ao simpático Bruno, o técnico.

Ao pessoal do Laboratório de Anatomia Vegetal, em particular às professoras, Aristéa Azevedo, Marília C. Ventrella e Jaqueline Dias; ao estudante de Bruno e e à ex-funcionária Vânia, pela infraestrutura e pela preciosa colaboração.

Aos estudantes de graduação Igor, Vinícius, Paulo, Juliana e Mateus, pela ajuda na condução dos experimentos e realização das análises e pelo estímulo,

À professora Regina Maria Quintão Lana e ao Prof. Luiz Antônio de Castro Chagas, pela amizade, apoio, estímulo e pela torcida.

A todos os funcionários do LABAS e do Departamento de Agronomia da Universidade Federal de Uberlândia pelo carinho, em especial à professora Marli A. Ranal e ao professor Gilberto Fernandes Corrêa.

Ao pessoal do LAFER-UFU, de responsabilidade do Prof. Gaspar Henrique Korndörfer, por me disponibilizar o necessário para a realização das análise de silício no material vegetal e solução nutritiva, principalmente às competentes Valéria e Carla, além de tudo amigas e aos exemplares estagiários.

Aos verdadeiros e sinceros amigos pela amizade e por suavizarem o dia-a-dia. Aos amigos Carlos Ribeiro, Vinícius Tavares de Ávila, Patrícia Ribeiro, Juliana Soares, Paulo Henrique, Cris, Diana, Euriel, Nilza, Igor, Edgley, Eulene, Ana Maria, Eulene, Carol, Ray, Manu, Welson, Dani e Philippi, pelas descontraídas e enriquecedoras conversas e pela amizade sincera.

A todos os colegas de Pós-Graduação da UFV pelos momentos compartilhados.

Aos rizicultores do mundo.

BIOGRAFIA

LUIZ ANTÔNIO ZANÃO JÚNIOR, filho de Luiz Antônio Zanão e Maria Lúcia Viera Zanão, nasceu em Uberlândia, MG, no dia 24 de janeiro de 1981.

Em 1996, iniciou o curso Técnico em Agropecuária, na Escola Agrotécnica Federal de Uberlândia, em Uberlândia, MG, findando-o em dezembro de 1998. Durante o ano de 1999 exerceu a profissão em uma empresa de consultoria agrícola e estagiou no Laboratório de Análise de Solos da Universidade Federal de Uberlândia, onde teve os primeiros contatos com a Ciência do Solo e pode confirmar sua vocação para a Agronomia.

Em dezembro de 2004, graduou-se Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal de Uberlândia, participando durante a graduação, como bolsista, do Programa Especial de Treinamento (PET) e bolsista de iniciação científica da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais.

Em fevereiro de 2005, iniciou o mestrado no Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, na Universidade Federal de Viçosa, sob a orientação do professor Renildes Lúcio Fontes. Em março de 2007, iniciou o curso de doutorado no mesmo programa.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	ix
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. A cultura do arroz	4
2.2. A mancha-parda do arroz	5
2.2.1. Importância econômica e distribuição geográfica	5
2.2.2. Etiologia	7
2.2.3. Hospedeiros alternativos.....	8
2.2.4. Processo de infecção.....	9
2.2.5. Sintomatologia	11
2.2.6. Sobrevivência e condições favoráveis ao progresso da doença	12
2.2.7. Métodos de Controle.....	14
2.3. Manganês.....	16
2.4. Silício	23
3. MATERIAL E MÉTODOS	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41

4.1. Produção de matéria seca, ângulo de inserção foliar, teores e acúmulo de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn e Si nas raízes, bainhas e folhas.....	41
4.2. Espessura da epiderme adaxial e abaxial da folha.....	67
4.3. Resistência do arroz à mancha-parda.....	69
4.4. Acúmulo foliar de compostos fenólicos solúveis totais e lignina .	76
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80
6. CONCLUSÕES.....	81
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
APÊNDICE	114

RESUMO

ZANÃO JÚNIOR, Luiz Antônio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2007. **Resistência do arroz à mancha-parda mediada por silício e manganês.** Orientador: Renildes Lúcio Ferreira Fontes. Co-Orientadores: Júlio César Lima Neves e Fabrício de Ávila Rodrigues.

As doenças das plantas são responsáveis pela redução significativa da produção de alimentos no mundo. Para o seu controle, cada vez mais são utilizados defensivos agrícolas que podem causar problemas ambientais, econômicos e sociais, havendo a necessidade de se buscar alternativas de controle menos agressivas ao socioecossistema. A nutrição adequada da planta, com enfoque nos elementos mais promissores para o aumento da resistência das plantas às doenças como o Si e o Mn, é uma dessas alternativas. Utilizando plantas de arroz cultivadas sob diferentes doses de Si e Mn objetivou-se com este trabalho: a) avaliar o acúmulo de massa da matéria seca de plantas, ângulo de inserção foliar e teores e acúmulo de macronutrientes, micronutrientes catiônicos e Si nas raízes, bainhas e folhas, b) avaliar a espessura das epiderme abaxial e adaxial das folhas c) avaliar o acúmulo de compostos fenólicos solúveis e lignina nas folhas de plantas inoculadas e não inoculadas com o fungo *Bipolaris oryzae*, causador da mancha-parda do arroz e d) avaliar o efeito de

Si e Mn na resistência do arroz a esta doença. Em 4 experimentos em solução nutritiva, delineamento em blocos casualizados, os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 2 x 3 (0 e 2 mmol L⁻¹ Si; 0,5; 2,5 e 10 µmol L⁻¹ Mn), com 5 repetições. Cada unidade experimental foi composta de um vaso plástico com 4 L de solução nutritiva, com 6 plantas de arroz (cv. Metica-1). No primeiro e segundo experimentos não ocorreu a inoculação das plantas com o fungo (*B. oryzae*) e foram determinados a massa da matéria seca das folhas, bainhas e raízes e o teor e acúmulo de macronutrientes, micronutrientes catiônicos e Si nestes três componentes das plantas, aos 45 dias após a germinação. Adicionalmente, foram feitos estudos anatômicos para de determinar a espessura da epiderme adaxial e abaxial. No terceiro experimento as plantas foram inoculadas com o fungo aos 45 dias após a germinação determinando-se o período de incubação; lesões cm⁻² de folha; severidade e área abaixo da curva de progresso da doença. No quarto experimento determinou-se o acúmulo foliar de compostos fenólicos solúveis totais e lignina em plantas inoculadas e não inoculadas com o fungo. Foi feita a análise de variância dos dados (Teste F, 5% e 1% de significância) e o ajuste de equações de regressão para as respostas às doses de Mn, dentro de cada nível de Si. Verificou-se efeito positivo significativo do Si em todas as variáveis avaliadas relacionadas à produção de massa seca do arroz, arquitetura da planta, componentes de resistência às doenças e acúmulo/teores de macronutrientes, micronutrientes catiônicos e Si nas raízes, bainhas e follhas e espessura da epiderme adaxial e abaxial. Com a adição do Si, houve aumento na produção de massa seca de raízes, bainhas e folhas, espessura da epiderme foliar e menor ângulo de inserção foliar que conferiu melhoria na arquitetura da planta. Quanto à resistência do arroz à mancha-parda, o Si proporcionou prolongamento no período de incubação da doença em aproximadamente 9 h, aumento no acúmulo de compostos fenólicos solúveis e lignina nas folhas inoculadas e redução na severidade da mancha-parda em até 96%, reduzindo também o número de lesões cm⁻² e a área abaixo da curva do progresso da

doença. Houve efeito significativo do Mn para a maioria das características avaliadas, porém, isso ocorreu apenas na ausência de Si na solução nutritiva.

ABSTRACT

ZANÃO JÚNIOR, Luiz Antônio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March 2007. **Rice resistance to the brown spot mediated by silicon and manganese.** Adviser: Renildes Lúcio Ferreira Fontes. Co-advisers: Júlio César Lima Neves and Fabrício de Ávila Rodrigues.

Plant diseases markedly reduce the world food production and their control is more and more being made by using chemical defensives which may cause environmental, economical and social problems. It is needed to search alternatives for controlling the plant diseases lowering the harm caused to the environment. The correct plant nutrition, focusing the more promissing elements for increasing the plant resistance to diseases, as Si and Mn, is one of these alternatives. The aim of this work was, using rice plants cultivated under different doses of Si and Mn, to evaluate: a) the dry matter yield, the angular degree of foliar insertion and the accumulation of macronutrients, cationic micronutrients and Si in the roots, sheaths and leaves, b) the thickness of the leaf abaxial and adaxial epidermis c) the accumulation of soluble phenolic compounds and lignin in the leaves of plants inoculated and non-inoculated with the fungi (*Bipolaris oryzae*) wich causes the

brown spot disease in rice d) the Si and Mn effects in the rice resistance to the brown spot. Four trials in nutrient solution were carried out in the randomly block design in a factorial 2 x 3 (0 and 2 mmol L⁻¹ Si; 0.5; 2.5 and 10 µmol L⁻¹ Mn), with 5 replications. The experimental unit was a 4 L plastic recipient with nutrient solution and 2-4 rice plants (Metica-1 cultivar). In the first and second trials no fungi (*B. oryzae*) inoculation was made and it was determined dry matter yield of roots, sheaths and leaves and the accumulation of macronutrients, cationic micronutrients and Si in roots, sheaths and leaves, at the 45th day after seed germination. Additionally, anatomic studies were done for determination of the thickness of the abaxial and adaxial leaf epidermis. In the third trial, the plants were inoculated with the fungi at the 45th after seed germination and it was determined the length of the incubation time of the disease; lesions per cm² of leaf area; severity and area underneath the curve of disease progression. In the fourth experiment it were determined the accumulation of total soluble phenolic compounds and lignin in the fungi inoculated and non-inoculated plants. It was made the analysis of variance of the data (F Test, 5% and 1% probability) and the adjustment of regression equations for the responses to Mn, within each Si level. There was a positive and significant effect of the applied Si for all variables related to rice dry matter, to plant architecture, to disease plant resistance, to concentration/accumulation of macronutrients, cationic micronutrients and Si in the plant roots, sheath and leaves, and to the thickness of the adaxial and abaxial epidermis. With the addition of Si, there was increase in the root, sheath and leaf dry matter yield, increase of the thickness of the leaf epidermis and decrease of the angle of foliar insertion witch improved the plant architecture. For the rice resistance to the brown spot disease, the applied Si promoted a prolongment of the disease incubation time of about 9 h, the accumulation of phenolic compounds and lignin in the inoculated leaves, the alleviation of the brown spot severity up to 96%, the decrease of the number of lesion per cm², and the decrease of the area underneath the disease progress curve.

There were significant effects of Mn for most of the characteristics evaluated, however, this was observed only in the treatments with the zero Si dose.

1. INTRODUÇÃO

O arroz é o segundo cereal mais cultivado no mundo e o principal alimento para mais da metade da população do planeta (Van Nguyen & Ferrero, 2006). O cultivo dessa gramínea é realizado em todos os continentes, exceto na Antártida, sendo que o Brasil, em 2004, foi o nono produtor mundial deste grão e o primeiro na América Latina (FAO, 2004). No Brasil, o arroz é cultivado por grandes e pequenos produtores em todos os estados, abrangendo sistemas agrícolas irrigados e de sequeiro. Os estados brasileiros maiores produtores de arroz são Rio Grande do Sul, Mato Grosso, Pará e Maranhão, sendo que o Rio Grande do Sul responde por quase 50% da produção nacional (CONAB, 2005).

Entre as culturas anuais, do ponto de vista econômico e social, o arroz ocupa posição destacada no território nacional. É uma cultura que pode ser cultivada em dois agroecossistemas como o arroz de sequeiro ou arroz irrigado (várzeas). O arroz de sequeiro caracteriza-se pelo menor nível de tecnologia empregado, uniformidade e produtividade, o oposto do arroz irrigado.

O fator mais limitante da cultura é a incidência de doenças, especialmente a mancha-parda, causada pelo fungo *Bipolaris oryzae* Breda de Hann, responsável por uma redução considerável na produção e qualidade dos grãos (Ou, 1985). A ocorrência da doença é favorecida por condições climáticas como temperaturas elevadas e alta umidade relativa. Para a região tropical, onde a doença é mais severa, torna-se necessário lançar mão de práticas que possibilitem minimizar os efeitos prejudiciais da doença sobre a cultura sem agredir o meio ambiente.

O controle das doenças de plantas com o uso de fungicidas é uma prática extensivamente utilizada pelos agricultores para minimizar os danos ocasionados

pela doença, levando a perdas na produtividade. Esta estratégia, utilizada massivamente a longo prazo, pode resultar em vários problemas, sendo o primeiro de ordem econômica. No caso da mancha-parda, pulverizações foliares com fungicidas não apresentam tanta eficácia e devem ser acompanhadas de estudos de viabilidade econômica para recomendação de tal prática (Embrapa, 1993). Além disso, devem ser considerados problemas como o aparecimento de isolados do patógeno resistentes ao princípio ativo do fungicida, os danos ao ecossistema e as implicações negativas na saúde do agricultor e do consumidor final.

O estado nutricional da lavoura afeta de forma significativa a resistência da planta ao ataque dos patógenos. Apesar da resistência da planta ser determinada geneticamente, o meio ambiente pode alterá-la. A nutrição mineral é um dos fatores que mais afetam a resistência e ou a susceptibilidade das plantas às doenças bem como a virulência dos fitopatógenos (Huber, 1994). A deficiência e/ou o excesso de um nutriente e o desequilíbrio entre eles altera de maneira expressiva a suscetibilidade das plantas às doenças e isto intensifica a redução na produtividade. As causas e os efeitos, contudo, são bastante complexos, variando conforme o fertilizante ou nutriente utilizado e também de acordo com o patossistema. Torna-se necessário conhecer o papel dos nutrientes, bem como a interação entre eles na resposta das culturas aos diversos patógenos para reduzir ou retardar o uso de fungicidas.

Os nutrientes atuam da forma mais variada possível na resposta da planta ao ataque por patógenos. Muitos nutrientes são cofatores enzimáticos, ativadores, inibidores e moduladores de vários processos metabólicos (Marschner, 1995). Adicionalmente, a nutrição mineral contribui com a composição da organização estrutural, ou seja, a anatomia dos órgãos da planta, que por efeito secundário pode auxiliar a planta em sua resistência ao ataque de pragas e doenças (Marschner, 1995).

O manganês (Mn), pela sua importância fisiológica, bioquímica e nutricional, tem sido citado como um micronutriente importante na defesa das plantas às doenças (Huber & Wilhelm, 1988; Graham & Webb, 1991). Esse

elemento exerce importante papel na síntese de lignina e compostos fenólicos (Graham & Webb, 1991). A lignina e os compostos fenólicos estão associados às barreiras físicas e químicas na parede celular que dificultam a penetração e a colonização dos patógenos.

O silício (Si), apesar de não ser considerado um elemento essencial, destaca-se por reduzir a intensidade de importantes doenças em várias culturas (Datnoff, et al., 1997; Rodrigues & Datnoff, 2005).

Os mecanismos de resistência conferidos pelo Si permanecem em discussão. Do ponto de vista morfológico, o aumento da resistência do arroz às doenças, em alguns trabalhos, está associado com modificação na anatomia da planta, através do depósito de Si no apoplasto. Em outros, o Si modifica as propriedades fisiológicas e bioquímicas da planta como, por exemplo, aumento na produção de substâncias antimicrobianas como fitoalexinas e proteínas relacionadas com a patogênese, lignina e ativação de enzimas envolvidas na resistência da planta. (Marschner, 1995; Béllanger et al., 2003; Rodrigues & Datnoff, 2005).

Como visto, Mn e Si são muito importantes na defesa das plantas e há semelhanças entre alguns papéis dos mesmos na resistência do hospedeiro ao ataque por patógenos. Além disso, sabe-se que a tolerância das plantas à toxidez causada pelo Mn é aumentada na presença de Si (Horiguchi, 1987; Horiguchi, 1988). O Si evita esta toxidez redistribuindo melhor o Mn nas folhas, evitando o seu acúmulo, que ocasiona lesões necróticas nas folhas (Horst, 1988).

Tendo como base o cultivo de arroz em solução nutritiva com três níveis de Mn, com ou sem a adição de Si, este trabalho teve como objetivos: a) avaliar o acúmulo de massa da matéria seca de plantas, ângulo de inserção foliar e teores e acúmulo de macronutrientes, micronutrientes catiônicos e Si nas raízes, bainhas e folhas, b) avaliar a espessura das faces abaxial e adaxial da epiderme das folhas c) avaliar o acúmulo de compostos fenólicos solúveis e lignina nas folhas de plantas inoculadas e não inoculadas com o fungo *Bipolaris oryzae*, causador da mancha-parda do arroz e d) verificar se a resistência do arroz à mancha-parda pode ser aumentada.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A cultura do arroz

O arroz, por ser uma fonte relativamente barata de carboidratos e proteínas, é um produto importante na dieta da população brasileira, sendo considerado pelo governo um produto de segurança alimentar. É o segundo alimento mais consumido pelos brasileiros, com consumo per capita de 25,248 kg, sendo superado apenas pelo leite (IBGE, 2003).

No período de 1999 a 2004, o arroz foi o quinto produto agrícola mais cultivado pelos produtores brasileiros apresentando produção anual média de 11.122,1 t com evolução anual (CONAB, 2005). É um dos principais cereais produzidos no Brasil, respondendo por cerca de 2% da produção mundial e por 52% da produção da América do sul (Azambuja, 2004).

Segundo o IRGA (2004), o potencial genético de produção das atuais cultivares de arroz encontra-se entre 10 e 12 t ha⁻¹, valor muito acima da produtividade média alcançada pela cultura na safra 2005/06, que foi de 3,875 t ha⁻¹. A evolução das técnicas de cultivo e os programas de melhoramento genético que disponibilizam genótipos mais adaptados aos mais diversos ambientes é que tornam possível o acréscimo anual na produção desta cultura no Brasil.

Os diferentes níveis de tecnologia utilizados e as variações nas características edafoclimáticas concorrem para a grande discrepância na produção e produtividade entre as regiões produtoras de arroz. A região Sul

produz quase 60% do arroz brasileiro, sendo o estado do RS o maior produtor (46%) e o de Santa Catarina o terceiro (8%). Na região Centro-Oeste estão o segundo, o sexto e o sétimo estados maiores produtores de arroz do Brasil, que são Mato Grosso (17%), Tocantins (4%) e Goiás (3%), respectivamente. Na região Norte destaca-se o estado do Pará e na Região Nordeste o Maranhão (quase 5% cada). A região Sudeste, apesar de não ser grande produtora, é a maior consumidora. A produção nacional de arroz em casca em 2005 foi de 13.191.885,00 t. Os valores entre parênteses representam a produção dos estados citados, em relação a este valor (IBGE, 2005).

Apesar do estado do RS ser o maior produtor de arroz, não é neste estado que se encontram as lavouras mais produtivas. Esta posição fica com o estado de Santa Catarina, com produtividade média, na safra 2003/04, de quase 6,6 t ha⁻¹ de grãos (IBGE, 2005).

2.2. A mancha-parda do arroz

2.2.1. Importância econômica e distribuição geográfica

O primeiro caso de mancha-parda em arroz foi descrito no Japão em 1892, nos EUA e Filipinas isso ocorreu em 1924 (Tullis, 1935). Historicamente, essa doença foi estigmatizada como o maior fator que contribuiu para “A Grande Fome de Bengala” em 1943, no sudeste da Índia, quando a queda de até 90% na produção de arroz causou a morte de quase dois milhões de pessoas que tinham o arroz como principal fonte de carboidrato (Padmanabhan, 1973). Segundo Bergamin Filho & Kimati (1995), as condições climáticas favoráveis à doença e o plantio de variedades altamente suscetíveis foram os maiores responsáveis pelas perdas. Além disso, Tauger (2003) atribui o desastroso episódio a causas políticas e econômicas, uma vez que ocorreu em plena Segunda Guerra Mundial.

A mancha-parda é a segunda doença, em termos de prejuízos, que acomete a cultura do arroz irrigado no Brasil (Prabhu & Filippi, 1997) e na maioria dos países produtores deste cereal é superada apenas pela brusone (Ou, 1985). Seus danos muitas vezes são subestimados porque os sintomas foliares dessa doença

podem ser confundidos com os da brusone. A quantificação das perdas quando a infecção ocorre nos grãos é difícil, uma vez que um complexo de fungos pode estar associado à mancha-dos-grãos (Ou, 1985; Malavolta, 1999; Mew & Gonzáles, 2002).

Os danos provocados pela doença são variáveis dependendo de fatores edafoclimáticos, do manejo cultural, da resistência genética da cultivar selecionada para plantio e da parte atacada da planta (Padwick, 1950; Ou, 1985; Webster & Gunnel, 1992; Malavolta, 1999). A infecção severa pode causar redução na germinação das sementes (Mew & Gonzáles, 2002), queima ou morte das plântulas originadas de sementes infectadas, redução na produtividade quando incide na folha bandeira e panículas (Amaral, 1987; Prabhu & Vieira, 1989). Quando a infecção ocorre nas panículas as perdas são maiores. Além da redução na quantidade, a qualidade dos grãos também é afetada. Ocorre descoloração dos grãos, diminuindo o rendimento de grãos inteiros (Webster & Gunnel, 1992). Soave et al. (1984) verificaram descoloração e menor peso de grãos em 36 progênies de arroz. Aluko (1975) verificou redução no número de grãos por panícula, assim como o peso individual dos grãos, porém sem observar alteração no número de panículas por planta por esta característica ser determinada no início da fase vegetativa. Malavolta (1999) também observou diminuição da produção (peso e número de grãos) devido à infecção do fungo nas panículas.

A mancha-parda é encontrada em todas as regiões orizícolas do mundo, desde as zonas tropicais e sub-tropicais até as temperadas, mas possui maior importância nas regiões tropicais (Ou, 1985). É a mais importante doença do arroz no estado da Flórida (EUA), reduzindo de 16 a 40% a produtividade em condições experimentais (Datnoff, 1997). Redução na colheita, de aproximadamente 50%, nos campos de arroz italianos também foi relatada por Molleti et al. (1997). Na Colômbia, em 1996 esta doença tornou-se um grave problema para os orizicultores, causando perdas de até 50% em algumas regiões daquele país (Correa-Victoria, 1999). No continente Africano foram observadas perdas de 30 a 43% quando a doença apresentou níveis elevados de severidade

(Aluko, 1975). No Brasil, perdas estimadas, variando com a cultivar, de 18 a 82% no número e grãos cheios por panícula e de 12 a 30% no peso dos grãos foram encontrados por Prabhu et al. (1980) no estado do Pará. No estado de Tocantins, Santos et al. (1994) constataram alta incidência da mancha-parda, ocasionando prejuízos na qualidade dos grãos da cultivar Metica-1.

2.2.2. Etiologia

A mancha-parda é causada pelo fungo mitospórico *Bipolaris oryzae* (Breda de Haan) Shoem. [syn. *Drechslera oryzae* (Breda de Haan) Subr. & Jain e *Helminthosporium oryzae* (Breda de Haan)]. Sua forma sexuada, ainda não encontrada no Brasil, é um Ascomycota denominado *Cochiliobolus miyabeanus* (S. Ito & Kurib.) Drescsler ex Dastur (Ou, 1985; Webster & Gunnel, 1992).

Os sintomas causados pelos três fungos são muito parecidos. Shoemaker (1959) propôs a diferenciação dos gêneros *Bipolaris*, *Drechslera* e *Helminthosporium* a partir da forma e/ou da germinação dos conídios. Segundo ele, *Helminthosporium* possui os conídios formados simultaneamente no ápice e nos lados dos conidióforos, diferindo dos outros dois que produzem conídios apenas no ápice. A diferença básica entre *Bipolaris* e *Drechslera* é que o primeiro apresenta germinação bipolar e conídios fusóides e o segundo, germinação unipolar e conídios cilíndricos. A nomenclatura adotada no presente trabalho foi a *B. oryzae*, mesmo que alguns trabalhos se refiram ao fungo como *H. oryzae* e *D. oryzae*.

Bipolaris oryzae apresenta massa micelial de aspecto aveludado e escuro, com abundantes hifas ramificadas e em anastomose e conídios mais ou menos eretos (Padwick, 1950). Os conídios são levemente curvos, com 6 a 14 septos transversos, medindo em largura e comprimento, respectivamente, 11 a 17 µm e 35-170 µm, mais largos no centro e afilando-se para o ápice, sendo castanhos quando maduros (Ou, 1985; Mew & Gonzales, 2002). Ou (1985) afirma que as medidas dos conídios variam de acordo com as condições de crescimento do fungo.

É um patógeno que apresenta alta variabilidade genética quanto ao crescimento, capacidade de esporulação, coloração das colônias e agressividade (Souza et al., 1984; Ou, 1985). Isolados originários de São Paulo, Paraná, Rio Grande do Sul e Goiás apresentaram variações no crescimento e sensibilidade a (à) fungicidas em meio de cultura (Artigiani Filho & Bedendo, 1996). Alguns destes autores verificaram que este fungo possui vários núcleos por célula, sendo mais freqüente 2 ou 4, o que, segundo Azevedo (1976), pode ser a causa da variabilidade.

Malavolta et al. (1992) após estudar reações foliares de 49 cultivares de arroz a 8 isolados monospóricos de *B. oryzae*, em casa de vegetação, verificaram que houve reações diferentes entre os isolados nas cultivares testadas e mesmo entre isolados procedentes de um mesmo município. Não se encontrou nenhuma cultivar resistente a um dos isolados do município de Taubaté-SP, enquanto 41 apresentaram reações do tipo resistente ou moderadamente resistente ao isolado do município de Pindamonhangaba-SP. Estes autores alertam, em respeito à diversidade genética encontrada, para a necessidade da realização de pesquisas visando a identificação de raças fisiológicas do fungo. Essa variabilidade também foi verificada nas Filipinas (IRRI, 1981; 1984). Souza et al. (1984) verificaram, no Brasil, variabilidade em diferentes isolados quanto ao crescimento, coloração e esporulação em meio de cultivo com batata-dextrose-agar e quanto à agressividade. No entanto, não foi observada interação específica entre isolado e hospedeiro descaracterizando, assim, a ocorrência de raças do patógeno.

2.2.3. Hospedeiros alternativos

Uma das formas de sobrevivência do fungo são os hospedeiros alternativos. Além do arroz, várias plantas podem ser hospedeiras do *Bipolaris oryzae*. Dath & Chakrabart (1973) verificaram que de todas as 22 espécies do gênero *Oryza* testadas, nenhuma apresentou resistência à mancha-parda. Bedendo & Prabhu (1981) testaram 26 espécies de gramíneas e constataram variação no grau de suscetibilidade, assim como ausência de infecção. O fungo foi patogênico nas inoculações artificiais em *Agrostis palustris*, *Alopecurus arundinacea*, *Avena*

fatua, *Axonopus affinis*, *Bromus catharticus*, *Dactylis glomerata*, *Eleusine indica*, *Eragrostis curvula*, *Festuca arundinaceae*, *F. elatior*, *F. rubra*, *Hordeum vulgare*, *Lolium multiflorum*, *L. perenne*, *Oryza sativa*, *Oannisetum spicatum*, *Phalaris arundinacea*, *P. tuberosa*, *Poa pratensis*, *Sorghum sudanense* (Nelson & Kline, 1961), *Panicum virginatum* (Nelson & Kline, 1961; Krupinsky et al., 2004), *Echinochloa phyllopogon* e *Phragmites australis* (Serghat et al., 2005), além de aveia, cana, centeio, sorgo, trigo, *Brachiaria decumbens* e *Panicum maximum* (Artigiani Filho & Bedendo, 1995).

2.2.4. Processo de infecção

O processo infeccioso inclui a formação do apressório, hifa *peg* de penetração e posterior formação das hifas que colonizam as células da epiderme e do mesófilo foliar (Ou, 1985).

Se todos os fatores forem favoráveis à germinação dos conídios de *B. oryzae*, os sintomas aparecem a partir de oito horas após a inoculação das plantas (Schickli & Percich, 1984). Os conídios germinam através da formação de um tubo germinativo a partir do ápice das células apicais ou basais. Os tubos germinativos são envoltos por uma mucilagem que lhes permite aderir na superfície foliar (Tullis, 1935). Formam-se os apressórios lobados ou ramificados, de onde se originam as hifas de infecção, as quais podem penetrar diretamente nas células da epiderme (Nisikado & Miyake, 1922, citados por Padwick, 1950) ou através dos estômatos (Tullis, 1935; Padwick, 1950). Nanda & Gangopadhyay (1984) verificaram que 98% dos conídios germinados estabeleceram infecção através das células buliformes da epiderme e apenas 2% através dos estômatos.

Quando a penetração ocorre diretamente na epiderme a infecção é mais freqüente nas células buliformes, que são totalmente colonizadas pelo micélio do fungo (Tullis, 1935). Segundo Sherf et al. (1947), fragmentos do micélio também são capazes de ocasionar infecção. Estes autores verificaram que após a inoculação de plantas de arroz com fragmentos de micélio, houve a formação de tubos miceliais que penetraram diretamente na epiderme, com a formação de

apressório. Afirmam ainda que o inconveniente de se utilizar fragmentos de micélio é o baixo rendimento no número de sítios de infecção formados. Precisa-se de uma quantidade cinco vezes maior de fragmentos de micélio do que conídios, em base de peso seco, para se conseguir uma mesma taxa de infecção.

Após a infecção, as células da epiderme, os espaços intercelulares do mesófilo, as células do mesófilo e os feixes vasculares são colonizados pelas hifas do fungo. Em cultivares resistentes a colonização dos feixes vasculares dificilmente ocorre. Nas lesões recém formadas, as células vizinhas às que foram colonizadas pelas hifas apresentam-se de coloração castanha e as paredes celulares se desintegram. As hifas crescem intercelularmente nas células menores da epiderme e intracelularmente nas células buliformes e feixes vasculares (Tullis, 1935).

Tullis (1935) verificou que em uma cultivar de arroz resistente à mancha-parda ocorre a formação de depósitos, de natureza química desconhecida, próximo das hifas de infecção nos espaços intercelulares, restringindo a colonização do fungo.

O fungo produz toxinas não-específicas encontradas nos fluídos da germinação dos conídios denominadas ofiobolina A e ofiobolina B (terpenos - C₂₅). Essas toxinas são fatores de virulência do patógeno e severidade da doença (Xiao et al., 1991). Estas toxinas causam a clorose das células da folha, fato especulado por Tullis, já em 1935. Os cloroplastos das células do hospedeiro desaparecem e estas se tornam amareladas, há alteração do conteúdo protoplasmático e, conseqüentemente, colapso celular (Tullis, 1935). Quando aplicadas sobre plantas de arroz, ofiobolina A e ofiobolina B causaram inibição da elongação de raízes, coleótilos e clorose foliar de plantas hospedeiras e não hospedeiras de *B. oryzae* (Xiao et al., 1991).

Após uma colonização com sucesso, ocorre a emergência de hifas através da cutícula e estômatos e a produção de conídios (Schickli & Percich, 1984).

De acordo com Webster & Gunnell (1992), a infecção pode ocorrer entre 16 e 36°C, sendo a ótima temperatura entre 20 e 30°C. Sherf et al. (1947) verificaram que o processo de infecção ocorre entre 20 e 30°C, sendo entre 20 e

25°C a faixa ótima. Melhor crescimento micelial ocorre entre 27 e 30°C, com formação de conídios entre 5 e 38°C (Ou, 1985).

Sherf et al. (1947) afirmam que a presença de água livre nas folhas do hospedeiro favorece o processo de infecção. Alta umidade relativa foi necessária para o estabelecimento da infecção a 22°C. Sem água livre na folha é necessária uma umidade relativa (UR) do ar de pelo menos 89% (Webster & Gunnell, 1992).

2.2.5. Sintomatologia

A mancha-parda apresenta três fases principais de danos às plantas de arroz, sendo redução na germinação das sementes já infestadas, manchas necróticas nas folhas e mais tarde, ou concomitantemente, descoloração dos grãos (Padwick, 1950). Praticamente todas as partes da planta de arroz podem ser infectadas em todos os estádios fenológicos da cultura (Nyvall, 1989; Ou, 1985).

Em plântulas, o fungo produz lesões arredondadas de coloração marrom, podendo ocorrer também distorção das folhas. Nos coleóptiles, os sintomas são parecidos com os das folhas (Padwick, 1950; Ou, 1985; Webster & Gunnell, 1992).

Nas folhas, os sintomas se apresentam como lesões circulares, mais frequentemente elipsóides, de coloração marrom escuro com halo clorótico podendo coalescer (Tullis, 1935; Reissig et al., 1986; Nyvall, 1989). Este halo está relacionado com as toxinas produzidas pelo patógeno (Mew & Gonzáles, 2002). O centro das lesões, com o passar do tempo, torna-se acinzentado por causa das estruturas reprodutivas do fungo (Nyvall, 1989). Em cultivares resistentes, observam-se apenas minúsculos pontos negros nas folhas (Webster & Gunnell, 1992). Se o número de lesões for grande as lesões coalescem, extensas áreas do tecido fotossintético são atingidas, com redução na produção de fotoassimilados pela planta (Webster & Gunnell, 1992).

Nas glumas, as lesões são negras ou marrons, podendo cobrir a superfície externa em alguns casos. Em condições ambientais favoráveis, conídios são produzidos nas lesões, dando à superfície um aspecto aveludado (Padway, 1950; Feakin, 1976; Ou, 1985). Quando a lesão ultrapassa a casca da semente formam-

se espiguetas estéreis ou lesões negras no endosperma (Nyvall, 1989) e descoloração ou enrugamento do grão quando descascado (Prabhu et al., 1999). Embora menos comum, o pescoço da panícula e as bainhas também podem apresentar sintomas da doença (Ou, 1985).

2.2.6. Sobrevivência e condições favoráveis ao progresso da doença

A semente é a maior responsável pela introdução do inóculo na lavoura (Amaral & Ribeiro, 1972; Webster & Gunnel, 1992). Sementes contaminadas podem gerar plantas com produção reduzida (Ou, 1985). O patógeno normalmente apresenta alta frequência de ocorrência em sementes de arroz (Bayer et al., 2005). Soave et al. (1997) realizaram levantamento em lotes de sementes de 42 cultivares de arroz produzidas na região Centro Oeste do Brasil, e constataram frequência média de 94% do fungo *B. oryzae*, com 38% de incidência. Bedendo & Prabhu (1986), testando cinco variedades de arroz em casa de vegetação, concluíram que a transmissão e a germinação de sementes são influenciadas pelo grau de infecção das sementes. Malavolta et al. (2006) verificaram correlação simples entre a incidência de *B. oryzae* nas sementes e diversas variáveis avaliadas em condições de laboratório, casa de vegetação e campo, como germinação, emergência, número de plântulas mortas e/ou infectadas e peso de 100 panículas. Toledo et al. (2006) observaram níveis de transmissão do fungo para o coleóptilo e plúmula acima de 80%, causando a morte das plântulas.

Os restos culturais também são fonte de inóculo (Padwick, 1950; Feakin, 1976; Ou, 1985). O fungo pode sobreviver por 2 ou 3 anos em partes infectadas das plantas, principalmente as sementes (Feakin, 1976; Ou, 1985;). Page et al. (1947), citados por Padwick (1950), verificaram que em UR de 45%, em temperatura de 31°C a viabilidade dos conídios quase não se alterou, em relação à uma maior UR. Isto leva a crer que em muitos países em que o período entre cultivos é seco, os conídios podem permanecer no solo e infectar oportunamente as plantas de arroz.

No campo, fatores como o vento e chuva tendem a diminuir esta viabilidade, como constatado através da utilização de chuva simulada em plantas recém inoculadas em casa de vegetação (Sherf et al., 1947). O vento e os respingos de chuva podem também dispersar o fungo, porém com menor importância do que a dispersão por sementes contaminadas (Padwick, 1950).

Como mencionado acima, hospedeiros alternativos também podem apresentar sintomas da doença, porém sob condições de inoculação artificial. Portanto, hospedeiros alternativos representam pequena probabilidade de serem fonte de inóculo para o arroz (Webster & Gunnel, 1992).

Associa-se muito a intensidade da mancha-parda do arroz à condição fisiológica da planta, que depende do status nutricional, que por sua vez, é dependente dos atributos do solo. No Japão, plantas crescendo em solos arenosos, turfosos e com baixos teores de nutrientes foram mais susceptíveis à mancha-parda. Na Índia este fato também ocorre em solos distróficos e com estresse hídrico (Feakin, 1976). Takahashi (1967) observou que a deficiência de Si, K, Mn e Mg tornou as plantas de arroz susceptíveis à mancha-parda e que a aplicação de escórias de forno contendo Si, Ca, Mg e Mn foi eficiente no controle desta doença. Reissig (1986) afirma que a mancha-parda é uma doença comum em solos distróficos e isso muitas vezes dificulta a separação da verdadeira causa da perda em produtividade, se pela doença ou pela deficiência nutricional. Castaño & Klap (1990), realizando levantamento de patógenos associados à mancha dos grãos em arroz de sequeiro sob solos ácidos da Indonésia, verificaram que *B. oryzae* e *Phoma* sp. predominavam, com níveis de infecção de 30 a 60%. Chatopadhyay & Dikson (1960), citados por Ou (1985), reportam que a deficiência e o excesso de N aumentam a severidade da mancha-parda. Baba & Takahashi (1957) verificaram que alta umidade relativa do ar e baixa umidade do solo reduziram a absorção de Si e K, aumentando a susceptibilidade das plantas à mancha-parda.

A idade da planta também pode influenciar a infecção pelo fungo. Diversos autores têm demonstrado aumento na susceptibilidade do arroz à mancha-parda à medida que a planta torna-se mais velha (Sherf et al., 1947; Fazli & Shroeder,

1966). Quando a doença aparece na fase reprodutiva das plantas, tanto o peso quanto o número de grãos por panícula são reduzidos (Webster & Gunnel, 1992). Inoculando artificialmente as panículas de arroz, Fazli & Schroeder (1966) verificaram redução na produção de 23 e 8% quando a inoculação foi realizada nas fases de florescimento e estágio de grão leitoso, respectivamente. Malavolta (1999) observou que maiores danos estão associados às infecções mais precoces, limitadas até o período de florescimento.

2.2.7. Métodos de Controle

Vários métodos de controle são recomendados para a mancha-parda. A utilização de variedades resistentes é considerado o método mais eficiente e econômico (Ou, 1985). Testes de resistência têm sido conduzidos em muitos países, mas a variabilidade do fungo não tem sido estudada detalhadamente (Ou, 1985), isso dificulta o trabalho dos melhoristas. Além disso, devem ser realizados estudos com reações às manchas foliares e das panículas (Malavolta et al., 1992). Não existem ainda variedades com elevado grau de resistência à mancha-parda (Bedendo & Prabhu, 2005).

O tratamento de sementes apresenta eficiência somente nas fases iniciais da cultura (Brignani Neto et al., 1979). Entretanto, Valarini et al. (1988), tratando um lote de sementes de arroz com 46% de infecção com *B. oryzae*, verificaram não haver diferença na emergência das plântulas e produção de grãos em relação a um lote não infectado. Prabhu & Vieira (1989), constataram aumento da germinação e menor transmissão do fungo *B. oryzae* presente em sementes naturalmente infectadas após o tratamento com carboxin-M, carboxin + thiram e thiram + triadimenol. Toledo et al. (2006), com esta prática, reduziram de 60 a 100% a transmissão de *B. oryzae* da semente para a plântula. Serghat et al. (2002) concluíram que mesmo com o tratamento de sementes foi necessário controlar a doença ao longo da fase vegetativa, com aplicação foliar de fungicidas.

A pulverização foliar com fungicidas apesar de ser eficiente é economicamente inviável (Prabhu & Bedendo, 1981). Para o controle de

manchas de grãos ocasionadas por *B. oryzae*, o procloraz foi o produto mais eficiente dentre os 7 fungicidas avaliados por Malavolta (1999). Santos et al. (2005), analisando a eficiência de diferentes fungicidas no controle das principais doenças do arroz em condições de campo irrigado, verificou que nenhum dos 10 tratamentos avaliados, incluindo fungicidas isolados ou em associação, mostrou eficiência no controle de mancha-parda.

A pulverização foliar de fungicidas para o controle desta doença deve ser realizada de forma restrita, acompanhada de estudos de viabilidade econômica (Embrapa, 1993). Os fungicidas que podem ser empregados para o controle preventivo são o mancozeb, chlorothalonil+tiofanato metílico, tebuconazole, difenoconazole e azoxistrobin (Bedendo & Prabhu, 2005).

A nutrição da planta, como visto anteriormente, é importante no caso da mancha-parda do arroz. Muitos autores recomendam a utilização de uma adubação equilibrada para evitar a doença ou pelo menos reduzir os seus danos (Padwick, 1950, Ou, 1985, Webster & Gunnel, 1992; Embrapa, 1993).

O controle cultural, realizado através da rotação de culturas, também é eficiente devido ao efeito negativo desta prática na sobrevivência dos conídios nos restos culturais (Feakin, 1976).

Produtos naturais, à base de óleos ou extratos vegetais para o controle da mancha-parda podem ser uma alternativa. Redução na transmissão de patógenos, dentre ele o fungo *B. oryzae*, de sementes naturalmente infectadas para as plântulas foi obtida com a aplicação de óleos extraídos de *Cymbopogon citratus*, *Ocimum gratissimum* e *Thymus vulgaris* (Nguefack et al., 2004). Harish et al. (2004), utilizando extrato de sementes de 15 plantas de diversas famílias *in vitro*, encontraram redução de até 70% de germinação e comprimento do tubo germinativo do fungo *B. oryzae*. O extrato mais promissor foi o de *Curcuma longa* L.. Inibição de germinação dos conídios *in vitro* por extratos de cinco espécies também foi verificada por Raju et al. (2004). Estes autores também verificaram que os extratos de *Allium sativum* inibiram em 90% o crescimento micelial na concentração de 100 cL L⁻¹ de extrato/água. Entretanto, para controlar

a doença nas plantas, a concentração do extrato precisou ser elevada para 500 cL L⁻¹.

2.3. Manganês

O Mn pode ser encontrado no solo em três estados de oxidação: Mn²⁺, Mn³⁺ e Mn⁴⁺. É um elemento essencial às plantas e é absorvido na forma de íon divalente (Norvell, 1989), que é a forma determinada no solo para avaliar sua disponibilidade para as plantas. Campbell & Nable (1988) afirmam que o rendimento do arroz é sensível a níveis deficientes ou excessivos de Mn na solução do solo.

No solo, o Mn pode ser encontrado em três formas principais: trocável, complexado organicamente e associado a óxidos. Da interação entre estas três formas resulta sua disponibilidade para as plantas. Esta interação depende do tipo de solo, pH e conteúdo de matéria orgânica (Marschner, 1995).

A forma em que o Mn predomina no solo está diretamente relacionada com o pH (Malavolta & Kliemann, 1985), concentração de O₂ (Gilkes & McKenzie, 1988) e atividade de microrganismos redutores (Marschner et al., 1991) ou oxidantes (Rengel, 1997). Assim, em solos muito ácidos, o Mn pode atingir concentrações tóxicas (Foy, 1973), que podem ser contornadas pela calagem, que reduz sua disponibilidade (Malavolta & Kliemann, 1985). Em solos muito ácidos, os teores de Mn podem ser superiores a 1000 mg kg⁻¹, e em solos orgânicos com pH mais elevado, próximo à neutralidade, estes teores são inferiores a 0,1 mg kg⁻¹ (Norvell et al., 1988).

O Mn é absorvido passivamente pelas plantas (Kochian, 1991), transportado na forma reduzida das raízes para a parte aérea através do xilema, seguindo a corrente transpiratória (Rauser, 1999). Entretanto, o Mn em plantas pode ser encontrado formando compostos com ácidos orgânicos ou fosfato no xilema (Luk et al., 2003). Deste modo, sintomas de deficiência deste nutriente ocorrem freqüentemente nas folhas mais novas, mesmo que as folhas mais velhas apresentem concentrações adequadas do elemento (Loneragan, 1988). Este autor

afirma que a mobilidade do Mn é intermediária entre o P, reconhecidamente móvel, e o Ca, praticamente imóvel.

Existe uma ampla diferença entre espécies de plantas quanto à concentração de Mn considerada fisiologicamente suficiente (El-Jaoual & Cox, 1998). É um dos nutrientes que apresenta maiores variações em termos de teores nas plantas (Mukhopadhyay & Sharma, 1991). Segundo Clarkson (1988), a divergência entre a exigência das plantas em Mn e os teores deste micronutriente encontrados nos tecidos das plantas indica que sua absorção é pouco regulada nas raízes, podendo ocorrer acúmulo exagerado, evoluindo para um quadro de toxidez. Este fato tem maior probabilidade de ocorrer em solos com drenagem deficiente, compactados e com valores de pH inferiores a 5,5, pois estes fatores aumentam a disponibilidade do Mn no solo (Abreu et al., 1994).

Em geral, as espécies vegetais diferem consideravelmente quanto aos teores foliares de Mn considerados adequados (30-500 mg kg⁻¹) (Clarkson, 1988); deficientes (10-20 mg kg⁻¹) (Marschner 1995) e tóxicos (200-5300 mg kg⁻¹) (Edwards & Asher, 1982). Esses valores dependem da espécie, do genótipo, das condições ambientais (temperatura, umidade, pH, luz, fonte da adubação nitrogenada) e interações nutricionais com o Ca, Mg, Fe, P, Mo e Si e ação de micorrizas (Horiguchi, 1987; Horst, 1988; El-Jaoual & Cox, 1998; Nogueira & Cardoso, 2002).

Para a cultura do arroz em fase de perfilhamento, os teores foliares considerados deficientes e tóxicos são: < 20 e > 2500 mg kg⁻¹, respectivamente (Malavolta, 1979). Para Fageria (1984), o nível de deficiência é < 20 mg kg⁻¹, mas a toxidez ocorre quando os teores foliares deste elemento estão acima de 1000 mg kg⁻¹. Porém, o teor foliar de Mn pode ser superior à 3000 mg kg⁻¹ sem sintomas de toxidez e sem reduzir a produção (Tanaka & Yoshida, 1970). A maior fase de absorção deste elemento na cultura do arroz ocorre por ocasião da diferenciação do primórdio da panícula e permanece até o final da emissão das mesmas, reduzindo-se na maturação (Malavolta & Fornasieri Filho, 1983).

Kabata-Pendias & Pendias (1985) e Marschner (1995) afirmam haver interações negativas entre o Mn²⁺ e outros cátions bivalentes como o Ca, Mg, Fe

e Zn, quando em níveis elevados. Devido a esta interação com o Fe, recomenda-se a aplicação de Mn em solos com problema de toxidez causada pelo Fe (Ponnamperuma & Lantin, 1985), entretanto, pode haver deficiência de Fe induzida pela alta concentração de Mn no solo (Lee, 1972). Em alguns trabalhos, a relação Fe/Mn foi utilizada como um indicador da toxidez de Mn em plantas superiores (Foy, 1984).

O Mn participa na etapa fotoquímica da fotossíntese, mais precisamente na fotólise da água; da evolução do oxigênio no sistema fotossintético; da multiplicação e funcionamento dos cloroplastos; da síntese da clorofila; e como precursor de aminoácidos e hormônios (Römheld & Marschner, 1991; Malavolta et al., 1997). Quando presente em níveis considerados deficientes ou tóxicos, o mesmo promove a oxidação do ácido indol-acético (AIA). Participa também da síntese de proteínas como componente estrutural dos ribossomos e como ativador da RNA-polimerase (Marschner, 1995). Além disso, participa como ativador ou co-fator de mais de 35 enzimas que atuam em processos de regulação hormonal, síntese de compostos fenólicos e assimilação do amônio, dentre elas a Mn-superóxido dismutase, Mn-catalase, piruvato carboxilase e fosfoenolpiruvato carboxinase (Burnell, 1988; Marschner, 1995). É cofator da fenil-alanina-amônia-liase e da ácido cinâmico carboxilase, enzimas envolvidas na produção de compostos fenólicos e lignina (Mohan Krishna & Bhart, 1983), os quais atuam na defesa da planta contra o ataque de patógenos e pragas (Marschner, 1995).

Existe uma estreita relação entre a nutrição da planta com o Mn e o metabolismo antioxidante dos vegetais (Shenker et al., 2004). A atividade da peroxidase, enzima que participa deste metabolismo, torna-se elevada com a deficiência (Hannam & Ohki, 1988) e na condição de excesso, ocorre a deposição de Mn e compostos fenólicos oxidados, evidenciando-se que a peroxidase está envolvida nesta reação (Fecht-Christoffers et al., 2003).

A deficiência de Mn promove inibição na biossíntese de lipídios e carotenóides, progressiva desorganização da estrutura lamelar nos cloroplastos e cloroplastos vacuolados e redução no teor de amido. Adicionalmente, reduz a

divisão celular e mais drasticamente o alongamento da célula, sendo este efeito em parte indireto, devido à diminuição no suprimento de carboidratos e à diminuição do AIA na planta (Malavolta et al., 1997). A deficiência de Mn também afeta adversamente a produtividade, a fotossíntese, o crescimento de raízes, os níveis de N solúvel, a regulação hormonal e a síntese de compostos secundários como compostos fenólicos, lignina, clorofila, ácido giberélico, esteróis e quinonas (Thompson & Huber, 2007).

Os sintomas de deficiência de Mn são caracterizados pela clorose entre as nervuras das folhas novas, na forma de reticulado grosso. Áreas necróticas marrons desenvolvem-se nas folhas à medida que a deficiência torna-se mais severa (Römheld, 2001).

A toxidez do Mn afeta mais severamente a parte aérea das plantas do que as raízes, pois seu acúmulo ocorre nas folhas, provocando sintomas que são bem característicos (Foy, 1973; Pavan & Bingham, 1981). Os sintomas de toxidez são muito variados entre as espécies de plantas e até entre os genótipos de uma mesma espécie. Os mais comuns são clorose internerval e ao longo das margens da folha, pequenos pontos necróticos escuros cercados por tecido clorótico em folhas mais velhas. Adicionalmente, folhas novas ficam encarquilhadas ou deformadas, ocorre perda da dominância apical e aumento de emissão de raízes secundárias (Marschner, 1995; El-Jaoual & Cox, 1998).

Em excesso de Mn pode ocorrer aumento na atividade de enzimas como a peroxidase e a polifenoloxidase (Morgan et al., 1976). O aumento da atividade da peroxidase em algumas espécies é seguido do aparecimento de lesões marrons, formadas devido à oxidação de substratos por esta enzima. O exame destas lesões em folhas de feijão revelou a presença de compostos fenólicos oxidados na parede celular (Wissemeier & Horst, 1992). A peroxidase oxida facilmente compostos fenólicos como o ácido clorogênico e o ácido cafeíco, formando substâncias escuras e aparecimento de necrose no tecido. O aparecimento da clorose ocorre devido ao excesso de Mn induzir a fotodecomposição da clorofila (Horiguchi, 1987). Esse autor encontrou aumento na atividade da peroxidase na

parte aérea e nas raízes de arroz com o aumento da concentração de Mn na solução nutritiva.

A tolerância à toxidez de Mn depende, dentre outros fatores, da espécie vegetal e da cultivar (Foy, 1988). O excesso de Mn pode ser armazenado nos vacúolos e na lamela do cloroplasto (Foy et al., 1978; Lidon & Teixeira, 2000). Diversas cultivares de arroz são consideradas altamente tolerantes ao Mn (Foy et al., 1978). Estudos mostram que em cultivares tolerantes a altos níveis de Mn, o seu acúmulo ocorre nas folhas (Lidon & Teixeira, 2000). Dependendo da espécie vegetal, o Mn em excesso é estocado nos vacúolos, na parede celular e nos tilacóides dos cloroplastos (Foy, 1988; Lidon & Teixeira, 2000).

O Mn é ativador de diversas enzimas importantes na síntese de compostos como fenóis, glicosídeos cianogênicos e lignina, todos relacionados à maior resistência das plantas a patógenos (Burnell, 1988; Graham & Webb, 1991). A rota na qual eles são produzidos denomina-se rota do ácido chiquímico, por ser este ácido um de seus produtos intermediários. Nessa rota, observa-se que grande parte dos compostos fenólicos é derivada da fenilalanina e da tirosina. O ácido cinâmico deriva da perda de uma molécula de amônia pela fenilalanina, catalisada pela enzima fenil-alanina-amônia-liase (PAL). A tirosina é transformada em ácido 4-hidroxicinâmico, catalisada pela tirosina-amônia-liase (TAL) (Taiz & Zeiger, 1991).

O Mn desempenha dois papéis importantes na rota do ácido chiquímico (Campbell & Nable, 1988; Graham & Webb, 1991). Primeiramente, atua como ativador da enzima PAL, que desencadeia várias reações da rota, levando à produção de vários compostos fenólicos envolvidos na resistência das plantas às doenças e pragas, como fitoalexinas, flavonóides e taninos (Hammerschmidt, 1999). Posteriormente, este elemento participa como co-fator da enzima peroxidase, associada à polimerização de álcoois para a formação da lignina no final da rota (Burnell, 1988; Leina et al., 1996). Assim, segundo Mauch-Mani & Slusarenko (1996), inibidores específicos da PAL reduzem a resistência das plantas às doenças.

A literatura registra o efeito do Mn na severidade de doenças tais como: podridão das raízes, mal-do-pé, míldio pulverulento, ferrugem da folha e do colmo dos cereais, tombamento e murcha vascular do algodoeiro, requeima e sarna da batata inglesa, manchas foliares em soja (Graham & Webb, 1991) e vassoura-de-bruxa do cacauzeiro (Nakayama, 1998; Aguilar, 1999). A aplicação de Mn reduziu a incidência do mal-do-pé do trigo e o míldio pulverulento (Huber & Keeler, 1977, Heckman et al., 2003).

Thompson & Huber (2007), em revisão sobre o efeito do Mn em doenças de várias culturas, constataram que de 70 doenças causadas por fungos, bactérias e vírus, 61 apresentaram redução para algum efeito do patógeno, 8 apresentaram aumento e um trabalho, realizado com várias viroses do tomateiro, apresentou aumento e redução dos efeitos dos vírus devido ao Mn.

O Mn é o micronutriente mais associado aos mecanismos de resistência das plantas às doenças, principalmente na produção de compostos fenólicos e lignina (Graham & Webb, 1991). Ele pode exercer efeitos negativos no crescimento, esporulação, reprodução e produção de enzimas e ou toxinas pelos patógenos (Huber & Wilhelm, 1988). Entre os mecanismos de indução de resistência a doenças promovidas pelo Mn, estão o aumento na síntese de lignina e compostos fenólicos solúveis, inibição da indução de aminopeptidases promovida pelo patógeno para a produção de aminoácidos necessários ao seu crescimento, inibição de algumas exoenzimas produzidas pelo fungo para a degradação da parede celular do hospedeiro e inibição direta do crescimento do fungo pelo efeito tóxico do Mn (Graham & Webb, 1991).

Compostos fenólicos e lignina formados em ausência de infecção, uma vez que são compostos constitutivos das plantas, são considerados, nessas condições, compostos pré-formados (Pascholati & Leite, 1995). Entretanto, pode ocorrer aumento na síntese destes compostos após o início do processo infeccioso, assim são considerados pós-formados (Nicholson & Hammerschmidt, 1992). A resistência das plantas às doenças pode ser passiva e/ou ativa, dependendo do momento em que são formados os compostos, em pré ou pós-infecção (Pascholati & Leite, 1995). A resistência passiva seria conferida por

maior lignificação das paredes celulares e como mecanismos de resistência ativa pode-se citar o acúmulo de compostos fenólicos tóxicos no sítio de infecção para evitar o desenvolvimento do patógeno, que pode envolver a morte coordenada e rápida de células vizinhas (Fernandez & Heat, 1989) e a formação de papilas (Bonello et al., 1991)

Os compostos fenólicos são metabólitos secundários das plantas, caracterizados por possuírem um grupo fenólico com pelo menos um anel aromático ao qual está ligada uma hidroxila funcional. A principal rota metabólica que sintetiza a maioria destes compostos é a rota do ácido chiquímico (Taiz & Zeiger, 1991). Algumas fitoalexinas, definidas como metabólitos secundários que se acumulam em torno do local de infecção e apresentam propriedades fungitóxicas, são de natureza fenólica (Taiz & Zeiger, 1991).

A lignina é um biopolímero complexo que têm sua origem na rota dos fenilpropanóides pela polimerização desidrogenativa de seus precursores via rota do ácido chiquímico (Stumpf & Conn, 1981). É utilizada na formação das papilas, formadas em sítios da parede celular como resposta ativa da planta à tentativa de penetração por patógenos. As papilas também são formadas por calose, Si e diversos compostos orgânicos que fluorescem sob luz ultravioleta (Schneider et al., 1994). Precursores de lignina também podem ser tóxicos aos patógenos (Hammerschmidt & Kuc, 1982). Além disso, por ser composta por polímeros fenólicos resistentes à degradação enzimática, é uma importante barreira bioquímica à invasão patogênica através da parede celular (Vidhyasekaran, 2004).

Plantas de *Agrotis* sp. deficientes em Mn apresentaram maior susceptibilidade ao mal-do-pé (Hill et al., 1999). Isso pode estar relacionado com o papel do Mn na biossíntese da lignina e à importância da lignificação das paredes celulares como mecanismo de defesa contra às doenças (Marschner, 1995; Hill et al., 1999).

Brown et al.(1984) verificaram que plantas de trigo deficientes em Mn (teores menores que 18 mg kg^{-1}) apresentaram menores teores de compostos fenólicos solúveis e lignina na parte aérea. Nesta situação, os níveis de

aminoácidos aromáticos como a fenilalanina e tirosina diminuíram e, por conseguinte, os teores de compostos fenólicos solúveis e lignina decresceram (Ebeid & Kutacek, 1979), o que reforça a importância da lignificação das paredes celulares na defesa contra as doenças e sua possível relação com o suprimento de Mn. Por outro lado, o excesso de Mn também pode predispor as plantas a certas doenças (El-Jaoual & Cox, 1998), principalmente as de origem virótica (Thompson & Huber, 2007).

Semelhantemente ao que ocorre com outros elementos químicos nos tecidos foliares infectados, a concentração de Mn é alterada por muitas doenças causadas por fungos, bactérias e vírus (Chandra & Mondy, 1981; Huber & Wilhelm, 1988; Zhao et al., 1997). A amplitude destas alterações depende da espécie, cultivar e da parte da planta atacada (Thompson & Huber, 2007). Teores baixos de Mn, devido à baixa mobilidade deste elemento na planta e sua baixa disponibilidade no solo foram encontrados nos tecidos infectados pela vassoura-de-bruxa em brotações de cacuaeiro (Nakayama et al., 2000). A aplicação foliar deste micronutriente reduziu a porcentagem de plantas com essa doença (Nakayama et al., 1998).

O gene de plantas de milho e soja resistentes ao glifosato reduz a absorção e eficiência na utilização do Mn, predispondo-as ao ataque por patógenos (Dodds et al., 2002). A resistência à sarna na cultura da batata inglesa foi maior nas cultivares eficientes na utilização do Mn do que nas menos eficientes (Huber, 1991). Foi verificado que genótipos de trigo mais eficientes na utilização do Mn, em solos deficientes neste nutriente, apresentaram maior resistência ao mal-do-pé (Rengel et al., 1993; Pedler et al., 1996).

2.4. Silício

O Si é considerado um elemento ‘*quasi-essential*’ ou agronomicamente essencial, por propiciar vários efeitos positivos e significantes para muitas espécies vegetais (Epstein & Bloom, 2005). Segundo esses autores, é difícil provar, cientificamente, a essencialidade desse elemento por o mesmo estar amplamente distribuído na natureza. O Si está presente em quantidades

significativas mesmo em sais nutrientes, água e ar altamente purificados (Werner & Roth, 1983). Encontra-se presente na solução do solo na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4), a maior parte na forma não dissociada, a qual é prontamente absorvida pelas plantas (Raven, 1983; Takahashi, 1995). A absorção do Si pelas plantas ocorre na forma de ácido monossilícico. A concentração do elemento nessa forma na solução do solo varia entre 0,1 a 0,6 $mmol L^{-1}$ e a maior parte está na forma não dissociada (Knight & Kinrade, 2001).

Apesar de ser o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre (Marschner, 1995), a maioria das classes de solos, que já passaram por processo de dessilicização, a exemplo dos Latossolos, solos orgânicos e arenosos como os Neossolos Quartzarênicos, apresentam baixos teores solúveis deste elemento (Juo & Sanchez, 1986; Savant et al., 1997; Korndörfer et al., 1999a). Para ser absorvido, o Si, assim como todo elemento, deve estar na solução do solo em uma forma passível de absorção pelas plantas.

Na solução do solo, o ácido monossilícico comporta-se como um ácido muito fraco, de forma que em pH próximo da neutralidade, apenas 0,2% se ioniza na forma carregada negativamente ($Si(OH)_3^-$) (Mckeague & Cline, 1963) e com sua solubilidade limitada a 2 $mmol L^{-1}$. Acima desta concentração, ocorre a polimerização e produção de partículas coloidais de sílica hidratada ($SiO_2 \cdot H_2O$) (Birchall, 1995). Esse elemento move-se no solo através da difusão e do fluxo de massa (Elawad & Green, 1979).

As plantas diferem bastante na sua capacidade de absorver o Si, até mesmo entre genótipos de uma mesma espécie como o arroz (Deren et al., 1994). Em arroz, trigo e cevada, a absorção de Si é um processo ativo (Okuda & Takahashi, 1962; Barber & Shone, 1966; Rains et al., 2006). Algumas dicotiledôneas como pepino, melão, morango e soja absorvem o Si passivamente (Takahashi et al., 1990; Ma et al., 2001b). Estudos realizados com plantas mutantes de arroz, que não apresentam capacidade de absorver Si, indicam a existência de proteínas transportadoras desse elemento nas raízes secundárias desta espécie (Tamai & Ma, 2003).

O Si é transportado das raízes para a parte aérea pelo xilema e após ser depositado, torna-se imóvel (Balastra et al., 1989). Os maiores teores de Si são encontrados nos tecidos mais velhos (Hodson & Sangster, 1998). Casey et al. (2003) verificaram que o ácido monossilícico predominava no exsudato xilemático de trigo, não encontrando evidências de complexos organossilícicos.

Após a absorção do Si e seu transporte através do xilema, inicia-se o processo de silicificação, com a polimerização do ácido silícico e a formação de sílica amorfa hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ou sílica biogênica, sílica gel ou opala. Mais de 90% do Si encontrado na parte aérea do arroz está presente na forma de sílica amorfa hidratada (Ma & Takahashi, 2002). Esta sílica pode ser depositada intracelularmente, diminuindo o lúmen celular, ou ser depositada extracelularmente, principalmente nas células epidérmicas (Blackman, 1969).

Os teores foliares de Si variam, conforme a espécie. Geralmente as plantas pertencentes às famílias Poaceae, Equisetaceae e Ciperaceae apresentam maiores teores foliares de Si (Takahashi et al., 1990). Segundo estes autores, esta diferença ocorre em razão do mecanismo pelo qual este elemento é absorvido, podendo ser passivo, ativo ou com rejeição. Em culturas como o arroz e a cana-de-açúcar, o acúmulo de Si pode igualar-se ou exceder àqueles dos macronutrientes como o N (Savant et al., 1997). Algumas espécies lenhosas nativas de cerrado também apresentam grande capacidade de acúmulo de Si nas folhas e cascas do tronco (Vilarinho, 2002).

O arroz é considerado uma das culturas que mais acumulam Si em seus tecidos, podendo alcançar teores na parte aérea acima de 100 g kg^{-1} (Ma et al., 2001a). Estima-se que para produção de 5 t ha^{-1} de grãos de arroz, sejam removidos de 230 a 470 kg de Si do solo (Savant et al., 1997). Snyder et al. (1986), trabalhando em Organossolos da Flórida, sugerem que as plantas de arroz deveriam conter pelo menos 30 g kg^{-1} de Si na parte aérea para garantir um pleno desenvolvimento.

No ciclo biogeoquímico do Si, o maior dreno é representado pela planta, com a formação da sílica amorfa (Basile-Doelsch et al., 2005). O declínio na produtividade do arroz em algumas regiões do mundo pode ser o reflexo desta

constatação. A exportação agrícola anual de Si é estimada em 210-224 milhões de toneladas (Matichenkov et al., 2001). Segundo estes autores, isto também representa a quantidade total de Si dissolvido e transportado pelos rios, tendo como destino final os oceanos. Outros drenos de natureza abiótica representam a precipitação do Si em solução formando minerais, adsorção em óxidos e hidróxidos de Fe e Al, a polimerização do ácido silícico e a lixiviação. Assim, os cultivos sucessivos de arroz sem a devida reposição do Si através de fontes desse elemento podem causar a deficiência de Si no solo e acarretar problemas futuros de ordem econômica. Já as fontes de ácido monossilícico são a decomposição de resíduos vegetais, uma vez que a sílica amorfa é uma forma de Si capaz de se tornar disponível para as plantas (Derry et al., 2005), a dissociação do ácido silícico polimerizado, a liberação de Si dos oxi-hidróxidos de Fe e Al, a dissolução de minerais, água de irrigação e fertilização silicatada (Werner & Roth, 1983).

O Si é um elemento que pode minimizar vários tipos de estresse sofridos pela planta e o único elemento que não causa danos quando presente em grandes quantidades (Epstein & Bloom, 2005; Ma et al., 2001b). Alguns efeitos benéficos do Si incluem a redução do estresse hídrico por propiciar menor transpiração, aumento da eficiência na fotossíntese por manter folhas mais eretas e rígidas e com maior interceptação da luz; atraso na senescência; aumento da resistência à doenças, pragas, frio, salinidade, toxidez de Al, Mn, Fe e B (Adatia & Besford, 1986; Faria, 2000; Ma et al., 2001b, Lux et al., 2002, Néri et al., 2005; Gong et al., 2005, Gunes et al., 2007). Muitos destes benefícios são atribuídos à camada de sílica que se acumula abaixo da cutícula. Apesar disso, muitas culturas consideradas não acumuladoras de Si se beneficiaram da aplicação foliar desse elemento como o pepineiro, o melão e a videira (Bowen et al., 1992; Menzies et al., 1992). Bélanger et al. (1995) afirmam que o silicato de potássio é utilizado no controle de míldio pulverulento em videira e roseira na Europa. O acúmulo de Si, através da deposição pela aplicação do silicato de potássio, reduziu a germinação de conídios e sua posterior penetração nas folhas de pepineiro (Menzies et al., 1991a).

Para o arroz, a nutrição com Si traz vários benefícios, tanto no aumento do crescimento da planta e aumento na produção, quanto incrementando o nível de resistência da planta a condições estressantes como doenças, pragas, seca, salinidade, acamamento, toxidez de Al, Mn, Fe, além de reduzir a esterilidade das flores e aumentar a taxa fotossintética (Savant et al., 1997; Yeo et al., 1999; Pershin et al., 1995). Alvarez & Datnoff, (2001), analisando o potencial econômico do Si no manejo integrado e sustentável da produção do arroz, concluem que quando se considera todos os benefícios trazidos com a aplicação deste elemento, não é irracional admitir que eles excedam o custo de aplicação em vários países produtores de arroz no mundo.

O Si promoveu maior tolerância ao estresse salino em várias espécies como trigo (Ahmad et al., 1992), cevada (Liang et al., 2003), arroz (Matoh et al., 1986; Yeo et al., 1999) e pepineiro (Zhu et al., 2004). Em cevada e tomate, essa maior tolerância deveu-se ao aumento da atividade de enzimas antioxidantes (Liang et al., 2003, Al-aghabary et al., 2004) e aumento da atividade da H⁺-ATPase na membrana plasmática da raiz, aumentando a captação e translocação de K⁺, reduzindo a absorção de Na⁺ e Cl⁻ (Liang, 1999). Liang et al. (2005) concluíram que plantas de cevada crescidas em solução nutritiva contendo Si e submetidas a estresse salino apresentaram aumento na atividade da H⁺-ATPase e H⁺-PPiase na membrana do tonoplasto e diminuição dos danos da oxidação lipídica da membrana, ajudando a manter a integridade da membrana e suas funções. Gunes et al., (2007) verificaram que o Si conferiu resistência mútua ao estresse salino e toxidez de B em plantas de tomate e espinafre crescendo em solo com níveis naturalmente tóxicos de Na e B. Esta resistência está relacionada também com o aumento da atividade de enzimas antioxidantes, prevenindo danos oxidativos na membrana, bem como redução na translocação de Na, Cl e B para a parte aérea. Com uma concentração de 0,89 mmol L⁻¹ de Si, Matoh et al. (1986) constataram uma redução na translocação de Na⁺ das raízes para a parte aérea e aumento na produção de matéria seca em plantas de arroz sob estresse salino.

É evidente que o Si decresce a severidade de várias doenças em culturas como arroz, pepino, trigo, soja, videira, morango, feijão, café e cana-de-açúcar

(Samuels et al., 1991, Menzies et al., 1992a; Datnoff, et al., 1997; Grothge-Lima, 1998; Fawe et al., 1998; Bélanger et al., 2003; Kanto et al., 2004; Pozza et al., 2004). A incidência de doenças é menor quando o teor de Si no tecido da planta é maior (Datnoff et al., 1990, 1991; Osuna-Canizales et al., 1991).

No caso do arroz são vários os relatos de sucesso da utilização da fertilização com Si no aumento da resistência da planta a diversas doenças como a brusone [*Magnaporthe grisea* (Hebert) Barr], a mancha-parda (*B. oryzae* Breda de Hann), a podridão-do-colmo (*Magnaporthe salvinii* Catt.), a queima-das-bainhas (*Rhizoctonia solani*) e a descoloração dos grãos (*Fusarium* sp. e outros fungos) (Datnoff et al., 1991; Korndörfer, et al., 1999b; Datnoff et al., 1997). Houve redução da severidade de escaldadura da folha causada pelo fungo *Monographella albescens* (Thümen) (Seebold et al., 2004). Chang et al. (2002) também obtiveram significativa redução no comprimento das lesões causadas pela bactéria *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*, ainda não presente no Brasil. Redução na incidência do nematóide *Meloidogyne* spp. também foi verificada (Swain & Prasad, 1988). Yamauchi & Winslow (1987) observaram quase 30% de decréscimo na incidência de manchas de grãos com a aplicação de 400 kg ha⁻¹ de silicato de sódio antes da semeadura.

Em um Organossolo da Flórida, naturalmente deficiente em Si, Datnoff et al. (1991) constataram uma redução significativa na severidade de brusone e de mancha-parda de 30,5 e 15%, respectivamente, em relação à testemunha, com a aplicação de silicato de cálcio. Houve efeito residual eficiente no controle dessa doença em safras subseqüentes. Outros autores também constataram redução na severidade, porém sem testar o efeito residual do silício (Gangopadhyay & Chatopadhyay, 1974a; Lee et al., 1981; Nanda & Gangopadhyay, 1984). Correa-Victoria et al., (1996), trabalhando em solo com avançado processo de dessilicatação, verificaram que a aplicação de silicato reduziu consideravelmente a severidade da escaldadura das folhas e da brusone.

Datnoff et al. (1997) constataram significativa redução na severidade da mancha-parda em um Histossolo, com a aplicação de Si, através de escórias. Berni (2001) verificou redução na severidade da brusone nas folhas de arroz com

utilização de casca de arroz e suas cinzas. Além disso, o Si foi capaz de aumentar o nível de resistência de genótipos de arroz suscetíveis à brusone para níveis semelhantes aos encontrados em genótipos resistentes (Rodrigues et al., 2001; Seebold, et al., 2000).

Não só o arroz é beneficiado com a aplicação de Si. Plantas de soja cultivadas em solução nutritiva, na presença de Si, tiveram sua resistência ao cancro da haste aumentada, diminuindo em até 90% a extensão das lesões das plantas infectadas (Grothge-Lima, 1998). Pepineiros cultivados em solução nutritiva com a adição de Si apresentaram redução na intensidade da podridão das raízes associada a *Pythium ultimum* (Chérif et al., 1992) e menor número e área de colônias de *Podosphaeria xanthii* (*Sphaerotheca fuliginea*) por folha (Menzies et al., 1991a), em relação àqueles que não receberam o elemento.

O modo pelo qual o Si atua na resistência das plantas a doenças é bastante discutido na literatura. Os primeiros estudos concluem que pela participação do Si na fortificação de estruturas da parede celular e no aumento da lignificação, a resistência é passiva. Esse elemento pode, também, potencializar mecanismos específicos de defesa como a produção de fitoalexinas (Menzies et al., 1991b; Fawe et al., 1998; Rodrigues et al., 2004) e o aumento na atividade de enzimas relacionadas à patogênese (Chérif et al., 1994; Rodrigues et al., 2005).

A sílica amorfa, depositada principalmente na parede celular abaixo da cutícula, formando uma camada dupla cutícula-sílica que aumenta a rigidez da célula dificulta a penetração do fungo (Yoshida, 1965). Além disso, o Si pode elevar os conteúdos de hemicelulose e lignina da parede celular e estas, juntas, tornam a parede menos acessível às enzimas de degradação produzidas pelo fungo e à difusão de toxinas (Bowen et al., 1992). A resistência do arroz à brusone pode estar relacionada à densidade de células silicificadas na epiderme, como comprovado na revisão realizada por Ishiguro, (2001).

Existe, atualmente, um consenso de que além da resistência mecânica podem existir alterações ocorridas nos sinais entre o patógeno e o hospedeiro, resultando na ativação mais rápida e prolongada de mecanismos de defesa da planta (Samuels et al., 1994; Chérif et al., 1992a; 1994; Rodrigues et al., 2003).

Em pepineiros fertilizados com Si, Menzies et al. (1991b) observaram a acumulação rápida de compostos fenólicos nas células da epiderme próximas aos sítios de penetração das hifas do fungo *Podosphaeria xanthii* (*Sphaerotheca fuliginea*), causador do míldio pulverulento, e a presença de Si solúvel incrementou esse mecanismo de resistência, em comparação a plantas que não receberam o elemento. Estes compostos fenólicos quando acumulados rapidamente e em altas concentrações no local da infecção são tóxicos ao organismo invasor (Marschner, 1995).

Compostos fenólicos exerceram efeito tóxico que impediram o ingresso de *Pythium ultimum* no sistema vascular das raízes do pepineiro. Estes compostos foram acumulados em maior quantidade e velocidade em plantas que receberam Si (Chérif et al., 1992). Trabalhando com o mesmo patossistema, pepineiro-*P. ultimum*, Chérif et al. (1994) afirmaram que o Si é mediador de mecanismos ativos de defesa, uma vez que plantas recebendo Si e inoculadas com o fungo tiveram a atividade de enzimas (quitinases, peroxidases e polifenoloxidasas) relacionadas à patogênese e a quantidade de compostos fenólicos aumentadas, em contraste ao observado em plantas que não receberam Si e foram inoculadas com o patógeno. Em trigo recebendo Si e colonizado por *Blumeria graminis* f.sp. *tritici*, Bélanger et al. (2003) constataram uma ampla deposição de fenóis glicolizados na parede de células da epiderme, inclusive envolvendo a membrana extra-haustorial do fungo.

Quando o Si é removido do meio, a resistência potencializada pelo Si é rapidamente perdida (Fawe et al., 1998). Como sabido, não há remobilização do Si na planta. Talvez por este motivo, a resistência não persiste. Samuels et al. (1994), afirmaram que o Si deve estar livre no citoplasma durante a penetração e/ou no início do processo de infecção por *Podosphaeria xanthii* (*Sphaerotheca fuliginea*) para que a resistência do pepineiro se manifeste de forma eficiente. Foi verificado por Koga et al. (1998) que compostos fenólicos formam, com o Si, complexos insolúveis que se movem apoplasticamente na epiderme, devido ao transporte passivo no fluxo da transpiração.

Em plantas de arroz fertilizadas com silicato de cálcio, observou-se material amorfo ao redor das hifas de *M. grisea* e também nas células próximas, através da microscopia eletrônica de transmissão. Isto indica a presença de compostos fenólicos que tem suas produções potencializadas pela presença do Si (Rodrigues et al., 2003). Esses autores observaram também que em plantas que receberam Si, as hifas do fungo presentes nas células da epiderme, do mesofilo e do sistema vascular ficaram vazias e foram circundadas por uma camada densa, possivelmente formada de compostos fenólicos, ao contrário das plantas que não receberam Si. Em um outro estudo, Rodrigues et al. (2004) constataram, através da análise de extratos foliares de plantas supridas com Si e na ausência desse elemento, e plantas inoculadas e não inoculadas com o fungo *M. grisea*, que a produção de fitoalexinas (momilactona A e momilactona B) foi cerca de 2,5 vezes maior em extrato de plantas recebendo Si e inoculadas com *M. grisea*. Estes autores afirmam que a hipótese da barreira mecânica está de certa forma operando simultaneamente à resistência ativa potencializada pelo Si.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos quatro experimentos em solução nutritiva, em casa de vegetação, do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, MG. Os experimentos envolveram o estudo de doses de Si e de Mn no crescimento, nutrição e anatomia foliar de plantas de arroz, bem como na resistência das plantas à mancha-parda.

3.1. Experimento 1. Produção de matéria seca, ângulo de inserção foliar, teores e acúmulo de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn e Si nas raízes, bainhas e folhas de arroz.

Os tratamentos foram dispostos em um esquema fatorial (2×3), sendo duas doses de Si e três doses de Mn, em delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. As doses de Si estudadas foram 0 e 2 mmol L⁻¹ e as de Mn 0,5; 2,5 e 10 µmol L⁻¹, todas aplicadas via solução nutritiva.

Cada unidade experimental foi composta por um vaso plástico de 4 L, com duas plantas de arroz em cada vaso. A cultivar de arroz utilizada foi a Metica-1, por ser suscetível à mancha-parda.

As sementes foram germinadas em rolo de papel germitest umedecido com água destilada num volume equivalente a 2,5 vezes o peso seco do mesmo. Os rolos foram mantidos durante seis dias em germinador regulado para uma temperatura de 25°C. Em seguida, as plântulas foram acondicionadas em vasos contendo a solução nutritiva base, diluída a ½ força, sem Mn e sem Si, permanecendo nestas condições por três dias. Essa solução originou-se de uma

composta de 1,25 mmol L⁻¹ de K (KNO₃); 0,25 mmol L⁻¹ de P (NH₄H₂PO₄); 3,75 mmol L⁻¹ de N [KNO₃, NH₄Cl, Ca(NO₃)₂.4H₂O e NH₄H₂PO₄]; 1,0 mmol L⁻¹ de Ca [Ca(NO₃)₂.]; 0,5 mmol L⁻¹ de Mg (MgSO₄); 0,5 mmol L⁻¹ de S (MgSO₄); 20 μmol L⁻¹ de Fe (Fe-EDTA); 0,3 μmol L⁻¹ de Cu (CuSO₄.5H₂O); 0,33 μmol L⁻¹ de Zn (ZnSO₄.7H₂O); 11,5 μmol L⁻¹ de B (H₃BO₃) e 0,1 μmol L⁻¹ de Mo (Na₂MoO₄.2H₂O). A fonte de Mn foi o MnCl₂.4H₂O. O Si foi fornecido na forma de ácido monossilícico, obtido pela passagem de uma solução de silicato de potássio através de uma coluna de resina de troca de cátions, (Ma et al., 2001a).

Após este período, as plântulas selecionadas foram transferidas para os vasos com solução nutritiva base, onde foram adicionados os respectivos tratamentos avaliados neste experimento. A solução nutritiva, sem aeração, foi trocada a cada quatro dias e o nível da solução no vaso foi mantido pela adição de água deionizada. O pH foi monitorado diariamente e mantido próximo a 5,5 com adição de soluções de NaOH ou HCl (1 mol L⁻¹). Para sustentar as plantas, foram utilizadas tampas confeccionadas com placas de isopor revestidas com papel alumínio.

Após 39 dias em solução nutritiva com os tratamentos, foram realizadas as avaliações. Foi medido o ângulo de inserção das folhas números 6, 7 e 8 (Yoshida, 1981) de cada planta, com o auxílio de um compasso e um transferidor, calculando-se, posteriormente, a média destes valores. Nestas mesmas folhas, na mesma ocasião, foi medida a distância entre o ponto médio da linha que une a ponta da folha e a inserção da lâmina foliar e na bainha e face adaxial da lâmina foliar, obtendo-se o valor médio, que foi denominado arco foliar, como ilustrado na Figura 1. A seguir, as plantas foram divididas em lâmina foliar, bainha e raiz. Cada parte foi lavada com água destilada e seca em estufa de circulação forçada de ar a 65°C, por 72 horas, e, então, pesada. Em seguida, cada parte vegetal foi moída em moinho tipo Wiley, com peneira de 0,84 mm. A matéria seca da parte aérea foi obtida pela soma das massas da lâmina foliar e da bainha.

A matéria seca da lâmina foliar, bainhas e raízes foi mineralizada pela mistura nítrico-perclórica (3:1 v/v), determinando-se os teores de macro e

micronutrientes. Os teores de Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn por espectrofotometria de absorção atômica; os de K por fotometria de emissão de chama e os de P por colorimetria. Os teores de N foram determinados pelo método semimicro Keljdhall.

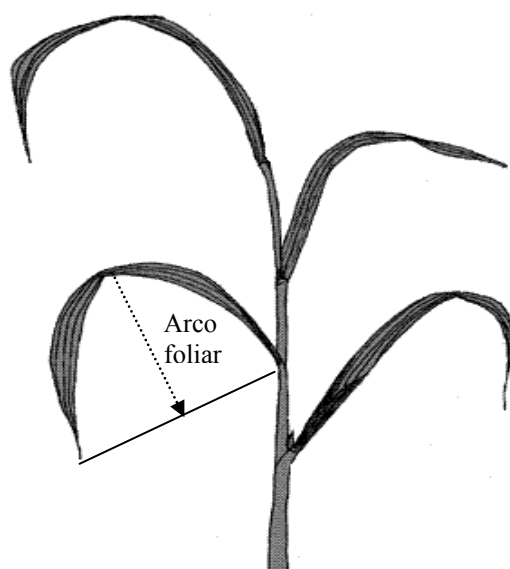


Figura 1. Esquema ilustrativo da como foram obtidas as medidas do arco foliar das plantas.

Os teores de Si foram determinados segundo o método do amarelo, adaptado por Korndörfer et al., (2004b). Uma alíquota de 100 mg do material vegetal moído foi pesada e acondicionada em tubos de polipropileno de 100 mL com adição de 2 mL de H_2O_2 (500 cL L^{-1}), seguida de agitação por alguns segundos. Foram adicionados 3 mL de NaOH (500 g L^{-1}), com posterior agitação, e logo depois os tubos foram mantidos em banho-maria por aproximadamente 1 hora em capela. Uma vez estabilizada a liberação de gases, os tubos foram cobertos com papel alumínio e colocados em autoclave por 1 hora ($1,5 \text{ atm}$ e 123°C). Após autoclavagem, foram adicionados à cada tubo 45 mL de água destilada e o extrato transferido para frasco plástico com repouso de 24 horas para deposição dos resíduos. Após o período de repouso, 1 mL do sobrenadante foi transferido para copo plástico de 50 mL e, em seguida,

adicionados 19 mL de água destilada. Posteriormente, 1 mL de HCl (500 g L^{-1}) e 2 mL de molibdato de amônio (100 g L^{-1} , pH 7,0) foram adicionados à cada copo plástico. Decorridos 5 a 10 minutos da adição do molibdato, foram adicionados 2 mL de ácido oxálico (75 g L^{-1}). Após 2 minutos, foi realizada a leitura em espectrofotômetro (UV-visível), no comprimento de onda de 410 nm. Os valores de acúmulo dos elementos nos componentes das plantas foram obtidos com base nos respectivos teores e na matéria seca dos componentes avaliados. Todas as análises de Si foram realizadas no Laboratório de Análise de Fertilizantes da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

3.2. Experimento 2. Espessura da epiderme folha de arroz

Os tratamentos foram dispostos em um esquema fatorial (2×3), sendo duas doses de Si e três de Mn, em delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. As doses de Si estudadas foram 0 e 2 mmol L^{-1} e as de Mn 0,5; 2,5 e $10 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$, aplicadas via solução nutritiva.

Cada unidade experimental foi composta por um vaso plástico de 4 L, com 2 plantas de arroz em cada vaso, apoiadas em placa de isopor. A cultivar de arroz utilizada foi a Metica-1. O experimento foi conduzido da mesma forma que o experimento 1 (item 3.1.).

Após 39 dias em solução nutritiva com os tratamentos, a folha nº 5, segundo Yoshida (1981), das duas plantas de cada vaso, foram cortadas e encaminhadas para o estudo anatômico. O material foi fixado em FAA₅₀ e estocado em etanol 70. Amostras, de aproximadamente 20 mm^2 , foram retiradas da região mediana da folha, compreendendo a nervura central. As amostras foram desidratadas em série etílica e infiltradas e incluídas em metacrilato (Historesina, Leica Instruments, Heidelberg, Alemanha). O material emblocado foi seccionado em micrótomo de avanço automático com navalhas de aço, em cortes transversais de $5 \text{ } \mu\text{m}$ de espessura, corados com azul de toluidina pH 4,0 (O'Brien & McCully, 1981). As lâminas foram montadas em Permount (SP15-500, Fisher Scientific, New Jersey, EUA). A digitalização das imagens foi realizada em fotomicroscópio (Olympus AX70TRF, Olympus Optical, Tokyo,

Japão) com sistema U-photo, no Laboratório de Anatomia Vegetal da Universidade Federal de Viçosa (MG). Os dados da espessura das faces adaxial e abaxial da epiderme (45 medidas por tratamento), foram obtidos com o auxílio do software Image Pro-Plus 4.5 (Media Cybernetics, Inc., EUA).

3.3. Experimento 3. Resistência do arroz à mancha-parda

Os tratamentos foram dispostos em um esquema fatorial (2×3), correspondendo a duas doses de Si e três de Mn, em delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. As doses de Si estudadas foram 0 e 2 mmol L⁻¹ e as de Mn 0,5; 2,5 e 10 μmol L⁻¹, aplicadas via solução nutritiva.

Cada unidade experimental foi composta por um vaso plástico de 4 L, com 4 plantas de arroz em cada vaso. A cultivar de arroz utilizada foi a Metica-1. O experimento foi conduzido da mesma forma que o experimento 1 (item 3.1.).

Após 39 dias em solução nutritiva com os tratamentos, as quatro plantas foram inoculadas com o fungo *B. oryzae*. O isolado do fungo foi gentilmente cedido pelo Dr. Anne Sitarama Prabhu do Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão-EMBRAPA, Goiânia, GO. O isolado foi preservado em papel de filtro estéril à -80°C. Pedacos do papel de filtro foram transferidos para placas de Petri contendo meio de cultura batata-dextrose-ágar (BDA). Após o crescimento do fungo, pedacos de BDA contendo micélio do mesmo foram transferidos para placas de Petri, as quais foram transferidas para câmara de crescimento tipo BOD com luz fluorescente, com 12 horas de fotoperíodo contínuo e temperatura de 25°C, onde permaneceram por aproximadamente 10 dias até a abundante produção de conídios.

A suspensão de inóculo foi preparada adicionando-se 10 mL de água destilada estéril em cada placa, fazendo-se uma raspagem superficial com espátula para liberação dos conídios. A suspensão foi filtrada em gaze para eliminação de fragmentos de micélio e meio de cultura. Após a filtragem, a suspensão de conídios foi ajustada para a concentração de 10⁴ conídios mL⁻¹, utilizando-se hemacitômetro.

Foram marcadas três folhas em cada planta para as avaliações do progresso da doença. A inoculação das plantas foi realizada pulverizando-as com a suspensão de conídios, com o auxílio de um atomizador (D. Vilbiss nº. 15). Imediatamente após a inoculação, as plantas foram transferidas para câmara de nevoeiro. Nessa câmara, a temperatura e a umidade relativa foram fixadas em $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $95\pm 2\%$, respectivamente, com nebulizadores funcionando por 40 segundos, a cada 30 minutos, durante 12 horas e fotoperíodo de 12 horas. As plantas permaneceram nessa câmara até o término das avaliações dos componentes de resistência.

Foram avaliados os seguintes componentes de resistência: período de incubação (horas), número de lesões por cm^2 de área foliar, severidade e a severidade real, com o auxílio do programa QUANT.

O período de incubação foi determinado observando-se o aparecimento das primeiras lesões nas folhas marcadas. As observações foram realizadas a cada seis horas, desde a inoculação até o momento em que todas as folhas marcadas de todas as repetições apresentaram lesões.

A severidade da mancha-parda foi avaliada a cada 24 h após a inoculação, atribuindo-se a cada folha marcada um valor de severidade, de acordo com escala proposta pelo IRRI (1996) (Quadro 1). As avaliações terminaram quando as folhas marcadas de um tratamento apresentaram as maiores notas da escala, o que ocorreu às 144 h após a inoculação, com os tratamentos que não receberam Si. Assim, foram realizadas seis avaliações, às 24, 48, 72, 96, 120 e 144 h. Os dados da severidade foram utilizados para calcular a área abaixo da curva de progresso da mancha-parda (AACPMP), de acordo com a equação proposta por Shaner & Finney (1977).

$$\text{AACPMP} = \sum[(Y_i + Y_{i+1}/2)(t_{i+1} - t_i)],$$

onde Y_i = severidade da mancha-parda na i -ésima observação, T_i = tempo (em horas) no momento da i -ésima observação e n = número total de observações.

Quadro 1. Escala para avaliação da severidade da mancha-parda em folhas de arroz (IRRI, 1996).

Nota	Área foliar afetada (%)
0	0
1	< 1
2	1-3
3	4-5
4	6-10
5	11-15
6	16-25
7	26-50
8	51-75
9	76-100

A severidade final foi avaliada às 144 h após a inoculação, observando-se o aspecto geral de cada planta e atribuindo-se um valor de severidade (IRRI, 1996).

Após a avaliação da severidade final, as folhas marcadas foram coletadas e escaneadas para determinar a severidade real utilizando-se o programa Quant (Vale et al., 2004).

Amostras de folhas foram coletadas, lavadas e secas em estufa com circulação forçada de ar por um período de 72 horas à 65°C. Após a retirada da estufa o material foi moído em moinho tipo Wiley, com peneira de 0,84 mm.

A matéria seca das folhas foi mineralizada em solução nítrico-perclórica (3:1, v v⁻¹) e os teores de Mn determinados por espectrofotometria de absorção atômica. Os teores de Si foram determinados pelo método do amarelo, adaptado por Korndörfer et al. (2004a), no Laboratório de Análise de Fertilizantes da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

3.4. Experimento 4. Acúmulo de compostos fenólicos solúveis totais e lignina em folhas de arroz

Este experimento foi conduzido da mesma forma que os anteriores. Os tratamentos foram dispostos em um esquema fatorial (2×3×2), correspondendo a duas doses de silício, três de manganês e à inoculação ou não das plantas, em delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. As doses de Si

estudadas foram 0 e 2 mmol L⁻¹ e as de Mn 0,5; 3,5 e 10 µmol L⁻¹, aplicadas via solução nutritiva. As plantas foram inoculadas da mesma maneira como descrito no item 3.3.. As plantas não inoculadas também foram levadas para a câmara de nevoeiro, onde permaneceram até o final do experimento.

Cada unidade experimental foi composta por um vaso plástico de 4 L, com 2 plantas de arroz em cada vaso. A cultivar de arroz utilizada foi a Metica-1.

Foram determinados o acúmulo de compostos fenólicos solúveis totais e de lignina nas folhas.

As folhas do perfilho central foram coletadas 120 horas após a inoculação, de cada tratamento e repetição. Em seguida, tais folhas foram pesadas, congeladas em nitrogênio líquido e armazenadas a -80°C, até sua análise. Foram pesadas 0,1 g de cada uma das amostras, transferindo-se para tubos tipo Eppendorf. Foram adicionados 1,5 mL de metanol (80 cL L⁻¹). Os tubos foram cobertos com papel alumínio e agitados por 12 horas à temperatura ambiente. Posteriormente os tubos foram centrifugados a 12.000 g durante 5 min. O sobrenadante foi transferido para um novo tubo Eppendorf e armazenado a -20°C para determinação dos compostos fenólicos solúveis totais. O precipitado foi mantido a -20°C para determinação do teor de lignina.

A quantificação dos compostos fenólicos solúveis totais, nos extratos metanólicos, foi realizada de acordo com o método descrito por Zieslin & Ben-Zaken (1993), com algumas modificações. Em tubos de ensaio contendo 900 µL de água destilada foram adicionados 5 mL de Folin-Ciocalteu 0,2 mol L⁻¹, 4 mL de Na₂CO₃ (75 g L⁻¹) e 100 µl do extrato foliar. A solução foi homogeneizada e incubada por 1 h a 23°C e a absorvância registrada a 760 nm. Uma curva padrão de catecol foi gerada para quantificar os teores de compostos fenólicos solúveis totais e com os dados da massa da matéria fresca das folhas, calculou-se o acúmulo desses compostos nas folhas.

Para análise da lignina, aos precipitados obtidos anteriormente, foram adicionados 1,5 mL de água destilada e após homogeneização, centrifugou-se a 12.000 g durante 5 min. Os sobrenadantes foram descartados e os precipitados submetidos à secagem por um período de 12 h a 65°C. Após esta etapa,

procedeu-se a quantificação do teor total de lignina como descrito por Barber & Ride (1988). Adicionou-se ao precipitado seco 1,5 mL de uma solução 100 cL L⁻¹ de ácido tioglicólico e de uma solução de HCl 2 mol L⁻¹. Os tubos Eppendorf foram mantidos sob lenta agitação, por 4 h, em banho maria a aproximadamente 80°C. Esta etapa permitiu a reidratação do precipitado. Posteriormente, os tubos foram resfriados em gelo e mantidos a 4°C por 10 min. Em seguida, foi realizada uma centrifugação a 12.000 g por 10 min, com descarte do sobrenadante. O precipitado foi ressuspenso em 1,5 mL de água destilada e centrifugado novamente a 10.000 g por 10 min, descartando-se o sobrenadante. O precipitado foi ressuspenso em 1,5 mL de NaOH 0,5 mol L⁻¹ e mantido sob agitação por 12 h à temperatura ambiente. Outra centrifugação a 10.000 g durante 10 min, e o sobrenadante foi transferido para um novo Eppendorf. Ao sobrenadante foram adicionados 200 µL de HCl concentrado e o tubo foi transferido para geladeira (4°C) por 4 h. Outra centrifugação foi realizada a 10.000 g por 10 min, sendo o sobrenadante descartado e o precipitado dissolvido em 2,0 mL de NaOH 0,5 mol L⁻¹. Posteriormente, foi medida a absorbância a 280 nm, utilizando a lignina alcalina 2-hidroxi-propil-éter (Sigma) como padrão. Com estes teores de lignina e a massa da matéria fresca das folhas foi obtido o acúmulo de lignina.

3.5. Análise Estatística

Os resultados obtidos em todos os experimentos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e a interação SixMn sempre foi desdobrada, de modo a se avaliar os efeitos polinomiais (linear e quadrático) para as doses de Mn, tanto na presença quanto na ausência de adição de Si na solução, pelo procedimento REGRESEQ do software SAEG 5.0, testados até o nível de 5% de probabilidade pelo teste F. Posteriormente, foram ajustadas equações de regressão para as variáveis avaliadas em função de doses de Mn, na ausência e na presença de adição de Si na solução.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Experimento 1. Produção de matéria seca, ângulo de inserção foliar, teores e acúmulo de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn e Si nas raízes, bainhas e folhas de arroz.

A produção de massa de matéria seca de todas as partes da planta foi influenciada significativamente pela adição de Si na solução nutritiva e pelas doses de Mn. A adição de Si na solução nutritiva proporcionou maior produção de matéria seca de raízes, bainhas e folhas, e conseqüentemente, da parte aérea, o que resultou em menor razão raiz/parte aérea (Quadro 2).

Quadro 2. Massa da matéria seca de raízes (MSR); bainhas (MSB), folhas (MSF), parte aérea (MSPA), razão raiz/parte aérea (R/PA), ângulo de inserção da folha (ANG) e distância entre o ponto médio da linha que une a ponta da folha com a inserção da lâmina foliar na bainha e a face adaxial da lâmina foliar (ARC), de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva, na presença ou na ausência de Si.

Variáveis	Silício (mmol L ⁻¹)	
	0	2
Massa seca de raízes, g vaso ⁻¹	0,726 b*	0,827 a
Massa seca de bainhas, g vaso ⁻¹	0,667 b	1,056 a
Massa seca de folhas, g vaso ⁻¹	0,783 b	1,341 a
Massa seca da parte aérea, g vaso ⁻¹	1,450 b	2,397 a
Raiz:parte aérea, g g ⁻¹	0,536 b	0,348 a
Ângulo de inserção foliar, °	28,600 b	9,533 a
Arco foliar, cm	4,760 b	1,307 a

*Médias seguidas de letras distintas, nas linhas, diferem significativamente entre si pelo Teste-F (P<0,05)

Na ausência de Si, resultados similares na produção de massa de matéria seca foram observados com o aumento das doses de Mn, embora com valores máximos inferiores aos alcançados na presença de Si. O modelo ajustado para a resposta das variáveis de produção de matéria seca em função das doses de Mn foi o hiperbólico (Figura 2). Já na presença do Si, não houve efeito significativo das doses de Mn sobre as variáveis de produção de matéria seca avaliadas (Figura 2).

Quanto ao efeito do Si na produção de biomassa de arroz, Lee et al. (1985) obtiveram respostas positivas, entretanto, na maioria dos trabalhos, como os de Liang et al. (1994), Carvalho (2000), Silva & Bohnen (2001) e Mauad et al. (2003), a aplicação de Si não proporcionou alterações significativas na produção de matéria seca de partes vegetativas do arroz, diferentemente das respostas positivas observadas no presente trabalho. A ausência de resposta ao Si em trabalhos realizados em solução nutritiva talvez se deva às doses baixas utilizadas, ou ao ajuste das doses do ácido monossilícico em solução, pois pode haver a polimerização e produção de partículas coloidais de sílica hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (Birchall, 1995). Também pode contribuir a utilização de fontes de Si com baixa solubilidade. Quando o experimento é conduzido no solo, a ausência de resposta é verificada quando o teor inicial de Si disponível está acima do nível crítico, como verificado para o arroz (Carvalho, 2000; Mauad et al., 2003).

No caso do Mn, na menor dose avaliada ($0,5 \mu\text{mol L}^{-1}$), não foram detectados sintomas visuais de deficiência deste elemento. Porém, houve resposta na produção de matéria seca dos componentes na planta com o aumento da dose deste elemento na solução nutritiva. O Mn é um elemento essencial e participa de diversas reações bioquímicas na planta, dentre elas destaca-se a sua atuação no processo de fotossíntese, atuando na fotólise da água, evolução do oxigênio no sistema fotossintético e na síntese da clorofila (Romheld & Marschner, 1991). Segundo estes autores, a fotossíntese é primariamente afetada pela deficiência de Mn. Vários autores têm encontrado redução da atividade fotoquímica como consequência da deficiência de Mn (Anderson & Pyliotis, 1969; Terry & Ulrich, 1974). De acordo com Thompson & Huber (2007), a deficiência de Mn afeta

negativamente a produtividade, em razão de influenciar a fotossíntese. Isso justifica a maior produção de massa de matéria seca observada nas partes avaliadas da planta e a conseqüente redução na razão raiz:parte aérea (Figura 2). Em virtude da ausência de resposta ao Mn nas plantas que receberam a aplicação de Si e considerando que os valores médios de MSR, MSB, MSF, MSF foram superiores nessas plantas, especula-se que a fotossíntese, mesmo com doses baixas de Mn, tenha sido eficiente.

A arquitetura da planta é influenciada pelo ângulo de inserção foliar e pelo aqui denominado arco da folha. O Si tornou as folhas mais eretas e com menor arco foliar (Quadro 2). A diferença média no ângulo foi de aproximadamente 19 graus e no arco foliar de 3,45 cm entre plantas supridas com Si e plantas que não o receberam. Este menor arco representa uma menor envergadura da folha. As doses de Mn influenciaram apenas o ângulo de inserção foliar, o aumento de Mn causou redução desse ângulo, encontrando-se ajuste hiperbólico para o modelo, o que ocorreu apenas na ausência de Si. O arco foliar não foi influenciado pelas doses de Mn.

O ângulo de inserção foliar talvez seja uma das mais importantes características da planta relacionadas com a capacidade de produção (Keulen, 1976). Segundo este autor, a taxa fotossintética das plantas com folhas mais decumbentes (maior ângulo) é menor e indiferente ao aumento do índice de área foliar (IAF), ao contrário das folhas mais eretas (com menor ângulo). Segundo Moreira (2001), o ângulo de inserção foliar está diretamente envolvido nos processos de interceptação e de absorção da radiação fotossinteticamente ativa. O IAF é a área da planta ocupada por folhas, em relação à área de solo ocupada pela planta (Brougham, 1956). Verifica-se que folhas mais decumbentes se autosombreiam e atingem um IAF máximo antes das plantas com folhas mais eretas. Com folhas mais eretas, as plantas exploram melhor o espaço disponível, no que se refere à interceptação da radiação fotossinteticamente ativa. Além disso, as folhas de arroz apresentam estômatos em ambas as faces da lâmina foliar (Yoshida, 1981). No presente trabalho estes fatores combinados contribuíram para a produção de massa seca, o que foi devido, possivelmente, à

maior quantidade de fotoassimilados que se converteram em matéria seca acumulada. Esses resultados confirmam os de Agarie et al. (1998), que ressaltam que o arroz fertilizado com Si é mais eficiente na utilização da água, por ter reduzida a sua transpiração.

Dobermann & Fairhurst (2000) afirmam que um dos sintomas visuais de deficiência de Si é a menor rigidez das folhas e bainhas que inclinam-se ou acamam-se, podendo ocorrer o sombreamento mútuo, com conseqüente redução na atividade fotossintética e redução na produção. Afirmam também que nenhuma outra desordem nutricional causa este tipo de sintoma, apenas a deficiência de Si. No presente estudo, esse sintoma de deficiência ficou evidente em plantas que não foram supridas com Si na solução nutritiva.

O aumento das doses de Mn, na ausência de Si, também proporcionou, mesmo que discreta, redução no ângulo de inserção foliar, com resposta linear (Figura 2). Este resultado pode ser explicado pelo aumento da produção de lignina, dando maior rigidez à parede celular e, por conseguinte, às folhas.

A razão raiz/parte aérea mostra a alocação de matéria seca para estas duas partes da planta e pode indicar o comportamento do crescimento da planta em resposta aos tratamentos. Segundo Gunatilleke et al. (1997), sob regimes nutricionais não limitantes, normalmente as espécies apresentam menor razão raiz/parte aérea devido ao crescimento da parte aérea. Para Chapin (1980), geralmente uma restrição de nutrientes em condições não limitantes de luz leva ao aumento de alocação de massa seca para a raiz em relação à parte aérea. Os resultados do presente trabalho (Quadro 2) são concordantes com estas observações.

A melhor alocação de matéria seca na parte aérea foi estimulada, possivelmente, por uma maior atividade fotossintética em condições nutricionais não limitantes. Em deficiência de Si e níveis baixos de Mn, as plantas exibiram maior alocação de matéria seca e maior crescimento de raízes em detrimento da parte aérea, em comparação com plantas fertilizadas com Si e doses adequadas de Mn (Quadro 2, Figura 2). Assis et al. (2000), trabalhando com dois solos orgânicos e a técnica do elemento faltante, verificaram que plantas recebendo

adubação completa + Si apresentaram menor razão raiz/parte aérea do que plantas crescendo com adubação completa - Si, nos dois solos. Esta é mais uma indicação de que plantas com sintomas de deficiência de Si apresentam maior razão raiz/parte aérea.

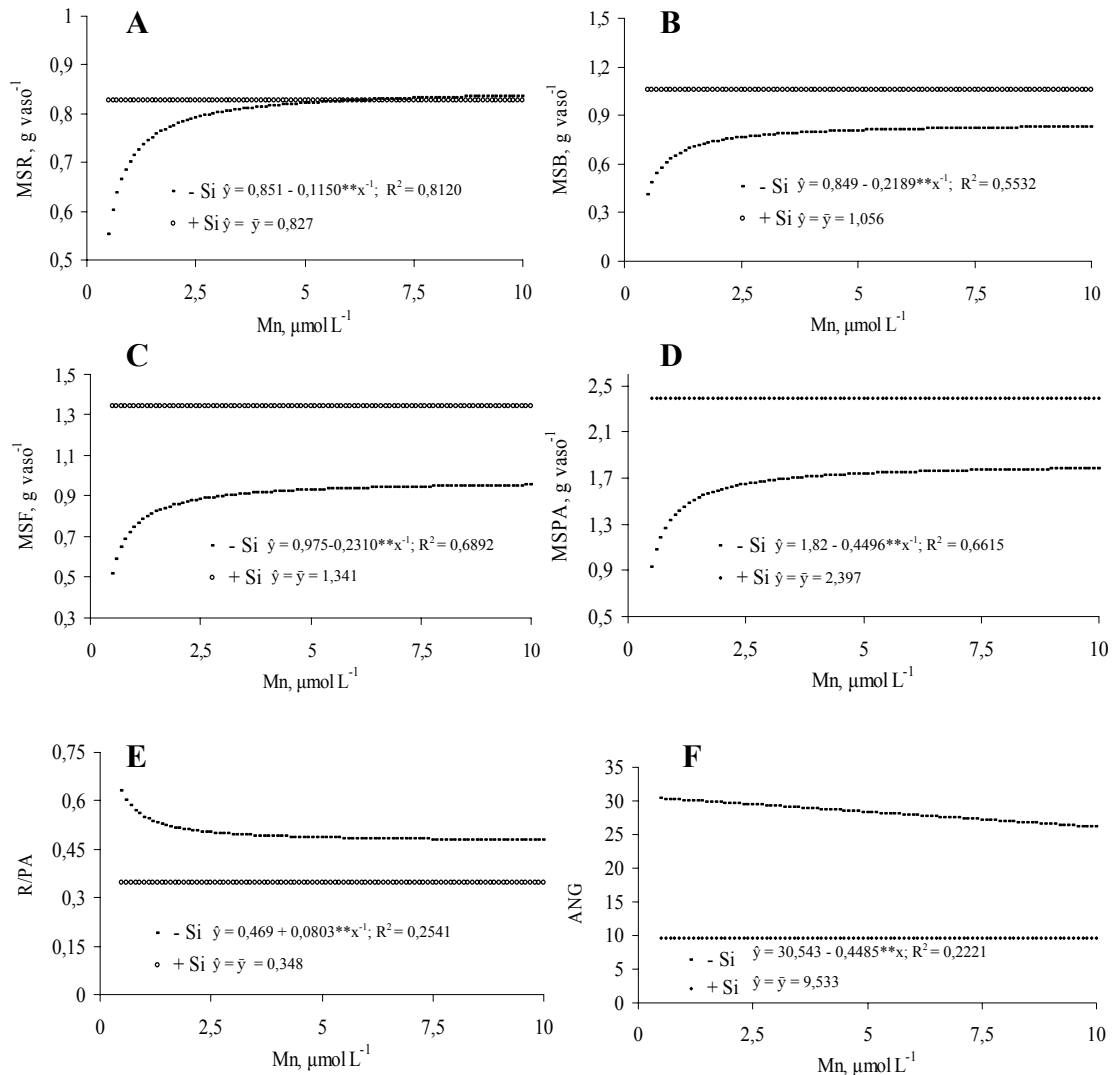


Figura 2. Matéria seca de raízes (A), bainhas (B), folhas (C), parte aérea (D), razão raiz:parte aérea (E) e ângulo de inserção da lâmina foliar na bainha (F) de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com diferentes doses de Mn, na presença ou na ausência de adição de Si.

Os teores radiculares de todos os nutrientes avaliados foram superiores nas plantas que receberam Si na solução nutritiva (Quadro 3). Nas raízes, apenas entre os teores de Zn não foi verificada diferença significativa com a adição de Si na solução nutritiva. Nas bainhas das plantas que não receberam Si, os teores de P, Ca, Mg e Mn foram maiores, não sendo observada diferença significativa entre os teores de N, K, Cu, Fe e Zn (Quadro 3). Nas folhas de plantas que não receberam Si, maiores teores de N, P, Ca, Mg, Fe e Mn também foram verificados. Teores foliares de K, Cu e Zn não diferiram estatisticamente com a aplicação de Si (Quadro 3). Maiores teores de Si foram constatados nas três partes avaliadas nas plantas que receberam Si.

Nas plantas não supridas com Si houve “efeito diluição” (um maior crescimento vegetativo não acompanhado da absorção do nutriente) para os macronutrientes, exceto Ca. Nessas plantas os teores foliares e o acúmulo de Ca foram superiores (Quadro 3), o que sugere assim uma possível interação negativa entre Si e Ca. Contudo, nas plantas supridas com Si essa possível interação não resultou em efeitos negativos no crescimento ou na absorção de outros nutrientes, podendo-se supor que o Si tenha substituído o Ca em alguma de suas funções, principalmente quanto à estruturação da parede celular.

Ma & Takahashi (1993), observaram que o Si é capaz de reduzir a absorção de Ca e conseqüentemente, seu acúmulo na parte aérea. Segundo Inanaga et al. (1995), o Si na planta compete com o Ca por sítios de ligação, uma vez que forma compostos com a lignina, ácidos orgânicos, álcoois polihídricos e compostos fenóis-carboidratos. Nos dois trabalhos, os autores verificaram redução nos teores e na absorção de Ca por plantas cultivadas na presença de Si. Como o Ca participa na síntese e organização da parede celular e alguns destes compostos atuam nestas atividades, principalmente a lignina, uma parte do Si pode estar sendo utilizada para tal, em detrimento do Ca.

Quadro 3. Teores de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn e Si, nas raízes, bainhas e folhas de arroz cultivado na presença ou na ausência de Si na solução nutritiva.

Teores	Silício (mmol L ⁻¹)	
	0	2
Raízes		
N	29,51 b ¹	31,21 a
P	4,45 b	4,69 a
K	g kg ⁻¹ 38,97 b	41,80 a
Ca	1,29 b	1,52 a
Mg	2,56 b	2,87 a
Cu	145,65 b	182,13 a
Fe	mg kg ⁻¹ 735,20 b	1065,40 a
Mn	279,53 b	459,00 a
Zn	23,87 a	25,00 a
Si	g kg ⁻¹ 3,33 b	10,72 a
Bainhas		
N	31,67 a	30,21a
P	7,23 a	5,53 b
K	g kg ⁻¹ 44,23 a	42,17 a
Ca	2,05 a	1,61 b
Mg	3,64 a	2,26 b
Cu	20,83 a	17,73 a
Fe	mg kg ⁻¹ 229,00 a	215,00 a
Mn	910,20 a	576,13 b
Zn	24,60 a	24,47 a
Si	g kg ⁻¹ 9,5 b	44,55 a
Folhas		
N	50,57 a	46,96 b
P	5,39 a	3,86 b
K	g kg ⁻¹ 32,43 a	31,43 a
Ca	5,01 a	2,84 b
Mg	3,37 a	1,84 b
Cu	22,27 a	23,40 a
Fe	mg kg ⁻¹ 242,40 a	158,93 b
Mn	1177,13 a	571,07 b
Zn	21,93 a	21,73 a
Si	g kg ⁻¹ 10,7 b	71,5 a

¹Médias seguidas de letras distintas, nas linhas, diferem significativamente entre si pelo Teste-F (P<0,05)

Segundo Marschner (1995), a demanda por Ca e B, que também participa da síntese da parede celular, é inversamente proporcional à capacidade de absorção de Si em monocotiledôneas. A partir da relação molar Si:Ca encontrada em seus tecidos, as plantas podem ser classificadas como acumuladoras e não acumuladoras de Si. Se a razão Si/Ca for maior que 1,0, as plantas são consideradas acumuladoras; entre 1,0 e 0,5 intermediárias e abaixo de 0,5 não acumuladoras (Miyake & Takahashi, 1983). Esta classificação sugere um antagonismo entre Ca e Si, o que indica a necessidade de uma investigação mais profunda uma vez que uma das fontes de Si mais indicadas atualmente para a cultura do arroz é o silicato de cálcio (Korndörfer et al., 2004a).

Os teores de Mn foram maiores nas raízes e bainhas das plantas que receberam Si e nas folhas das plantas que não receberam Si. Estes resultados coincidem com vários relatos na literatura e reafirmam um dos maiores benefícios do Si que é a redução da toxidez por Mn (Horigushi, 1988; Iwasaki et al., 2002; Rogalla & Römheld, 2002). A maioria destes autores também verificou maiores teores de Mn nas raízes de plantas supridas com Si. Ao contrário da toxidez por Al, a toxidez por Mn causa a redução do crescimento da parte aérea, e não das raízes (Mortley, 1993). Assim, para aumentar a tolerância de uma planta à toxidez de Mn, o mecanismo envolvido deve evitar a absorção e translocação desse elemento para a parte aérea ou melhorar a sua distribuição na planta (El Jaoual & Cox, 1998). Isso foi o que ocorreu no presente trabalho, quando houve adição de Si na solução nutritiva.

Uma distribuição mais homogênea de Mn nos tecidos é evidenciada pelos teores semelhantes de Mn observados nas bainhas e folhas das plantas que receberam Si, diferente do que ocorreu nas que não receberam (Quadro 3). O maior teor de Mn nas raízes de plantas com Si pode ser explicado pela maior oxidação e deposição deste elemento na sua superfície radicular (Horigushi, 1988). Segundo este autor, essa maior oxidação ocorre porque o Si confere um poder oxidante às raízes, devido ao aumento no volume e rigidez dos aerênquimas. Iwasaki et al. (2002), concluíram que o aumento da tolerância do feijão caupi à toxidez por Mn ocorreu porque houve redução da concentração do

Mn⁺² livre no apoplasto, induzida pela incorporação do Si na parede celular. Sendo a lignina um dos componentes da parede celular onde o Si pode se ligar (Inanaga et al., 1995) e havendo nas raízes maior quantidade de lignina do que na parte aérea, pode-se pressupor a ocorrência de mais sítios de ligação do Mn na parede celular das raízes de plantas supridas com Si. Pode-se inferir também que o Si aumentou a capacidade de troca de cátions (CTC) das raízes uma vez que além de maior acúmulo de Mn foram observados maiores teores dos outros cátions avaliados, inclusive Ca, com o qual o Si parece interagir negativamente.

Os maiores teores de Si nas folhas em relação às bainhas e raízes, se devem à natureza desse elemento. O Si é transportado das raízes para a parte aérea através do xilema, com a perda de água por transpiração nas folhas ocorre a formação de sílica amorfa hidratada (SiO₂.nH₂O) (Ma & Takahashi, 2002), principalmente nas células epidérmicas das folhas (Blackman, 1969). Assim, como sugerem Jonas & Handreck (1967), o maior teor de Si está relacionado a uma maior taxa transpiratória, que ocorre nas bainhas e nas folhas. Vale ressaltar que os teores de Si nas folhas das plantas que receberam Si foram maiores que os de qualquer um dos macronutrientes (Quadro 3).

Os teores foliares dos macronutrientes em plantas com e sem Si ficaram em níveis considerados adequados por Malavolta et al. (1997), assim como o nível dos micronutrientes por Fageria et al. (1984), com exceção do Mn. O nível de Mn considerado tóxico situa-se acima de 1000 mg kg⁻¹ e o adequado entre 30 e 600 mg kg⁻¹ (Fageria et al., 1984). No Quadro 3 observa-se que o Si promoveu a redução dos teores de Mn de tóxicos para adequados em plantas crescendo na maior dose de Mn. Sem suprimento de Si os teores foliares de Mn (1177,13 mg kg⁻¹) ficaram na faixa considerada tóxica, com a adição de Si os teores de Mn ficaram em níveis adequados (571,07 mg kg⁻¹). Todavia, não foram observados sintomas visuais de toxidez por Mn e tampouco redução no crescimento do arroz. Tanaka & Yoshida (1970), afirmam que o teor foliar de Mn pode ser superior à 3000 mg kg⁻¹ sem causar sintomas de toxidez e sem reduzir a produção, uma vez que estes níveis dependem de outros fatores como genótipo, espécies e condições ambientais (El-Jaoual & Cox, 1998).

Os teores foliares médios de Si ($71,5 \text{ g kg}^{-1}$) encontrados em plantas supridas com este elemento, no presente trabalho, estão adequados para o bom desenvolvimento e produção do arroz segundo Dobermann & Fairhurst (2000), que afirmam que os teores de Si considerados adequados devem ser superiores a 50 g kg^{-1} de Si nas folhas. A absorção de Si foi maior do que a de qualquer um dos macronutrientes (Quadro 3). Plantas cultivadas na “ausência” de Si apresentaram teor médio de $10,7 \text{ g kg}^{-1}$ deste elemento, devendo-se tal concentração ao fato de que o Si está presente em quantidades significativas mesmo em sais de nutrientes, água e ar mesmo sendo estes altamente purificados (Werner & Roth, 1983). Foi realizada análise de Si na água utilizada na condução deste experimento, encontrando-se teor médio de $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ de ácido monossilícico. Entretanto, os baixos teores foliares de Si encontrados no presente estudo, em plantas cultivadas na ausência de Si, mostram que as mesmas não se beneficiaram dos efeitos do Si encontrado na água. A ausência de resposta do arroz ao Si em trabalhos de Silva & Bohnen (2001) e Mauad et al. (2003) pode ser evidenciada pelos baixos teores foliares deste elemento encontrados por estes autores, mesmo em plantas supridas com Si (os teores foliares de Si ficaram bem abaixo de 50 g kg^{-1} , nível considerado adequado). No trabalho de Silva & Boen (2001), por exemplo, o arroz cultivado com Si na solução nutritiva apresentou de 15 g kg^{-1} de Si no colmo+folhas, valor próximo ao encontrado nas plantas cultivadas sem suprimento de Si no presente trabalho. Porém, o nível crítico de Si na folha pode variar com o estresse ao qual a planta está submetida.

As doses de Mn, de acordo com a presença ou não de Si na solução nutritiva, propiciaram diversas respostas no que se refere aos teores de macro e micronutrientes e Si nas raízes, bainhas e folhas (Figuras 3-8). Em presença de Si, e com o aumento das doses de Mn na solução nutritiva, não foi verificada diferença entre os teores de N, P, Ca, Cu e Zn nas raízes; N, K, Ca e Cu nas bainhas e N, Cu e Si nas folhas. Na ausência de Si, o mesmo foi verificado para os teores de N, P, Zn e Fe nas raízes; P, K, Ca, Mg, Cu, Zn e Si nas bainhas e N, K e Mg nas folhas. Assim, o efeito verificado no acúmulo de alguns destes

nutrientes deve-se basicamente ao maior crescimento de todas as partes da planta avaliadas, uma vez que não foram detectadas diferenças em seus teores.

Aumento nos teores radiculares de K, Mg e Cu foi verificado com o aumento da dose de Mn até 2,5 $\mu\text{mol L}^{-1}$, com posterior decréscimo, para plantas cultivadas na ausência de Si, indicando possível competição entre estes íons e o Mn em maiores doses na solução (Figuras 3-4).

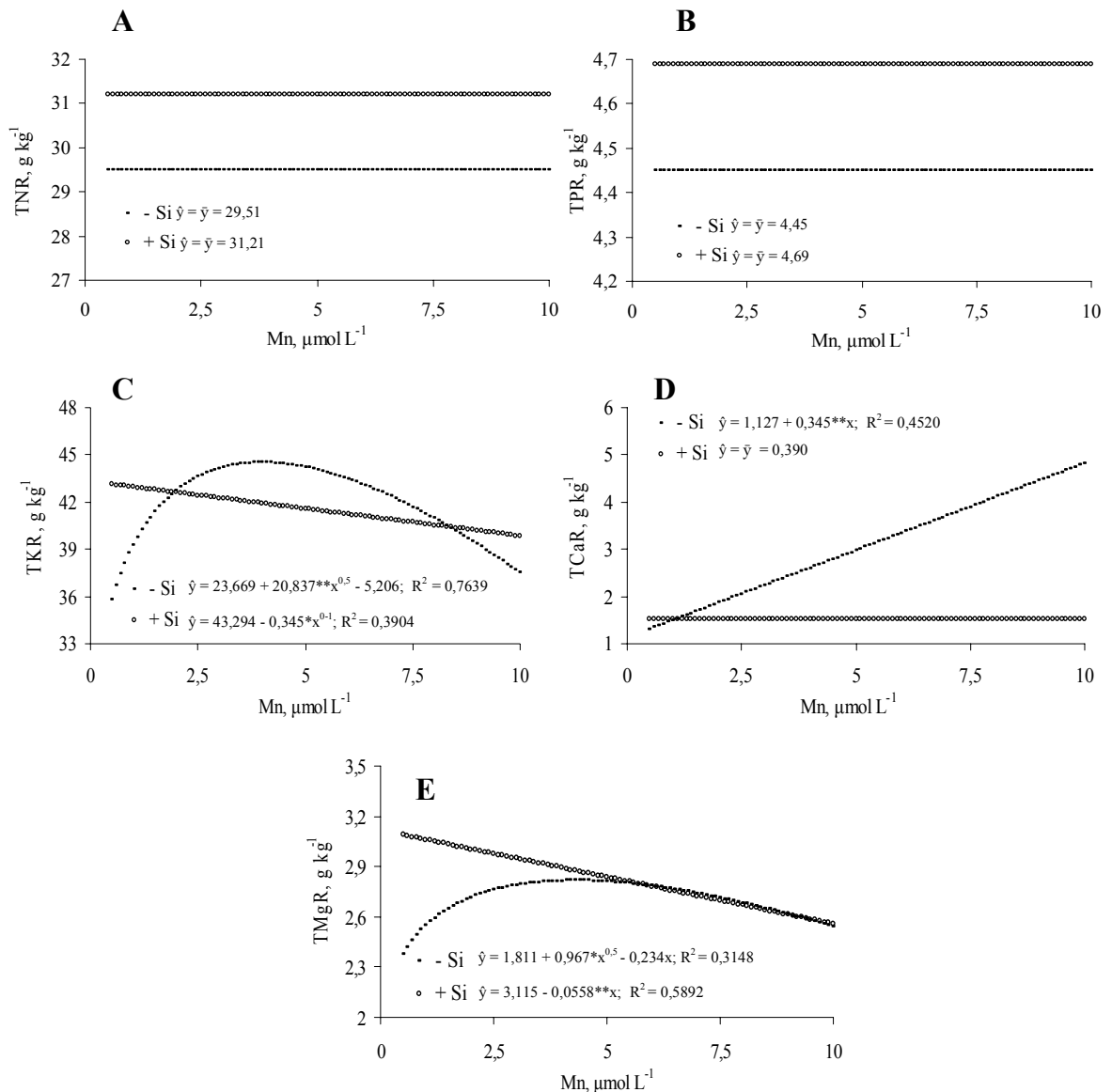


Figura 3. Teores de nitrogênio (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D) e magnésio (E) em raízes de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com diferentes doses de Mn, na presença ou na ausência de adição de Si.

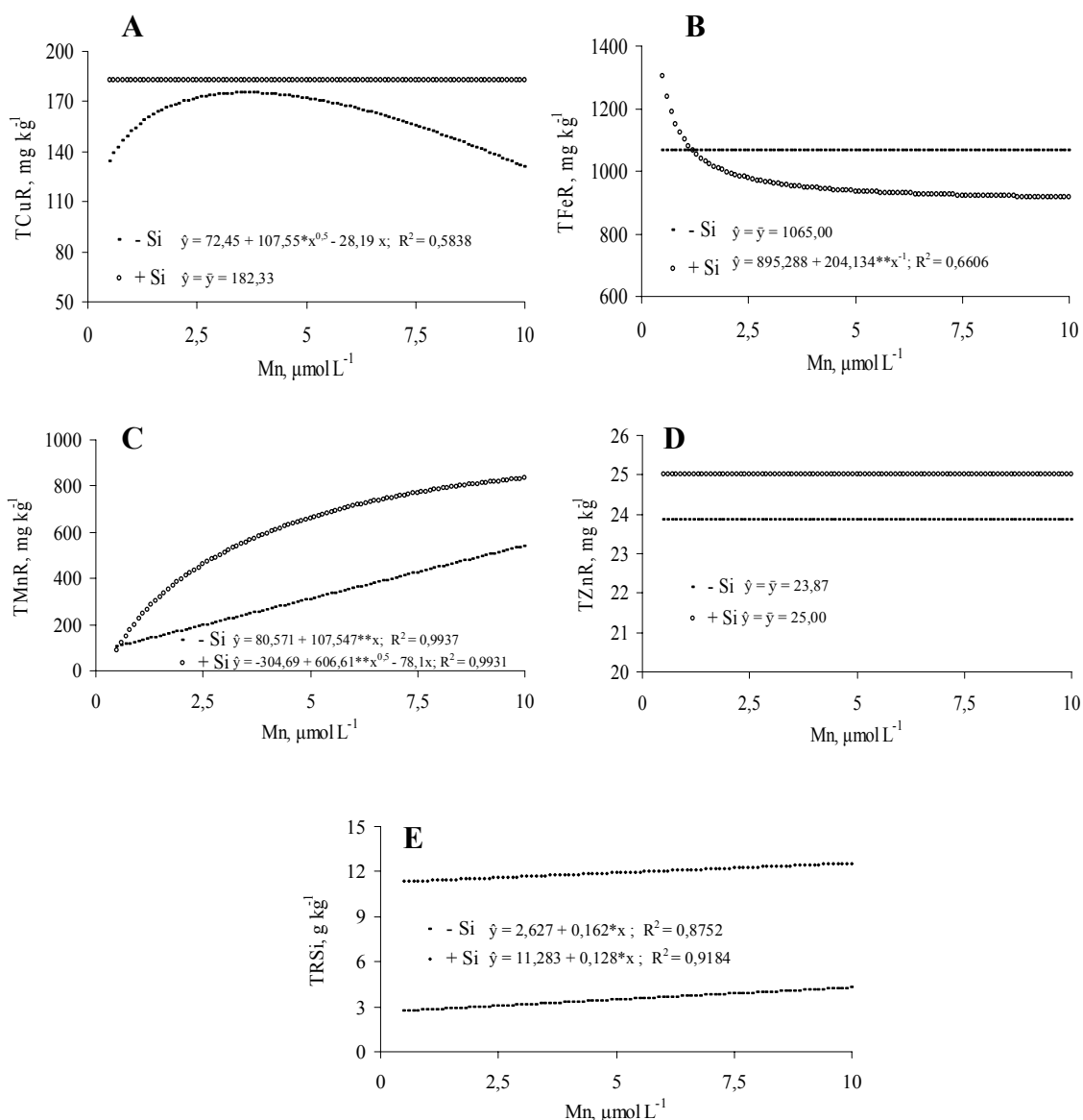


Figura 4. Teores de cobre (A), ferro (B), manganês (C), zinco (D) e silício (E) em raízes de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com diferentes doses de Mn, na presença ou na ausência de adição de Si.

Nas raízes, houve efeito diluição para os teores K e Mg, assim como para P e Mg nas bainhas das plantas crescidas na presença de Si em resposta ao aumento da dose de Mn na solução nutritiva. Teores de Fe nas raízes e nas bainhas de plantas crescidas na presença de Si e teores foliares de Ca em plantas crescidas na ausência desse elemento apresentaram diminuição com o aumento da quantidade de Mn adicionado à solução nutritiva, podendo-se suspeitar de um efeito diluição. Porém, quando se observa o acúmulo destes nutrientes nestes

compartimentos, verifica-se uma diminuição, logo, conclui-se tratar-se de uma interação negativa entre Ca, Fe e Mn. Segundo Malavolta et al. (1997) os teores de Ca, Fe e Zn são os que mais comumente sofrem efeito negativo com o aumento da concentração de Mn no solo ou na solução nutritiva. Pereira (1999) também verificou a redução nos teores foliares de Ca e Fe em arroz nas maiores doses de Mn avaliadas, bem como Salvador et al. (2003) em goiabeira e Veloso et al. (1995) em pimenteira-do-reino.

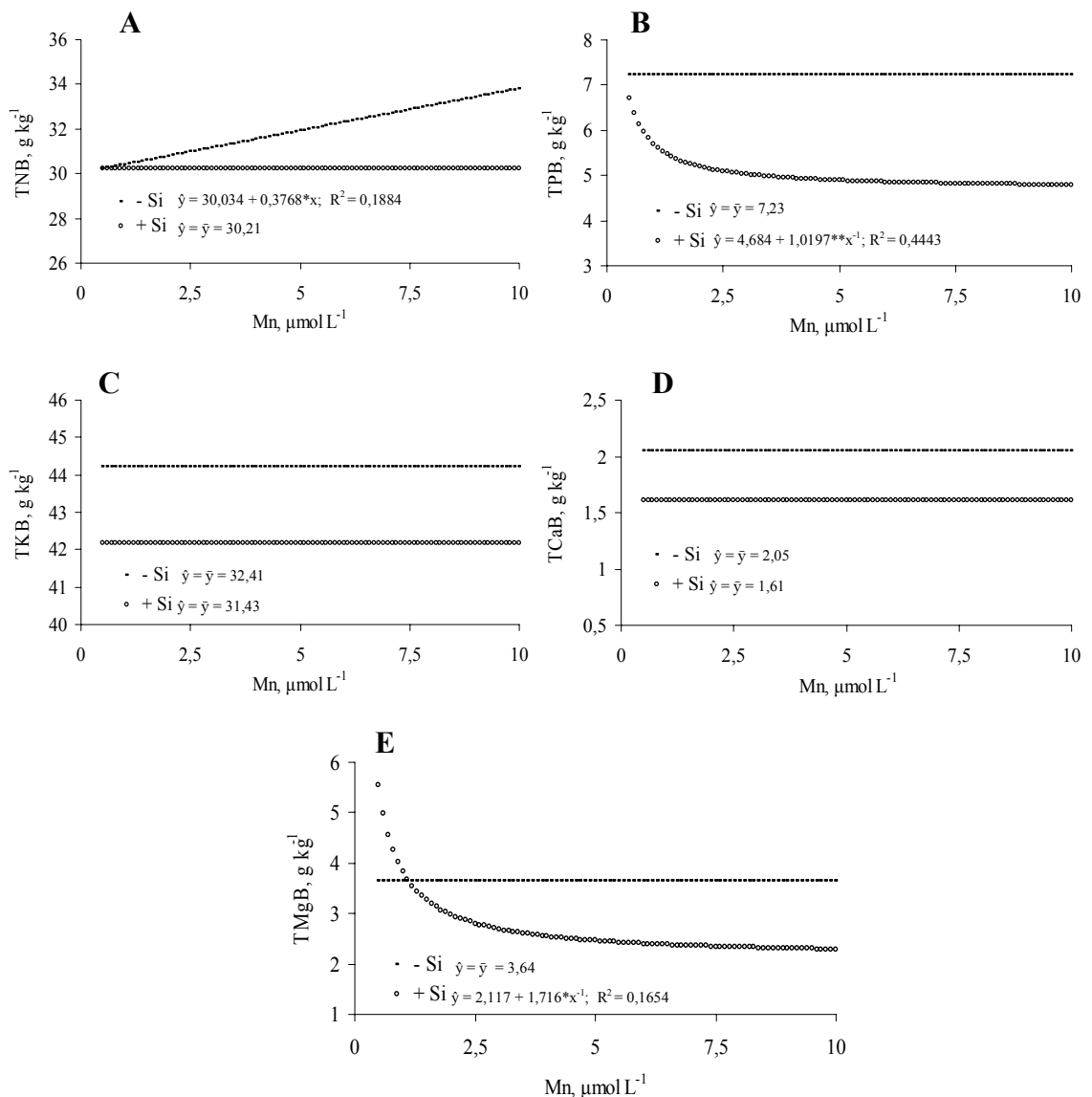


Figura 5. Teores de nitrogênio (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D) e magnésio (E) em bainhas de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com diferentes doses de Mn, na presença ou na ausência de adição de Si.

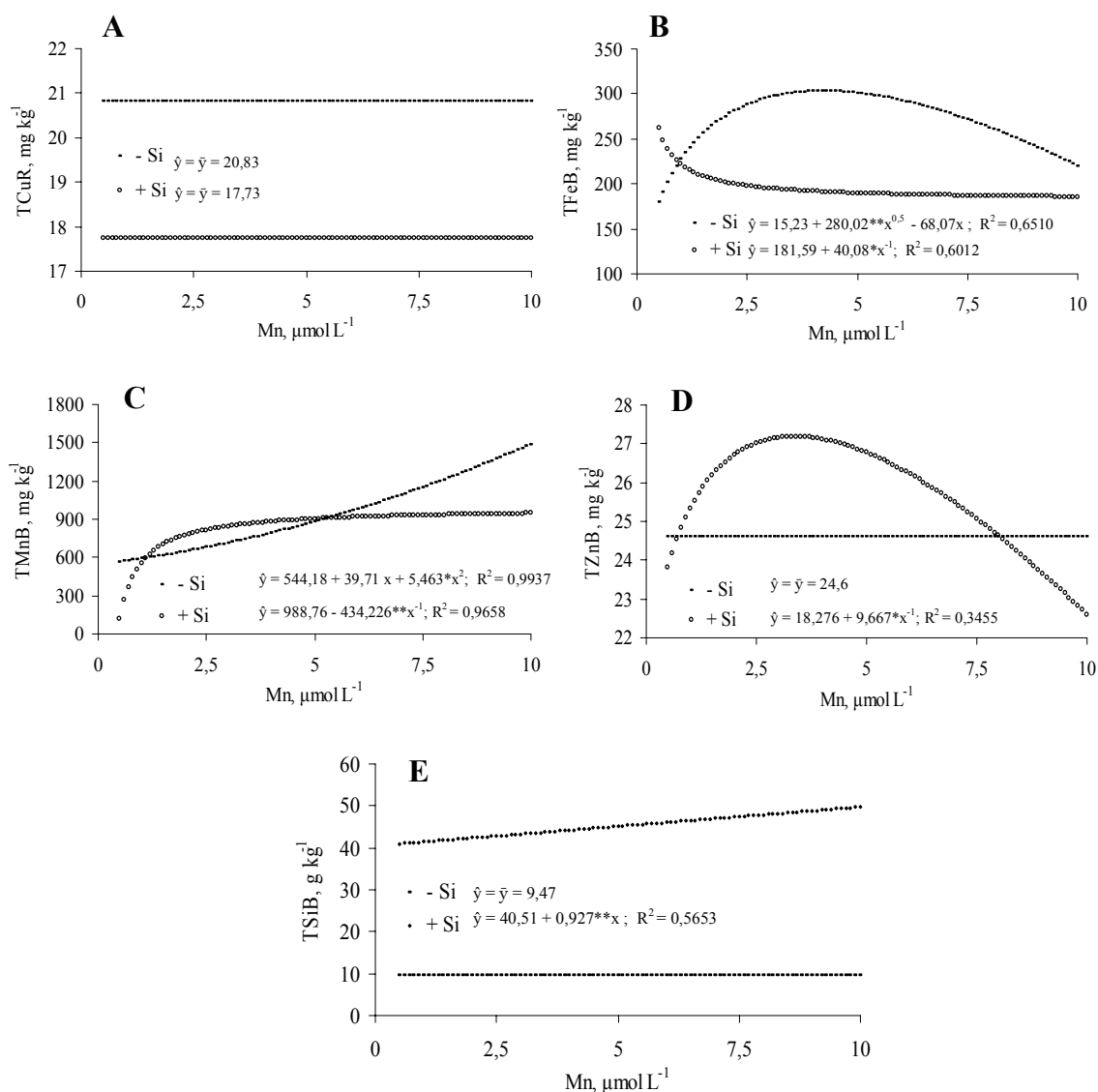


Figura 6. Teores de cobre (A), ferro (B), manganês (C), zinco (D) e silício (E) em bainhas de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com diferentes doses de Mn, na presença ou na ausência de adição de Si.

Quanto aos teores foliares de P, K, Ca e Mg, a ausência de Si na solução nutritiva causou uma redução inicial de seus respectivos teores, com queda até a dose intermediária, com subsequente aumento até a dose de 10 μmol L⁻¹, ajustando-se ao modelo raiz quadrático. No caso do Zn, a ausência de Si é que causou efeito semelhante a este (Figuras 7 e 8).

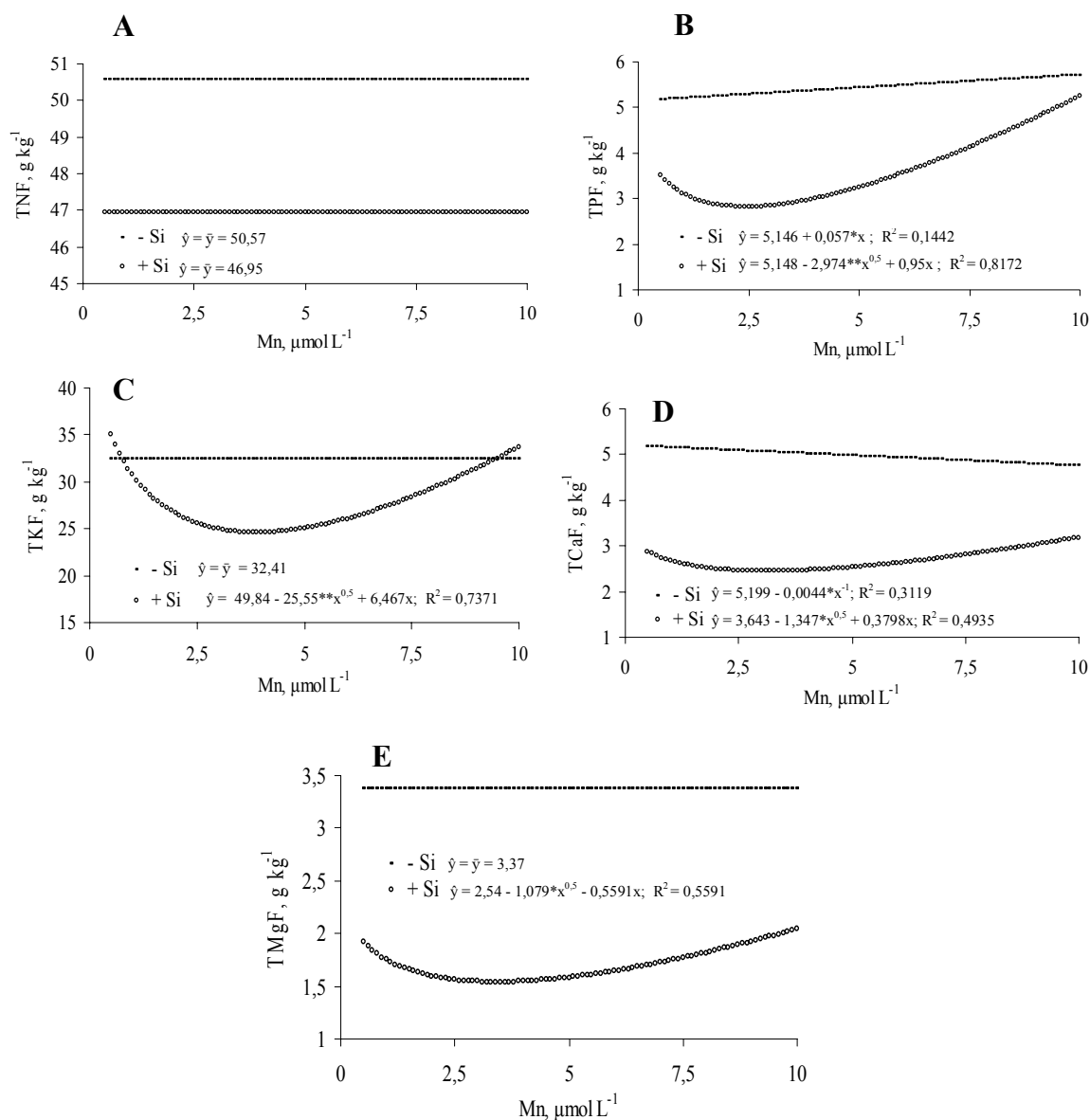


Figura 7. Teores de nitrogênio (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D) e magnésio (E) em folhas de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com diferentes doses de Mn, na presença ou na ausência de adição de Si.

Verifica-se que os teores foliares médios de Mn nas plantas de arroz que receberam a dose de 0,5 μmol L⁻¹ foi de 650 mg kg⁻¹, considerados adequados para o arroz, segundo Fageria (1984), mesmo assim houve aumento de produção de matéria seca com as maiores doses de Mn.

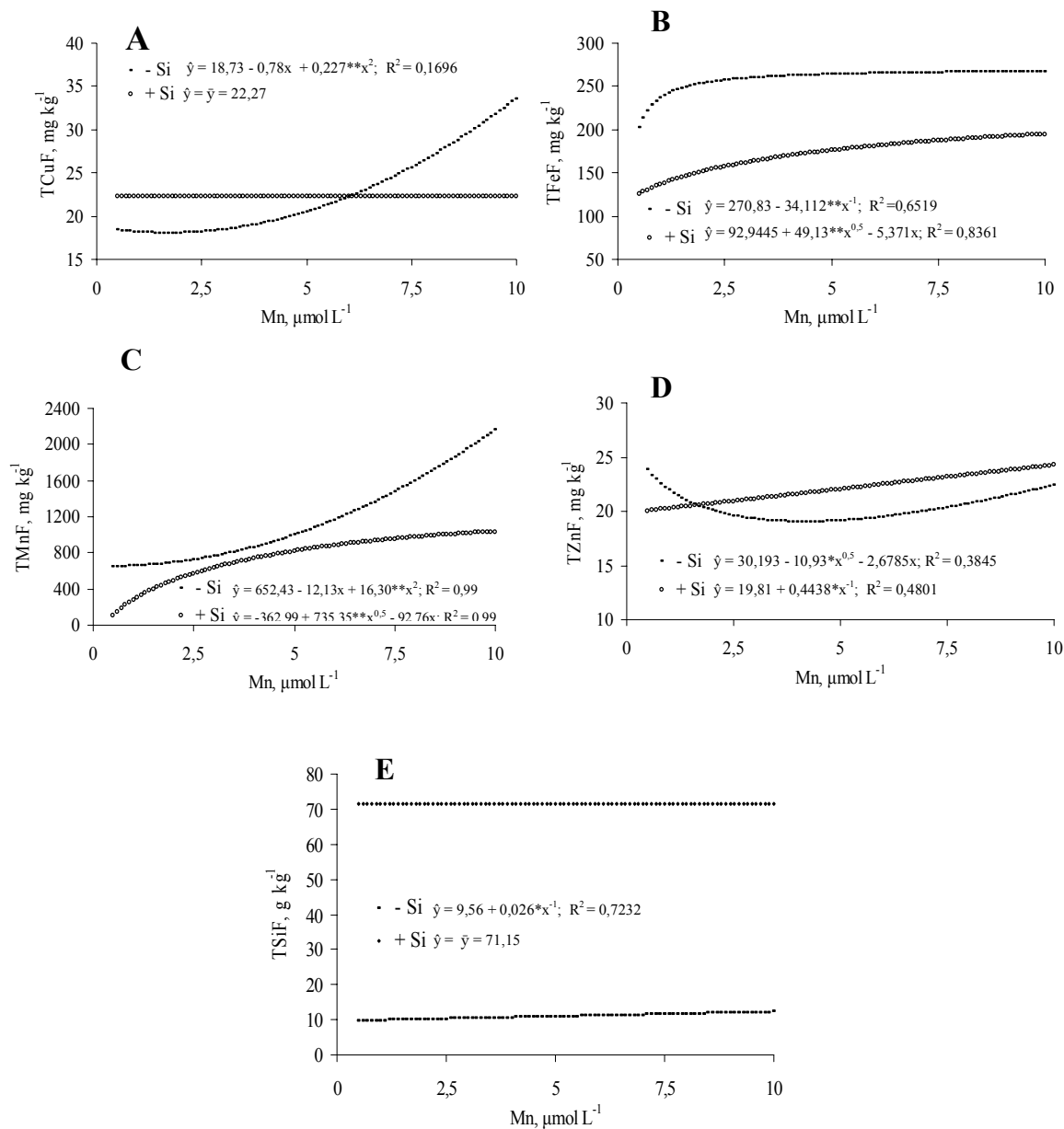


Figura 8. Teores de cobre (A), ferro (B), manganês (C), zinco (D) e silício (E) em folhas de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com diferentes doses de Mn, na presença ou na ausência de adição de Si.

Com aumento das doses de Mn, na ausência de Si, houve aumento dos teores de Mn nas três partes da planta avaliadas. O aumento do teor foliar com o aumento da dose de Mn também foi verificado em arroz, goiabeira, pimenteira-do-reino (Pereira, 1999; Salvador et al., 2003; Veloso et al., 1995. Verificou-se

que na ausência de Si, os valores das concentrações de Mn foram aumentando das raízes para as bainhas e dessas para as folhas. Fazendo-se uma proporção do Mn nas raízes:bainhas:folhas, tem-se uma relação de 1:3,3:4,2 nas plantas sem suprimento de Si na solução nutritiva e de 1:1,3:1,2 nas plantas que receberam Si, evidenciando claramente uma melhor distribuição do Mn nas plantas, causada pelo Si.

Nas raízes, a presença ou a ausência de Si, estimulou o aumento nos teores de Si com o aumento das doses de Mn. Nas bainhas, a presença de Si na solução proporcionou maiores teores de Si com o aumento da dose de Mn, e nas folhas, a ausência de Si propiciou tal efeito, ajustando-se ao modelo linear (Figura 8).

Deve-se salientar que a determinação dos teores de macrocutrientes, micronutrientes e Si na bainha, como realizado neste trabalho, é importante não só para obter informações relacionadas à compartimentalização de nutrientes, mas também para futuros trabalhos que avaliem a interação entre nutrição e doenças de plantas, em que o patógeno infeccione tecidos desta parte da planta, como no caso da queima-das-bainhas, causada pelo fungo *Rhizoctonia solani*.

Houve acúmulo significativo de todos os nutrientes avaliados, bem como de Si, com a adição deste elemento à solução nutritiva, em todas as partes avaliadas das plantas, com exceção do Mn nas bainhas e Ca e Fe nas folhas (Quadro 4).

O maior acúmulo de N, P, K, Mg, Cu, Fe e Zn em raízes, bainhas e folhas de plantas supridas com Si ocorreu devido à maior produção de matéria seca apresentada nessas partes da planta, pois o acúmulo é avaliado com base na produção de matéria seca da parte avaliada. Este comportamento também foi observado para Ca e Fe nas raízes e bainhas. O maior acúmulo de Si nas raízes ocorreu, não só por causa da maior quantidade de matéria seca, mas também porque o elemento foi adicionado à solução nutritiva na forma em que a planta o absorve, o mesmo ocorrendo nas bainhas e folhas.

Quadro 4. Acúmulo de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn e Si, nas raízes, bainhas e folhas de arroz cultivado em solução nutritiva, na presença ou na ausência de Si.

Acúmulo	Silício (mmol L ⁻¹)	
	0	2
Raízes		
N	21,455 b ¹	25,837 a
P	3,266 b	3,884 a
K	28,517 b	34,611 a
Ca	0,949 b	1,262 a
Mg	1,874 b	2,373 a
Cu	106,297 b	150,518 a
Fe	531,550 b	881,375 a
Mn	219,086 b	379,245 a
Zn	17,347 b	20,662 a
Si	2,20 b	10,89 a
Bainhas		
N	21,389 b	31,807 a
P	4,810 b	5,744 a
K	30,047 b	44,260 a
Ca	1,363 b	1,697 a
Mg	2,369 b	2,416 a
Cu	14,126 b	18,554 a
Fe	158,509 b	223,892 a
Mn	642,011 a	626,905 a
Zn	16,315 b	25,986 a
Si	6,28 b	47,24 a
Folhas		
N	39,670 b	63,060 a
P	4,219 b	5,092 a
K	25,149 b	42,118 a
Ca	3,914 a	3,830 a
Mg	2,482 b	2,650 a
Cu	17,330 b	31,292 a
Fe	196,918 a	213,287 a
Mn	961,568 a	750,246 b
Zn	16,801 b	29,194 a
Si	8,42 b	95,94 a

¹Médias seguidas de letras distintas, nas linhas, diferem significativamente entre si pelo Teste-F (P<0,05)

Outra possível explicação para o maior acúmulo de todos os macro e micronutrientes avaliados seria o aumento da atividade da H⁺-ATPase nas raízes. Liang (1999), trabalhando com cevada em solução nutritiva, verificou que sob estresse salino as plantas supridas com Si tiveram a atividade desta enzima aumentada e apresentaram maiores teores foliares e radiculares de K. Adicionalmente, o Si poderia reduzir a permeabilidade da membrana plasmática, aumentada em condições de estresse salino, auxiliando suas estruturas a manterem suas formas.

O acúmulo de Ca nas folhas, apesar de não ter sido significativo, foi maior em plantas que não receberam a aplicação de Si. Isso significa que o efeito da maior massa foi anulado, passando-se a considerar que houve, possivelmente, uma interação negativa entre estes dois elementos no arroz cultivado com Si. Torna-se importante avaliar o acúmulo e os teores dos nutrientes ao mesmo tempo. São variáveis distintas, cujos resultados trazem resultados que são interdependentes e que às vezes, dão informações diferentes, e complementares, principalmente quando o fator em estudo são doses de nutrientes.

Neste mesmo raciocínio, comparando os resultados do efeito do Si no acúmulo e nos teores de nutrientes nas raízes e folhas, constata-se não ter havido modificações para as raízes e mudanças sensíveis para as folhas (Quadros 3 e 4). As plantas que receberam Si apresentaram maior acúmulo dos nutrientes, mantendo esta tendência quanto aos teores. Nas folhas, as plantas que receberam Si também apresentaram maior acúmulo e menores teores da maioria dos nutrientes. Explica-se o fato pelo crescimento das partes avaliadas das plantas. O Si promoveu aumento na massa da matéria seca de raízes e folhas (Quadro 2), que foi de 13,91% nas raízes e 71,26% nas folhas. Pode-se concluir que o aumento da massa de raízes não foi suficiente para promover o efeito diluição; já nas folhas, onde o aumento foi substancial, esse efeito ocorreu. Ressalva-se que os maiores teores de Si em todas as partes das plantas com ele supridas devem-se à sua maior disponibilidade às raízes e não somente ao maior crescimento dessas plantas, por propiciar maior acúmulo e não ter havido efeito diluição (Quadro 3).

Não foi detectado nenhum efeito das doses de Mn no acúmulo da maioria dos nutrientes avaliados, com a adição de Si à solução nutritiva. Foi o que ocorreu para todos os macronutrientes avaliados e para Cu, Zn e Si nas raízes; N, P, K, Mg, Fe, Cu, Zn e Si nas bainhas e N, Ca, Mg, Cu, Fe, Zn nas folhas (Figuras 9-14).

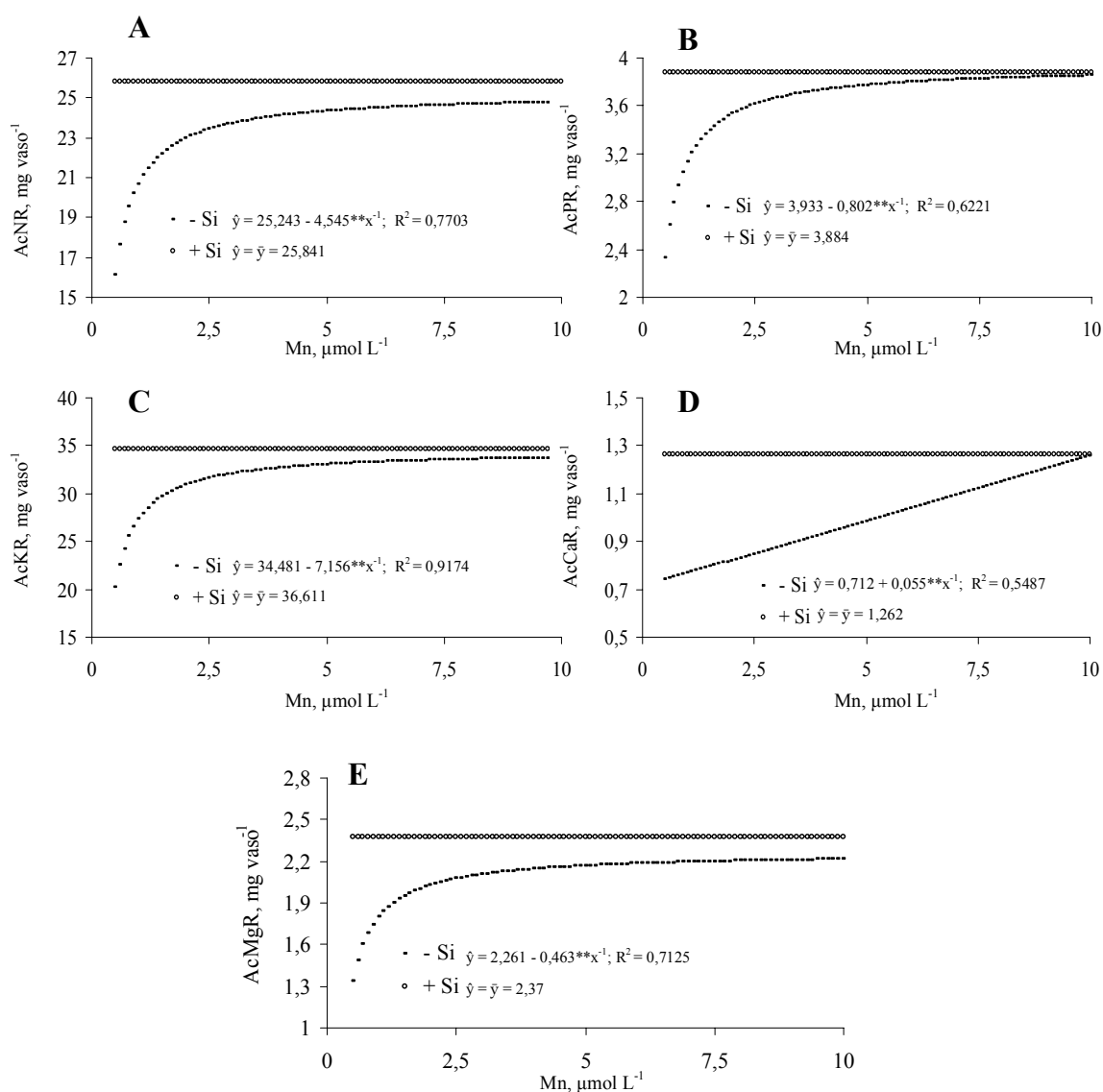


Figura 9. Nitrogênio (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D) e magnésio (E) acumulados nas raízes de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com diferentes doses de Mn, na presença ou na ausência de adição de Si.

Ajustou-se o modelo hiperbólico para o acúmulo de N, P, K, Mg e Zn nas raízes, bainhas e folhas, enquanto que para Ca e Cu isso ocorreu apenas nas bainhas (Figuras 9-14). Com este modelo, observa-se incremento no acúmulo destes nutrientes com grande diferença entre as respostas à menor dose de Mn (0,5 $\mu\text{mol L}^{-1}$) e as respostas às outras doses (2,5 e 10 $\mu\text{mol L}^{-1}$), porém com incrementos cada vez mais discretos a partir da dose de 2,5 $\mu\text{mol L}^{-1}$.

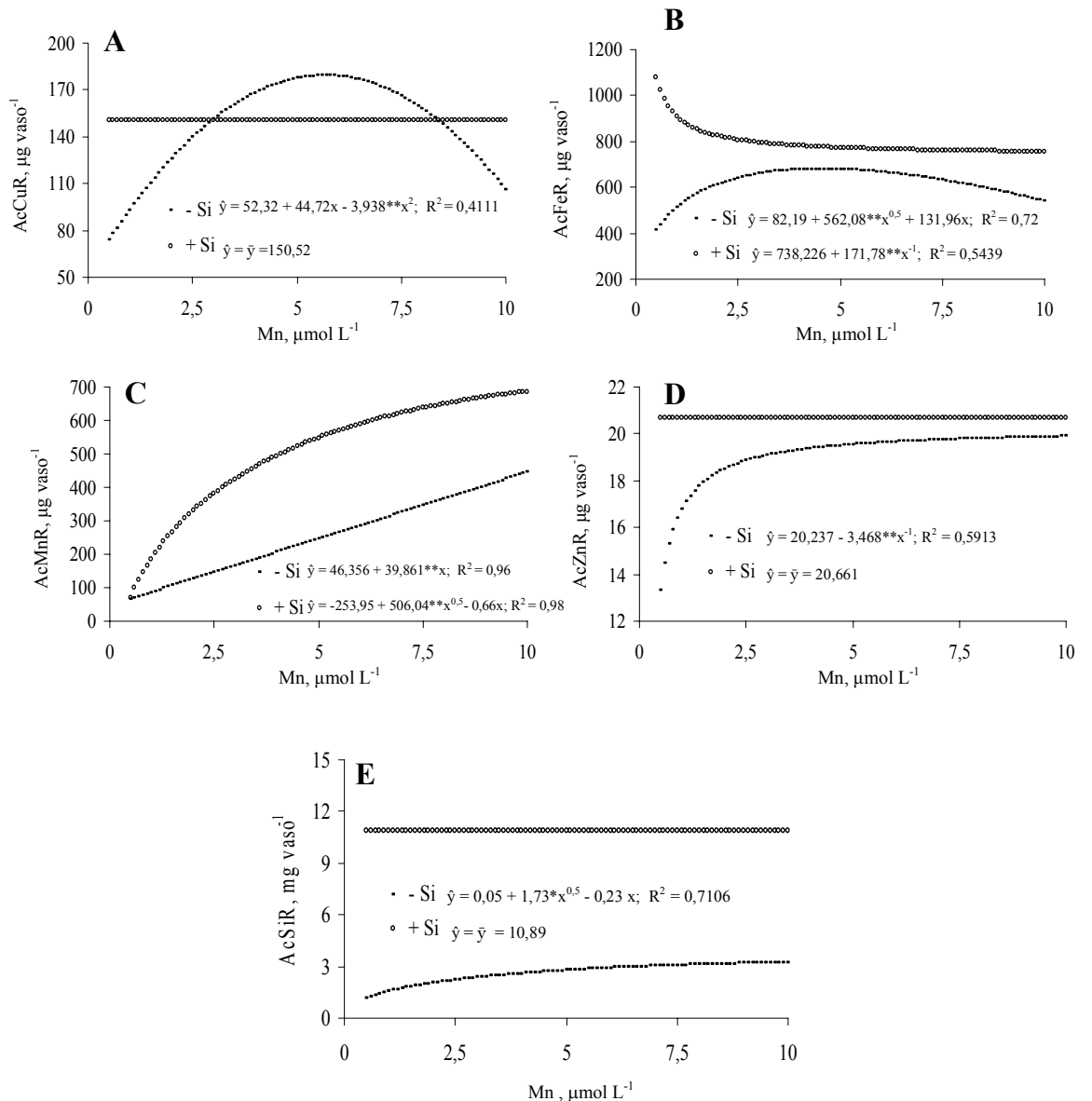


Figura 10. Cobre (A), ferro (B), manganês (C), zinco (D) e silício (E) acumulados nas raízes de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com diferentes doses de Mn, na presença ou na ausência de adição de Si.

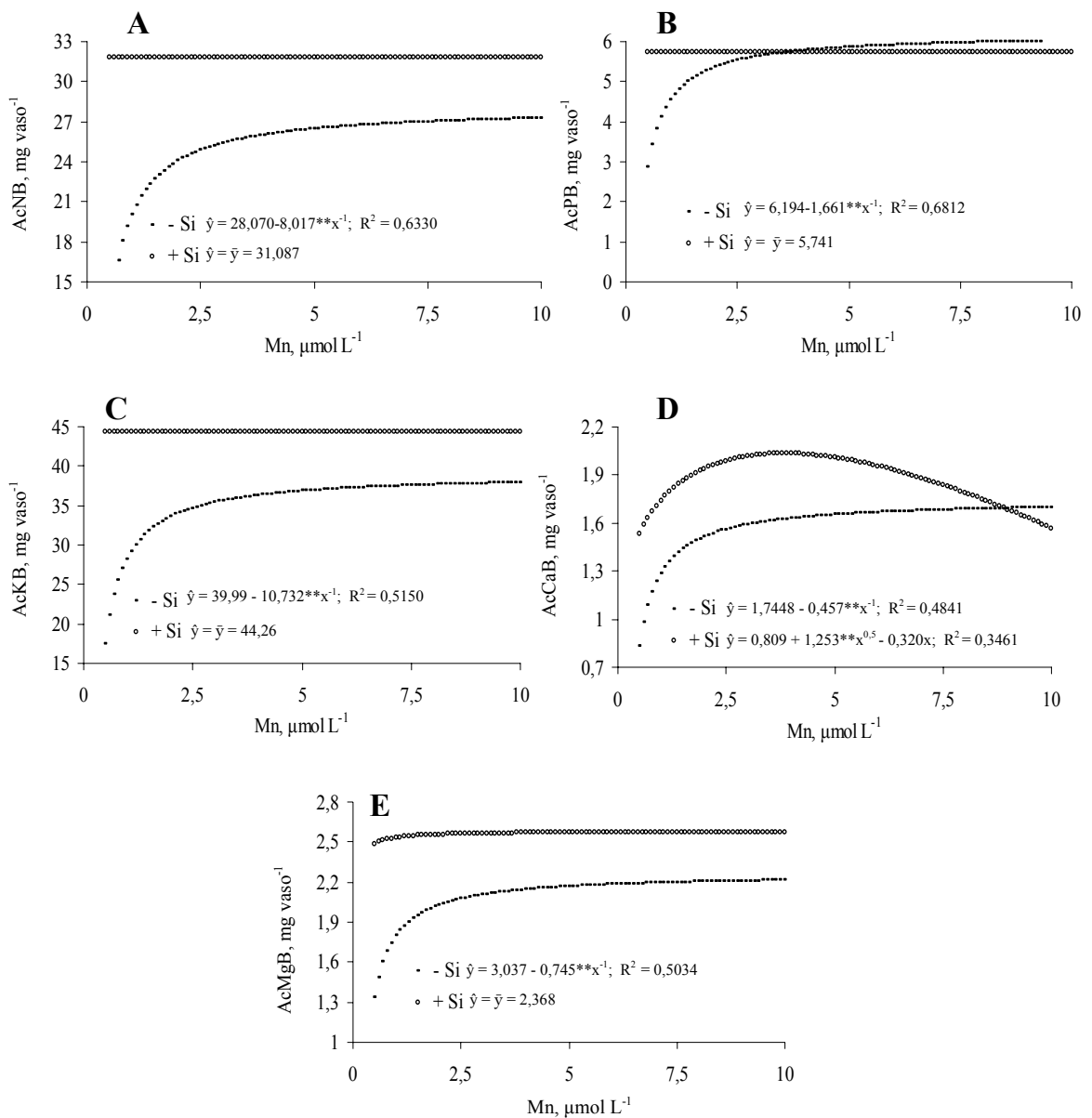


Figura 11. Nitrogênio (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D) e magnésio (E) acumulados nas bainhas de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com diferentes doses de Mn, na presença ou na ausência de adição de Si.

No caso do acúmulo do Ca nas raízes em função das doses de Mn, ajustou-se o modelo linear (Figura 9). Para as folhas, ajustou-se o modelo quadrático, com aumento no acúmulo até a dose intermediária e, posteriormente, redução progressiva (Figura 13). Foy et al. (1978) mencionam reduções nas quantidades absorvidas de Ca e de Fe pelas plantas em doses elevadas de Mn. Cabe ressaltar que com a adição de Si à solução nutritiva não houve diferença

significativa para o acúmulo foliar de Ca, porém o acúmulo médio de Ca na presença de Si foi inferior ao alcançado em sua ausência, reforçando a idéia do antagonismo entre estes dois elementos (Quadro 4).

O acúmulo de Fe nas raízes, bainhas e folhas e de Cu nas raízes variaram seguindo o modelo quadrático ou raiz quadrático, com aumento do acúmulo até a dose intermediária de Mn, com posterior queda no acúmulo, acima dessa dose (Figuras 10, 12 e 14). Vários autores citam a ocorrência da deficiência de Fe induzida pela alta concentração de Mn na solução nutritiva (Lee, 1972; Foy, 1984). Segundo Foy (1984), a relação Fe/Mn tem sido utilizada como um indicador da toxidez de Mn em plantas. Assim, por causa desta estreita interação, Ponnampereuma & Lantin (1985) recomendam a aplicação de maiores doses de Mn em solos com histórico de toxidez causada por Fe. No caso do Fe, o modelo raiz quadrático foi ajustado para seu acúmulo nas bainhas e folhas (Figuras 12 e 14), aos modelos hiperbólico e raiz quadrático, respectivamente, manifestando antagonismo apenas nas raízes (Figuras 10, 12 e 14).

Em relação ao Mn, foi ajustado modelo linear para o seu acúmulo nas raízes, bainhas e folhas (Figuras 10, 12 e 14) semelhante ao verificado por Pereira (1999), em duas cultivares de arroz supridas com doses crescentes de Mn.

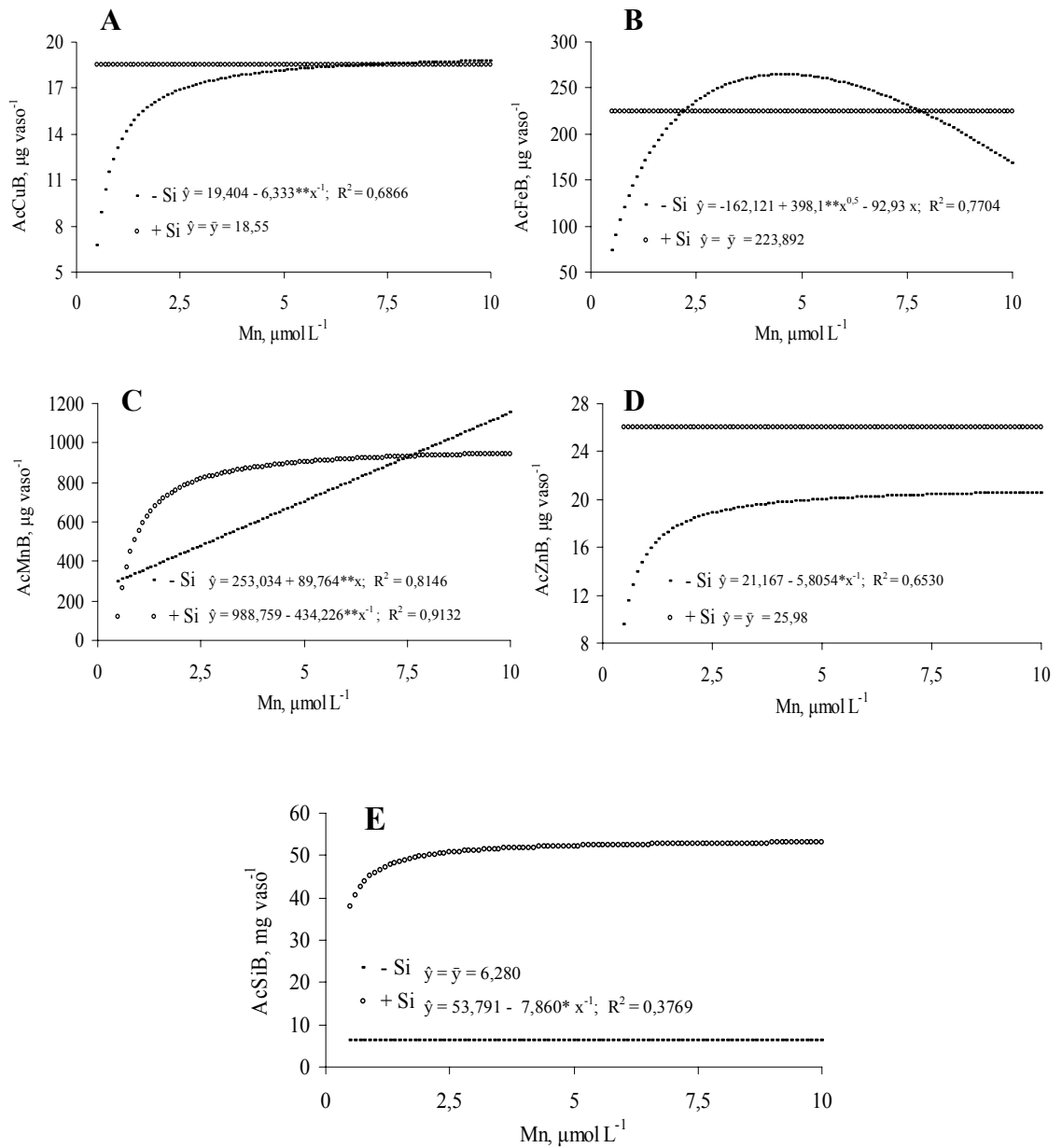


Figura 12. Cobre (A), ferro (B), manganês (C), zinco (D) e silício (E) acumulados nas bainhas de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com diferentes doses de Mn, na presença ou na ausência de adição de Si.

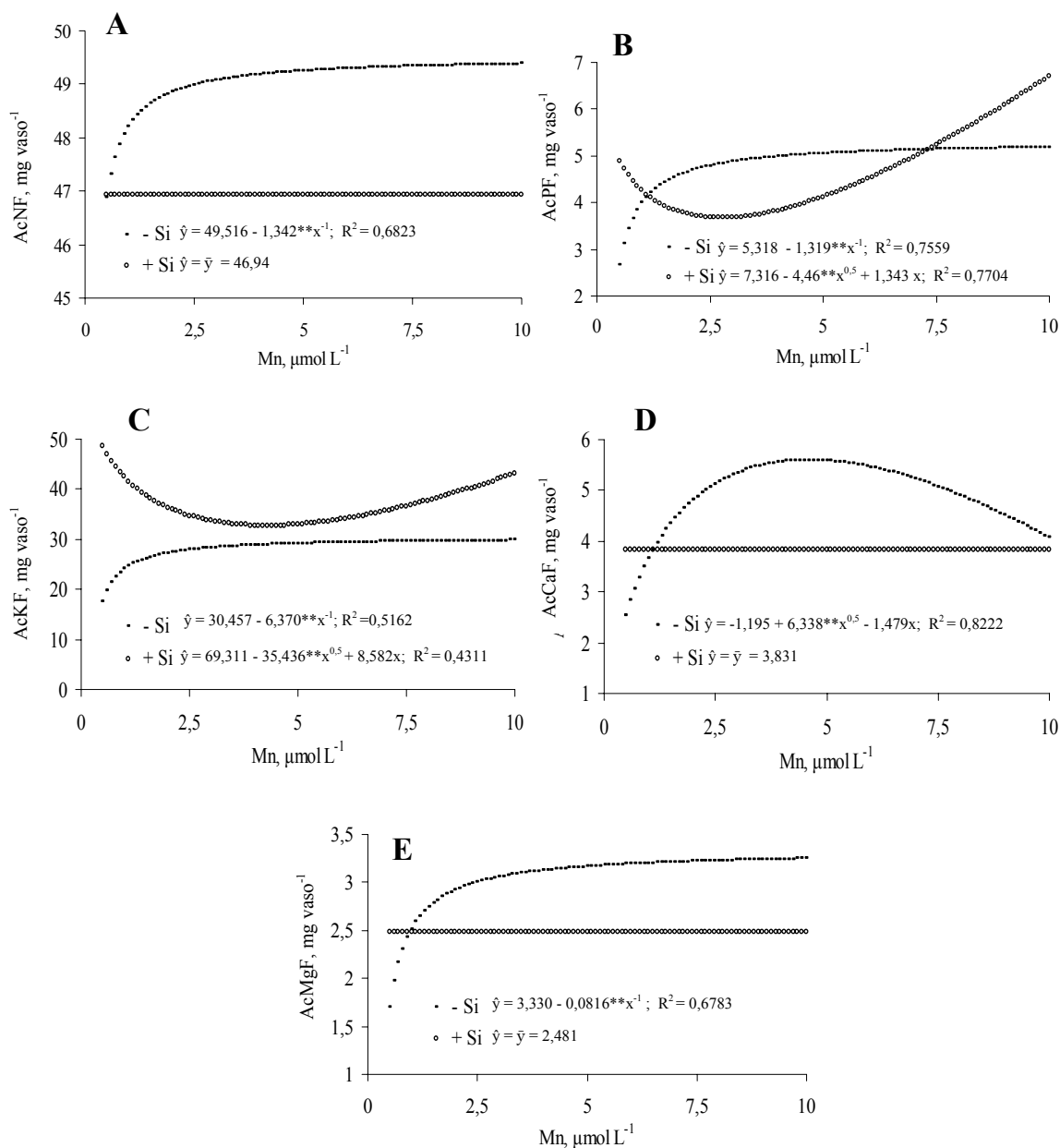


Figura 13. Nitrogênio (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D) e magnésio (E) acumulados nas folhas de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com diferentes doses de Mn, na presença ou na ausência de adição de Si.

Apenas o acúmulo de Si nas raízes foi influenciado pelas doses de Mn na ausência de Si, ajustando-se ao modelo hiperbólico (Figura 10). Isso também se deve ao efeito da maior produção de matéria seca e não a alguma interação entre absorção de Si e de Mn.

Houve efeito das doses de Mn no acúmulo de Mn nas raízes, bainhas e folhas, tanto na ausência quanto na presença de Si na solução nutritiva (Figura 14). Também foi verificado efeito do Mn, na ausência e na presença do Si, para o acúmulo de Ca nas bainhas e P, K nas folhas e Si nas bainhas. Comportamento oposto foi verificado para os teores foliares de Si, os quais não foram influenciados pelas doses de Mn (Figura 14).

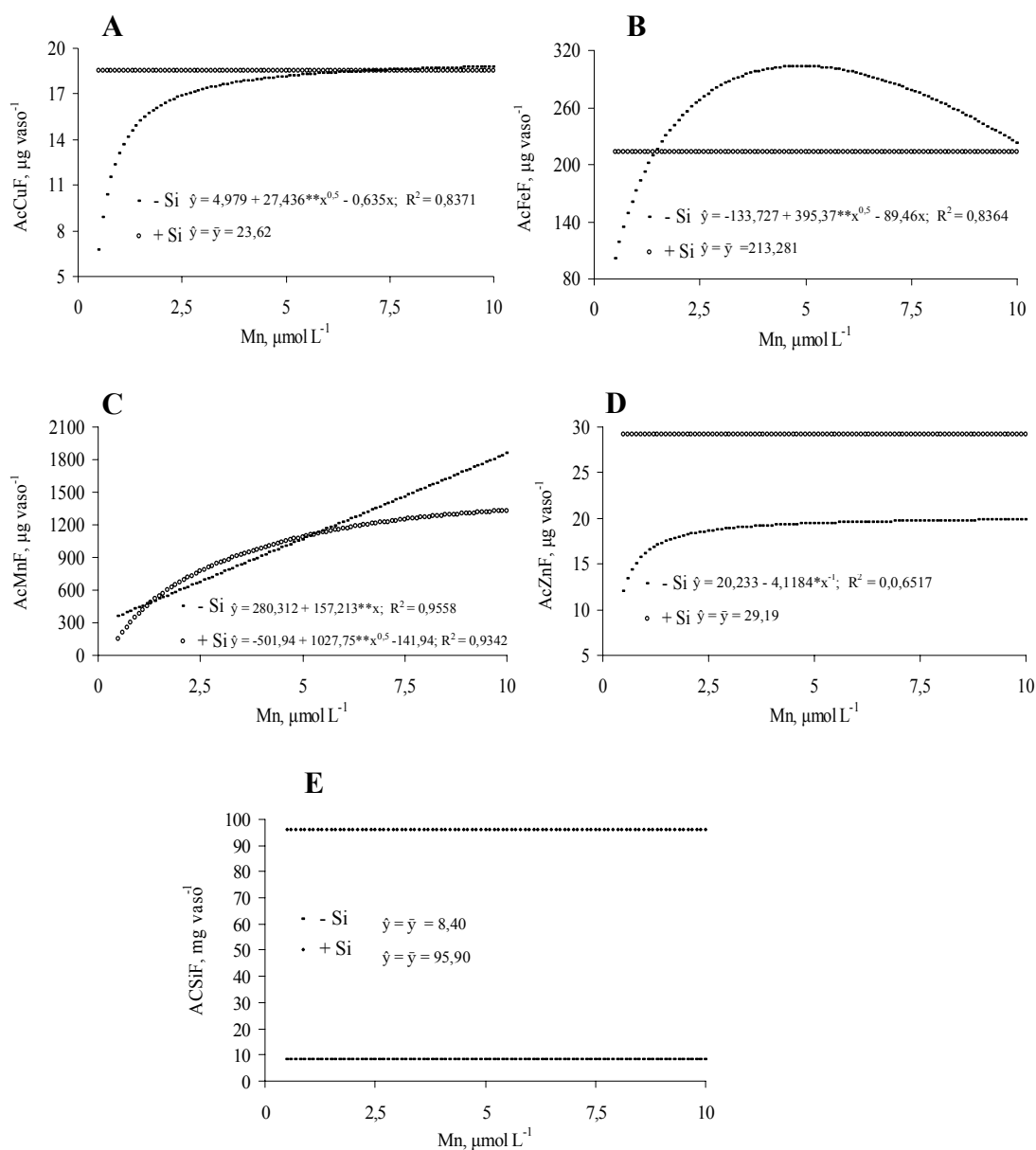


Figura 14. Cobre (A), ferro (B), manganês (C) e zinco (D) acumulados nas folhas de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com diferentes doses de Mn, na presença ou na ausência de adição de Si.

A presença de Si na solução nutritiva modificou a tendência de acúmulo linear de Mn com o aumento das doses deste micronutriente na solução nutritiva (Figuras 10, 12 e 14). Este fato deve-se a todas as possíveis causas anteriormente discutidas para o teor foliar deste elemento, e confirma o papel do Si no aumento da tolerância das plantas à toxidez por Mn. Comprova-se este fato pela ausência de modificações no acúmulo de Fe em todas as partes avaliadas da planta, com o aumento nas doses de Mn, na presença de Si na solução nutritiva.

4.2. Experimento 2. Espessura das faces adaxial e abaxial da epiderme de folhas de plantas de arroz

A Figura 15 mostra uma das seções transversais da lâmina foliar de arroz analisadas, destacando-se as células buliformes, feixe vascular e as faces adaxial e abaxial da epiderme, de um dos tratamentos avaliados. Houve efeito significativo do Si na espessura da epiderme das folhas de arroz, uma vez que tanto a face adaxial quanto a abaxial da epiderme apresentaram maior espessura quando se adicionou Si na solução nutritiva (Quadro 5). Nota-se que, proporcionalmente, houve maior espessamento da abaxial (12,86%) comparado à adaxial (6,75%).

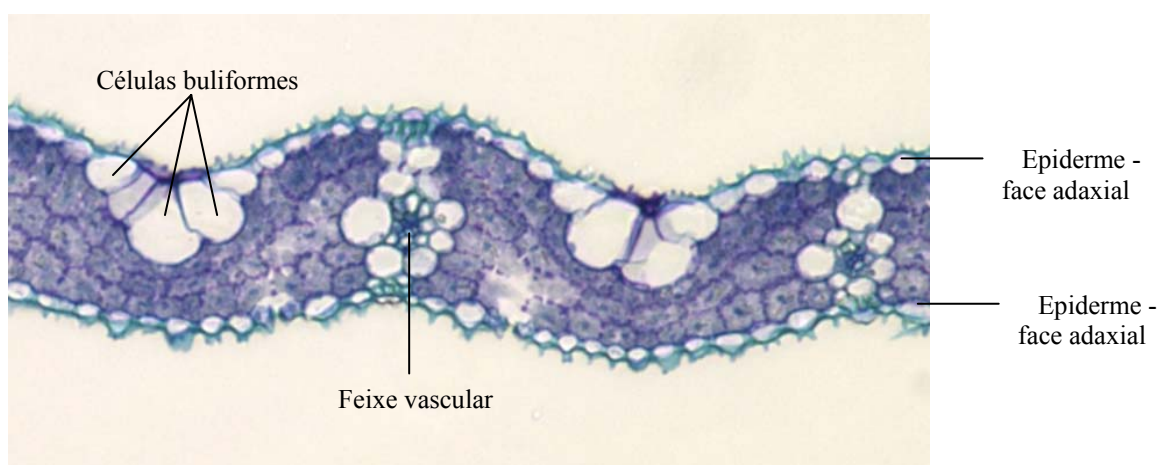


Figura 15. Seção transversal da lâmina foliar de arroz cultivado em solução nutritiva, com $2,0 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si e $0,5 \text{ mmol L}^{-1}$ de Mn, destacando-se as células buliformes, feixes vasculares e as faces da epiderme.

Quadro 5. Espessura das faces adaxial e abaxial da epiderme (μm) das folhas de arroz cultivadas na presença ou na ausência de Si na solução nutritiva.

Espessura da epiderme foliar, μm	Silício* (mmol L^{-1})	
	0	2
Face adaxial	0,577 b	0,616 a
Face abaxial	0,513 b	0,579 a

*Médias seguidas de letras distintas, nas linhas, diferem significativamente entre si pelo Teste-F ($P < 0,05$).

O maior espessamento da epiderme ocorreu, possivelmente, pela deposição de Si na forma de sílica amorfa ou hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), nas células epidérmicas. Segundo Blackman (1969) e Motomura et al. (2000), esta sílica pode depositar-se extracelularmente, principalmente nestas células, sob a cutícula. Ma & Takahashi (2002) afirmam que mais de 90% do Si na parte aérea do arroz está na forma de sílica amorfa hidratada. Em folhas de arroz, Hossain et al. (2002) verificaram que o Si promoveu uma maior extensibilidade da parede celular. Melo (2005) constatou deposição de sílica nas células da epiderme de *Brachiaria brizantha*, inclusive nas células buliformes, que são consideradas de fácil degradação por apresentarem paredes celulares delgadas e recobertas por uma fina cutícula, assemelhando-se as células do parênquima, segundo Wilson, (1976) e Alves de Brito, (1997).

Na literatura registra-se que a deposição de sílica nas células epidérmicas forma uma barreira mecânica denominada dupla camada sílica-cutícula, diminuindo a transpiração, melhorando o aproveitamento da água do solo e aumentando a resistência das plantas a patógenos (Yoshida et al., 1965; Agarie et al., 1998).

Não foi verificado efeito das doses de Mn na espessura da epiderme adaxial e abaxial das folhas de plantas de arroz, tanto na presença, quanto na ausência de Si na solução nutritiva (Figura 16). Existem poucas informações sobre o efeito dos micronutrientes na anatomia das plantas. Em trabalho com milho, Mattiello (2004) concluiu que entre os nutrientes estudados, a deficiência de Mn foi a que promoveu maiores alterações na anatomia foliar. Esse autor verificou uma redução da área total da seção transversal e espessura da lâmina

foliar e percentagem de espaços intercelulares, associadas à uma compactação celular sem que houvesse alteração significativa das percentagens da epiderme adaxial e abaxial e do parênquima clorofiliano.

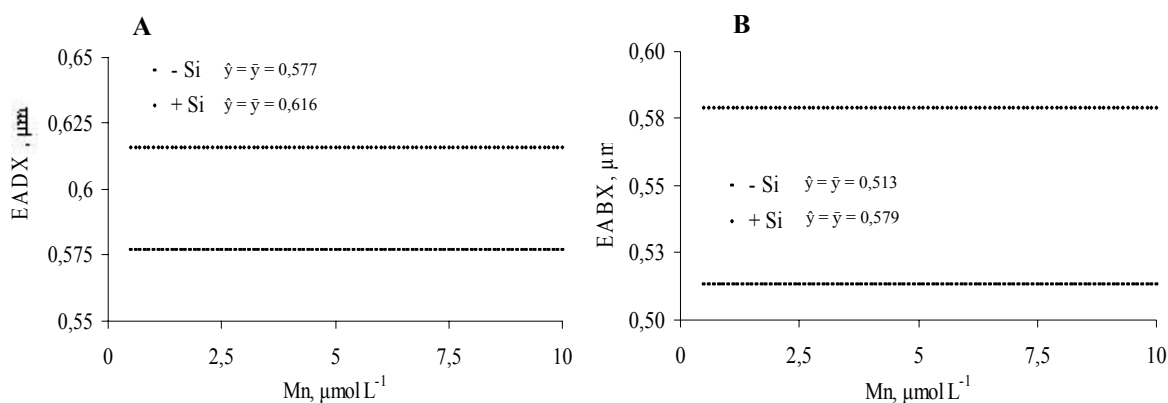


Figura 16. Espessura das faces adaxial (A) e abaxial (B) da epiderme, em μm , de folhas de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com diferentes doses de Mn, na presença ou na ausência de adição de Si.

4.3. Experimento 3. Resistência do arroz à mancha-parda

Houve aumento significativo no período de incubação e decréscimo significativo no número de lesões por cm^2 de área foliar, severidade final, severidade real e área abaixo da curva do progresso da mancha-parda com a adição de Si à solução nutritiva ($P < 0,01$) (Quadro 6). Em plantas supridas com Si, houve aumento nos teores foliares de Si, mas diminuição dos teores de Mn (Quadro 6).

O período de incubação da mancha-parda em folhas de plantas de arroz que receberam Si prolongou-se em aproximadamente 9 horas (Quadro 6). Isso indica que houve atraso na penetração da célula da epiderme pelo fungo *B. oryzae*. Rodrigues et al. (2001), estudando o efeito do Si nos componentes de resistência do arroz à queima-das-bainhas, não verificaram nenhum efeito do Si em aumentar o período de incubação e atribuíram tal fato à capacidade do fungo *Rhizoctonia solani* de penetrar também pelos estômatos. Ao contrário, Seebold et

al. (2001) constataram aumento significativo no período de incubação da brusone em arroz, com maior suprimento de Si ao solo. No caso do fungo *B. oryzae*, a maioria das infecções se estabelece através das células da epiderme ao invés dos estômatos (Nanda & Gangopadhyay, 1984). Os menores valores de severidade refletem, de certa forma, a dificuldade do fungo em penetrar pela epiderme.

Quadro 6. Período de incubação, número de lesões por cm² de área foliar, severidade final, severidade real, área abaixo da curva do progresso da mancha-parda (AACPMP) e teores foliares de Si e Mn em plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com ou sem adição de Si e inoculadas com o fungo *Bipolaris oryzae*.

Variáveis	Si (mmol L ⁻¹)	
	0	2
Período de incubação (horas)	20,50 b ¹	29,33 a
Número de lesões por cm ² de área foliar	7,917 a	1,64 b
Severidade final (%)	68,89 a	2,46 b
Severidade real (%)	59,37 a	4,29 b
AACPMP	2367,4 a	661,8 b
Manganês (mg kg ⁻¹)	1094,17 a	471,00 b
Silício (g kg ⁻¹)	12,7 b	73,6 a

¹Médias seguidas de letras distintas, nas linhas, diferem significativamente entre si pelo Teste-F (P<0,01).

Houve redução média de mais de 6 lesões por cm² de área foliar em plantas supridas com Si (Quadro 6). Isso pode também ser explicado pela dificuldade do fungo em penetrar a epiderme devido à polimerização do Si abaixo da cutícula. Pelo observado no item 4.2. plantas supridas com Si apresentaram maior espessura da epiderme. Observações visuais permitiram inferir que as lesões desenvolvidas em folhas de plantas de arroz supridas com Si foram menores e esparsas em comparação àquelas que se desenvolveram em folhas de plantas de arroz não supridas com esse elemento (Figura 17). Nessas folhas, as lesões com halo clorótico foram maiores e coalesceram, tomando grande parte da área foliar. Redução significativa na taxa de expansão das lesões da brusone em folhas de arroz com a aplicação de silicato de cálcio no solo foi reportada por Seebold et al., (2001). Menzies et al. (1991a) encontraram redução

no número e tamanho das colônias do fungo *Podosphaeria xanthii* (*Sphaerotheca fuliginea*), causador do míldio pulverulento do pepineiro, além da redução na taxa de germinação dos conídios do fungo, após adição de Si à solução nutritiva (valores de até 4,1 mmol L⁻¹) e aumento do teor foliar desse elemento. De acordo com Kim et al. (2002), a fortificação da parede celular das células da epiderme do arroz pelo Si foi o fator responsável pela redução no número de lesões da brusone na folha. Correlação negativa entre o número de células epidérmicas silicificadas, principalmente as buliformes, com a incidência da mancha-parda foi reportada por Nanda & Gangopadhyay (1984). Esses autores também verificaram maior densidade de células silicificadas na epiderme em folhas de plantas de arroz crescidas nas maiores doses de Si adicionadas ao solo e observaram conídios de *B. oryzae*, embora germinados, não penetraram nas células da epiderme.

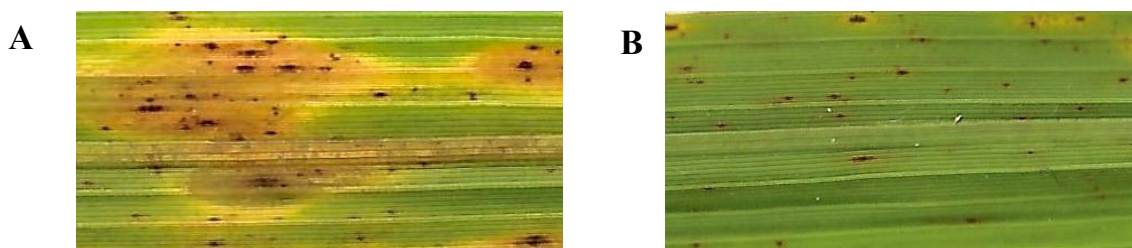


Figura 17. Lesões da mancha-parda em folhas de plantas de arroz crescidas em solução nutritiva na ausência (A) e presença de Si (B) na solução nutritiva, 144 h após a inoculação.

Tanto a severidade final quanto a severidade real, determinadas com o auxílio do programa Quant, foram significativamente reduzidas em 96,4 e 92,8%, respectivamente, com o suprimento de Si na solução nutritiva. Redução na severidade da mancha-parda do arroz, como efeito indireto da nutrição da planta com o Si, também foi observada por diversos autores (Gangopadhyay & Chatopadhyay, 1974a; Lee et al., 1981; Nanda & Gangopadhyay, 1984; Datnoff et al., 1997), porém tais reduções nunca alcançaram valores tão elevados quanto aos obtidos no presente estudo. A redução na severidade de várias doenças em

culturas como o arroz, pepino e trigo foi atribuída à barreira física (deposição e polimerização do Si abaixo da cutícula) pela potencialização de mecanismos de defesa de natureza química pela planta, como a produção de compostos fenólicos e ou fitoalexinas (Suzuki, 1935; Samuels et al., 1991; Chérif et al., 1992; 1994; Fawe et al., 1998; Kim et al., 2002; Bélanger et al., 2003; Rodrigues et al., 2003, 2004).

No presente trabalho foi utilizada a cultivar de arroz Metica-1 que é suscetível à mancha parda. A escala de severidade utilizada para avaliar as plantas foi proposta pelo IRRI (1996) e se baseia na porcentagem de área foliar afetada pela mancha parda (Quadro 1). Segundo Dr. Anne Sitarama Prabhu (comunicação pessoal), pode-se definir arbitrariamente a reação de genótipos de arroz susceptíveis, moderadamente resistentes ou resistentes à mancha parda, de acordo com esta escala. Considerando que com até 2% da área foliar lesionada pela mancha parda, o genótipo seria considerado resistente; valores de 2,1 a 10% o mesmo seria considerado moderadamente resistente e para valores maiores que 10% o genótipo seria suscetível. Dessa forma, é plausível inferir que o fornecimento de Si a uma certa cultivar de arroz, suscetível a mancha-parda, a exemplo da Metica-1, pode transformá-la em moderadamente resistente. Tal fato ocorreu no presente trabalho, onde os valores de severidade da mancha-parda foram menores que 10% em plantas supridas com Si (2,46%) e maiores que 10% nas que não receberam esse elemento (68,89 %) (Quadro 6). Essa observação corrobora com o trabalho de Huber (1994) que afirma que a nutrição mineral é um dos fatores que mais afetam a resistência e ou a suscetibilidade das plantas às doenças, apesar da resistência ser determinada geneticamente, mas poder ser alterada pelo meio ambiente.

A AACPM também foi significativamente reduzida em plantas supridas com Si (Quadro 6). Essa variável expressa o progresso da doença nas folhas de arroz ao longo do tempo e permitiu inferir que a expansão das lesões, e, conseqüentemente, a severidade foram negativamente afetadas pela presença do Si na solução nutritiva.

O menor ângulo de inserção foliar obtido nas plantas supridas com Si pode ter auxiliado essas plantas a alcançarem valores menores de severidade em relação às que não receberam este elemento. Gangopadhyay & Chatopadhyay (1974b), trabalhando em casa de vegetação, relacionaram o ângulo de inserção foliar de vários genótipos de arroz com a severidade da mancha-parda e concluíram que quanto menor o ângulo foliar, menor a severidade da mancha-parda.

Os teores foliares de Mn e Si se comportaram da mesma maneira que os referidos no item 4.1. Os teores foliares de Si foram superiores em plantas supridas com esse elemento, ocorrendo o inverso para os teores de Mn (Quadro 6). Dobermann & Fairhurst (2000) afirmam que plantas deficientes em Si (teores $< 50 \text{ g kg}^{-1}$) estão predispostas à infecção por *B. oryzae*. No presente trabalho, foi verificado que os teores foliares de Si foram $73,6 \text{ g kg}^{-1}$ com a adição desse elemento à solução nutritiva e apenas $12,7 \text{ g kg}^{-1}$ na ausência do mesmo. Assim, é possível concluir que quanto maior o Si na folha maior será a resistência do arroz à mancha-parda. Os teores de Mn, níveis considerados altos para o arroz, principalmente em plantas desprovidas de Si, se mantiveram em patamares considerados de certa forma adequados à nutrição da planta com a presença do Si na solução nutritiva.

Segundo Tullis (1935), o período de incubação da mancha-parda pode ser de até 18 horas. Esse foi o tempo necessário para que as lesões aparecessem nas folhas das plantas que receberam $0,5 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Mn, aumentando na dose intermediária com valores de até 23,8 horas e reduzindo-se nas plantas que receberam $10 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Mn (Figura 18).

O número de lesões por cm^2 de área foliar em relação às doses de Mn e na ausência de Si ajustou-se ao modelo hiperbólico. Observou-se uma redução de até 7 lesões por cm^2 de área foliar, da maior para a menor dose de Mn utilizada. O Mn também reduziu o número de colônias do míldio pulverulento em trigo (Simoglou, 2006). Baba & Takahashi (1957) também relataram redução no número e no tamanho das lesões da mancha-parda do arroz com a adição de Mn em relação à não aplicação desse elemento.

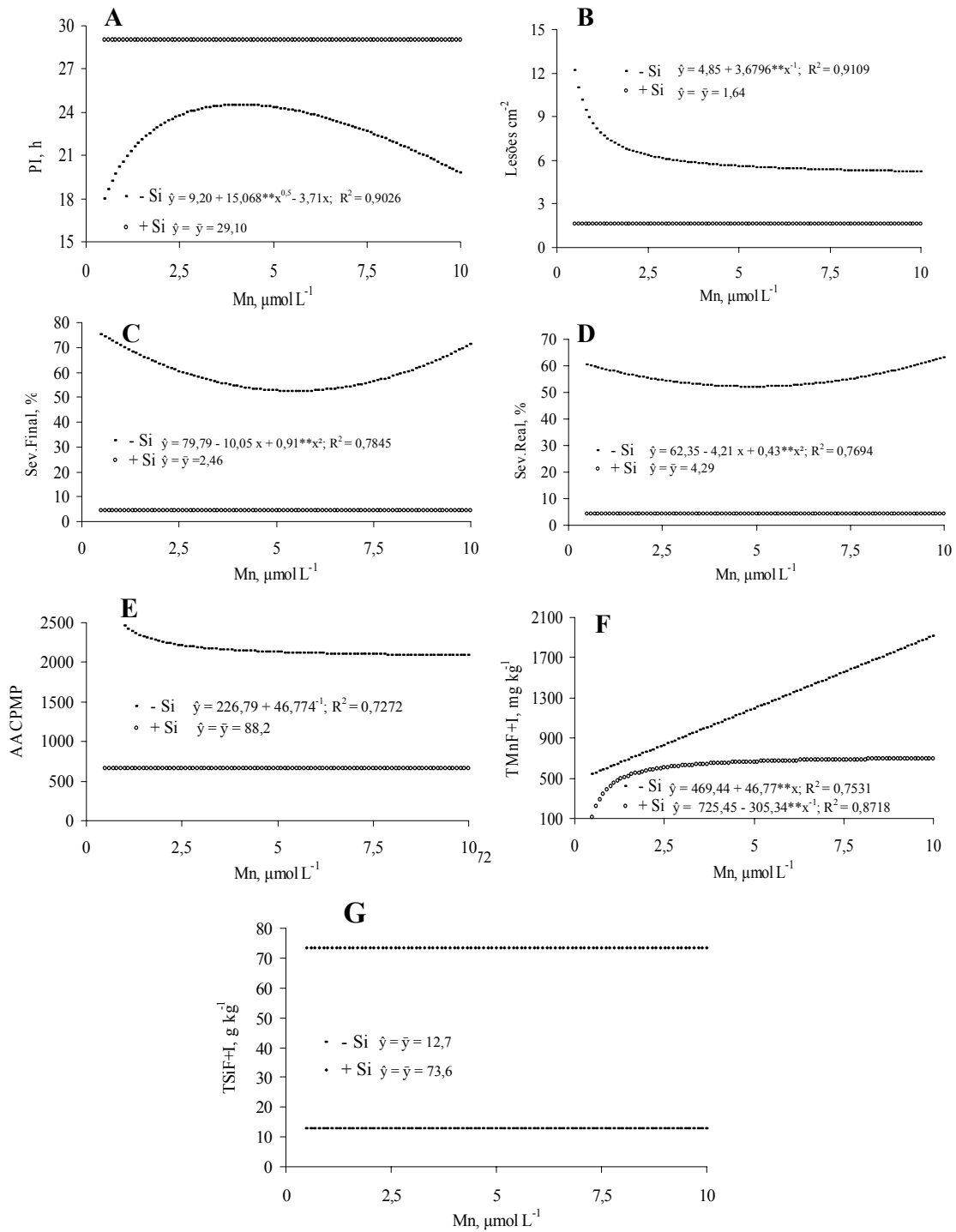


Figura 18. Período de incubação (A), número de lesões por cm^2 de área foliar (B), severidade final (C), severidade real (D), área abaixo da curva do progresso da mancha-parda (E), teores foliares de Mn (F) e de de Si (G) em plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva, com diferentes doses de Mn, na presença ou na ausência de Si e inoculadas com o fungo *Bipolaris oryzae*.

Os valores da severidade final e da severidade real da mancha-parda foram maiores em plantas cultivadas com $0,5 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Mn. Reduziram-se com a adição de $2,5 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Mn à solução nutritiva e tornaram a aumentar com a maior dose de Mn ($10 \mu\text{mol L}^{-1}$), mas atingiram valores semelhantes à dose de $0,5 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Mn (Figura 18). Resultados semelhantes foram reportados por Aguilar (1999) em cacaueteiro cultivado em solução nutritiva e inoculado com o fungo *Crinipelis pernicioso*, agente causal da vassoura-de-bruxa. Esse autor verificou que $2,5 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Mn na solução nutritiva reduziram a porcentagem de plantas infectadas do genótipo tolerante, porém na ausência de Mn e na dose máxima utilizada ($20 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Mn), não se observou diferença significativa na porcentagem de plantas infectadas, mas a incidência da doença foi superior à observada na dose intermediária. Evidencia-se assim, que os nutrientes devem estar em quantidades adequadas para que ocorra maior resistência do cacaueteiro a vassoura-de-bruxa. Logo, é de se esperar que tanto a deficiência quanto teores elevados de Mn, aumentem a suscetibilidade do arroz à mancha-parda. A razão para tal é que as plantas deficientes em Mn apresentam menor concentração de aminoácidos, compostos fenólicos e lignina, o que resulta em aumento na suscetibilidade das plantas às doenças (Brown et al., 1984; Burnell, 1988). Já em plantas com níveis elevados de Mn, ocorre oxidação desse elemento, bem como de compostos fenólicos (Fecht-Christoffers et al., 2003). Isso pode afetar a rota do ácido chiquímico, resultando em menor produção de lignina na planta. No presente estudo, a área abaixo da curva do progresso da mancha-parda apresentou comportamento semelhante ao verificado para a severidade final já que se tratam de variáveis interdependentes (Figura 18).

Houve aumento dos teores de Mn com o aumento das doses de Mn na ausência de Si. Na presença de Si, o comportamento para esta variável foi hiperbólico, com os teores obtidos considerados adequados nas três doses. Na ausência de Si, na dose de $10 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Mn, constatou-se níveis de Mn considerados tóxicos para o arroz (Fageria, 1984) e isso pode estar associado com o aumento na severidade da mancha-parda. A classificação dos níveis dos nutrientes nas plantas, considerados deficientes, adequados e excessivos, são

determinados de acordo com a o crescimento e a produção da planta. Assim, para a produção de matéria seca, os teores foliares de Mn encontravam-se adequados, porém em níveis insuficientes para uma produção eficiente de lignina. O Si proporcionou teores foliares de Mn considerados adequados ao arroz (Fageria, 1984), em todas as doses de Mn adicionadas à solução nutritiva, com teores variando de 96,5 a 597,5 mg kg⁻¹ de Mn. Os teores foliares de Si não foram influenciados pelas doses de Mn, na ausência ou na presença deste elemento na solução nutritiva (Figura 18), como já discutido no item 4.1.

4.4. Experimento 4. Acúmulo foliar de compostos fenólicos solúveis totais (CFST) e lignina em folhas de arroz.

Após a inoculação do arroz com *B. oryzae*, houve aumento significativo no acúmulo foliar de lignina e nenhum efeito no acúmulo foliar de CFST. O suprimento de Si às plantas proporcionou maior acúmulo foliar de lignina, tanto em plantas inoculadas, quanto em plantas não inoculadas, e maior acúmulo foliar de CFST apenas nas plantas inoculadas (Quadro 7).

A lignina e os CFST estão associados às barreiras físicas e químicas que dificultam a penetração e a colonização pelos patógenos (Pascholati & Leite 2005). Como fazem parte da constituição da planta, CFST e lignina também são formados em ausência de infecção. Como pode ser notado no Quadro 7, plantas crescendo na presença de Si mostraram maior acúmulo de lignina que aquelas privadas deste elemento. Nicholson & Hammerschmidt (1992) afirmam que nestas condições são considerados compostos de resistência pré-formados e se o aumento de sua produção ocorrer após o início do processo infeccioso, são considerados pós-formados. Assim, pode-se dizer que, no presente experimento, além de aumentar a produção de lignina pré-formada, o Si ainda estimulou a produção de lignina e CFST após a infecção, conferindo ao arroz resistência à macha parda. Pode-se inferir, por estes resultados, que o maior período de incubação, menor número de lesões e menor severidade da mancha-parda obtidos com o fornecimento do Si às plantas de arroz (item 4.3), podem ser explicados

pela maior produção de lignina e CFST, o que possivelmente dificultou a colonização das células do tecido foliar pelo fungo. Segundo Nicholson & Hammerschmidt (1992), a lignina dificulta a penetração do fungo por ser formada de polímeros fenólicos resistentes à degradação enzimática.

Quadro 7. Acúmulo ($\mu\text{g vaso}^{-1}$) de compostos fenólicos solúveis totais (AcCFST) e lignina (AcLIG) nas folhas de arroz inoculadas (+I) e não inoculadas (-I) com o fungo *Bipolaris oryzae* e cultivadas na presença ou na ausência de Si na solução nutritiva.

Plantas	Silício (mmol L^{-1})	AcCFST	AcLIG
Não inoculadas	0	1808,47 a ¹	3027,27 b
	2	2143,58 a	4606,38 a
	Média	1976,02 B	3816,82 B
Inoculadas	0	2431,19 b	3538,94 b
	2	2916,67 a	5261,57 a
	Média	2673,93 A	4400,25 A

¹Letras minúsculas, na coluna, comparam o efeito do Si e letras maiúsculas comparam o efeito da inoculação, também na coluna, pelo Teste-F ($P < 0,05$).

Menzies et al. (1991b) verificaram que o Si promoveu maior resistência do pepineiro ao míldio pulverulento, através da produção e/ou acúmulo de compostos fenólicos próximo dos sítios de penetração das hifas do fungo nas células epidérmicas. Chérif et al. (1992a) também atribuem maior resistência do pepineiro a *Pythium ultimum* a este fato. Carver et al. (1998) afirmam que uma nutrição da planta com Si pode afetar a produção de compostos fenólicos em resposta aos processos infecciosos. Maior ou menor produção destes compostos depende da planta acumular ou não o Si. No presente trabalho, uma maior produção de CFST foi verificada somente após a ocorrência da mancha-parda.

Na ausência de Si na solução nutritiva foi verificado efeito das doses de Mn no acúmulo de CFST e lignina nas folhas de arroz. O acúmulo foliar de

CFST ajustou-se ao modelo hiperbólico e o acúmulo de lignina ajustou-se ao modelo raiz quadrático. Na presença de Si, não foi detectado efeito das doses de Mn nestas variáveis (Figura 19).

O aumento do acúmulo foliar de CFST com o aumento da dose de Mn de $0,5 \mu\text{mol L}^{-1}$ para $2,5 \mu\text{mol L}^{-1}$ foi mais evidente. A partir desta dose, até $10 \mu\text{mol L}^{-1}$, verificaram-se incrementos mais discretos. Devido à ocorrência da mancha-parda, parece ter ocorrido estímulo para a produção de CFST, uma vez que o Mn é co-fator enzimático na rota do ácido chiquímico, que produz vários compostos fenólicos envolvidos na resistência das plantas às doenças (Hammerschmidt, 1999). A participação do Mn na rota do ácido chiquímico culmina com sua ação como co-fator da enzima peroxidase, que é responsável pela polimerização de alcóois para a formação da lignina no final da rota (Burnell, 1988; Leina et al., 1996).

O acúmulo foliar de lignina apresentou comportamento bem distinto do acúmulo de CFST. Da dose de $0,5 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Mn até a dose de $2,5 \mu\text{mol L}^{-1}$ o comportamento foi semelhante, contudo com o aumento do Mn, a partir da dose intermediária, houve queda considerável no acúmulo foliar de lignina (Figura 19). Com o aumento do Mn pode ocorrer aumento na atividade de enzimas como a peroxidase e a polifenoloxidase (Morgan et al., 1976). Tal fato foi verificado por Horiguchi (1987) em arroz. A peroxidase em algumas espécies, como o arroz, pode oxidar compostos fenólicos na parede celular, se a dose de Mn for considerada excessiva (Wissemeier & Horst, 1992). Assim, pode ter ocorrido a oxidação de compostos fenólicos, desencadeando algum desequilíbrio na rota do ácido chiquímico, reduzindo os teores destes compostos e por conseguinte os de lignina.

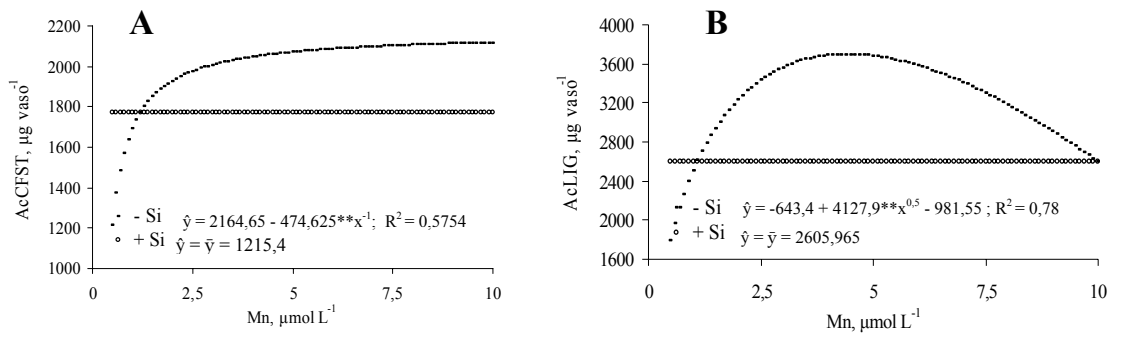


Figura 19. Acúmulo foliar de compostos fenólicos solúveis totais (A) e lignina (B) em plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com diferentes doses de Mn, na presença ou na ausência de Si e inoculadas com o fungo *Bipolaris oryzae*.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do presente trabalho mostram que o Si foi absorvido em quantidades superiores a todos os macronutrientes e sua absorção resultou em vários benefícios à cultura do arroz. Isso, aliado aos dados disponíveis na literatura, indica que a inserção do Si em programas regulares de adubação do arroz, principalmente em solos deficientes neste elemento, deve ser uma ação a ser considerada tanto para aumentar a produtividade quanto para repor a extração deste elemento pela plantas. Adicionalmente, na cultura do arroz, o Si pode reduzir ou eliminar a aplicação de fungicidas, reduzindo custos e possíveis contaminações do meio ambiente.

Estudos em condições de campo devem ser realizados para que se encontrem as melhores formas, épocas, fontes e doses a serem recomendadas para a adubação silicatada para a cultura do arroz.

A inserção da fertilização da cultura do arroz com Si deve ser considerada dentro de um programa de manejo integrado do controle da mancha-parda, principalmente em solos onde os teores de Mn se encontrem em níveis considerados tanto deficientes quanto elevados.

6. CONCLUSÕES

1) O arroz respondeu positivamente à aplicação do Si e Mn, tanto na produção como na melhoria da arquitetura da planta;

2) O Si interagiu negativamente com o Ca, altos teores de Si reduziram a absorção de Ca pelas plantas;

3) Existe uma interação entre Si e Mn na nutrição do arroz. Em condições de deficiência ou toxidez de Mn, os possíveis efeitos deletérios advindos destas situações são anulados na presença do Si.

4) O Si modificou a anatomia foliar do arroz, tornando sua epiderme mais espessa;

5) O Si aumentou a produção de lignina e compostos fenólicos solúveis totais em plantas inoculadas e lignina em plantas não-inoculadas.

6) O Si aumentou a resistência do arroz à mancha-parda.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, C.A.; NOVAIS, R.F.; RAIJ, B. van & RIBEIRO, A.C. Comparação de métodos para avaliar a disponibilidade do manganês em solos. R. Bras. Ci. Solo, 18:81-90, 1994.
- ADATIA, M.H. & BESFORD, R.T. The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. Ann.Bot., 58:343-351, 1986.
- AGARIE, S.; HANAOKA, N.; UENO, O.; MIYAZAKI, A.; KUBOTA, F.; AGATA, W. & KAUFMAN, P.B. Effects of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa* L.), monitored by electrolyte leakage. Plant Prod. Sci., 1:96-103, 1998.
- AGUILAR, M.A.G. Influência do manganês sobre aspectos bioquímicos e fisiológicos da tolerância do cacau (*Theobroma cacao* L.) à vassoura-de-bruxa (*Crinipellis pernicioso* (Stahel) Singer). Viçosa, Universidade Federal de Viçosa 1999. 181. (Tese de Doutorado).
- AHMAD R.; ZAHEER, S.H. & ISMAIL, S. Role of silicon in salt tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.). Plant Sci., 85:43-50, 1992.
- AL-AGHABARY, K; ZHU, Z; SHI, Q. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme

- activities in tomato plants under salt stress. *J. Plant. Nutr.*, 12:2101-2115, 2004.
- ALUKO, M.O. Crop losses caused by the brown leaf spot disease of rice in Nigeria. *Pl. Dis. Rep.*, 59: 609-613, 1975.
- ALVAREZ, J.; DATNOFF, L.E. The economic potential of silicon for integrated management and sustainable rice production. *Crop. Prot.*, 20:43-48, 2001.
- ALVES DE BRITO, C.J.F. Organização estrutural e degradação *in vitro* de tecidos em *Pennisetum purpureum* Schum. (Poaceae). Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 1997. 119p. (Tese de Mestrado).
- AMARAL, R.E.M. & RIBEIRO, A.S. Informe sobre as doenças do arroz no Brasil. In: 2º Reunião do comitê de arroz para as Américas, (Resumos). 1972. p. 133-147
- AMARAL, H.M. Testes de sanidade de sementes de arroz. In: SOAVE, J. & WETZEL, M.M.V.S. (Eds.) Patologia de sementes. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p.358-370.
- ANDERSON, J.M. & PYLIOTIS, N.A. Studies with manganese-deficient spinach chloroplasts. *Biochim. Biophys. Acta*, 189:280-293, 1969.
- ARTIGIANI FILHO, V.H. & BEDENDO, I.P. Patogenicidade de *Helminthosporium oryzae* a algumas espécies de gramíneas. *Sci. agric.*, 52:132-134, 1995.
- ARTIGIANI FILHO, V.H. & BEDENDO, I.P. Variabilidade de *Helminthosporium oryzae* detectada através de ocorrência de setores na colônia, sensibilidade a fungicidas e crescimento em diferentes meios de cultura e temperaturas de incubação. *Summa Phytopathol.*, 22:132-134, 1996.

- ASSIS, M.P.; CARVALHO, J.G.; CURI, N.; BERTONI, J.C.; & ANDRADE, W.E.B. Limitações nutricionais para a cultura do arroz em solos orgânicos sob inundação. I. Crescimento. Ciênc. agrotec., 24:87-95. 2000.
- AZAMBUJA, I.H.V.; VERNETTI JR. F.J. & MAGALHÃES JR., A.M. Aspectos socioeconômicos da produção de arroz. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A.M. de (Ed). Arroz irrigado no sul do Brasil. Brasília, DF: Embrapa, 2004. p.23-44.
- AZEVEDO, J.J. Variabilidade em fungos patogênicos. Summa Phytopathol., 2:3-15. 1976.
- BABA, I. & TAKAHASHI, Y. Growth and susceptibility to *Helminthosporium* leaf spot disease of rice plants grown in different soils under different water temperature. J. Agric. Meteorol., 13:41-44, 1957.
- BALASTRA, M.L.F.; PEREZ, C.M.; JULIANO, B.O. & VILLREAL, P. Effects of sílica level on some properties of *Oriza sativa* straw and hult. Can. J. Botany, 67:2356-2363, 1989.
- BARBER, D.A. & SHONE, M.G.T. The absorption of silica from aqueous solutions by plants. J. Exp. Bot., 17:569-578. 1966.
- BARBER, M.S. & RIDE, J.P. A quantitative assay for induced lignification in wounded wheat and its use to survey potential elicitors of the response. Physiol. Mol. Plant Pathol., 32: 185-197, 1988.
- BASILE-DOELSCH, I.; MEUNIER, J.D. & PARRONM, C. Another continental pool in the terrestrial silicon cycle. Nature, 433:399-402, 2005.
- BAYER, T.M., CERBARO, L., GULART, C., LENZ, G. & COSTA, I.F.D. Frequência de patógenos identificados em sementes de arroz (*Oryzae sativa*) no ano de 2004, na clínica fitossanitária. Anais, 4º Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, Santa Maria. 2005. p. 520-521.

- BARBER, M.S. & RIDE, J.P. A quantitative assay for induced lignification in wounded wheat and its use to survey potential elicitors of the response. *Physiol. Mol. Plant. Pathol.*, 32: 185-197, 1988.
- BEDENDO, I. P. & PRABHU, A.S. Doenças do arroz. In: KIMATI, K.; AMORIM, L.; BERGAMIN FILHO, A.; CAMARGO, L.E.; REZENDE, J.A.. (Org.). *Manual de Fitopatologia*. IV ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 2005, v. 2, p. 79-90.
- BEDENDO, I.P. & PRABHU, A.S. Reação de algumas gramíneas a *Helminthosporium oryzae*, agente causal da mancha-parda do arroz. *Summa Phytopatol.*, 7:34-38, 1981.
- BÉLANGER, R. R.; BOWEN, P. A.; EHRET, D.L. & MENZIES, J.G. Soluble silicon, its role in the crop and disease management of greenhouse crops. *Plant Dis.*, 74:329-336, 1995.
- BÉLANGER, R.R.; BENHAMOU, N.; MENZIES, J.G. Cytological evidence of an active role of silicon in wheat resistance to powdery mildew (*Blumeria graminis* f. sp. *tritici*). *Phytopathol.*, 93:402-12, 2003.
- BERGAMIN FILHO, A.; KIMATI, H. Importância das doenças de plantas. In: BERGAMIN FILHO, A.; KIMATI, H.; AMORIM, L. (Eds.). *Manual de fitopatologia: princípios e conceitos*. 3. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1995. v.1, p.13-33.
- BERNI, R.F. Efeito da cinza da casca do arroz no controle da brusone nas folhas do arroz, *Pesq. Agropec. Trop.*, 31:71-78, 2001.
- BIRCHALL, J.D. The essentiality of silicon in biology. *Chem. Soc. Rev.*, v.24, p.351-357, 1995.
- BLACKMAN, E. Observations on the development of the silica cells of the leaf sheath of wheat (*Triticum aestivum*). *Can. J. Botany*, 47: 827-838, 1969.

- BONELLO P., PEARCE, R.B., WATT, F. & GRIME, G.W. An induced papilla response in primary roots of scots pine challenged *in vitro* with *Cylindrocarpon destructans*. *Physiol. Molec. Plant. Pathol.*, 39:213-228, 1991.
- BOWEN, P., MENZIES, J. & EHRET, D. Soluble silicon spray inhibit powdery mildew development on grape leaves. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 117:906-912. 1992.
- BRIGNANI NETO, LASCA, C.C.; AMARAL, R.E.M.; LEITE, Y.R.; OLIVEIRA, D.A. Tratamento de sementes de arroz com fungicidas visando diminuir a disseminação de patógenos. In: REUNIÃO DE TÉCNICOS EM RIZICULTURA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1., Campinas, CATI, 1979. p. 125-31.
- BROUGHAM, R.M. Effects of intensity of defoliation on regrowth of pastures. *Aust. J. Agr. Res.*, 7: 377-387, 1956.
- BROWN, P.H.; GRAHAM, R.D. & NICHOLAS, J.D. The effects of manganese and nitrate supply on the levels of phenolics and lignin in young wheat plants. *Plant Soil*, 81:437-440, 1984.
- BURNELL, J. N. The biochemistry of manganese in plants. In: GRAHAM, R.D.; HANNAM, R.J. & UREN, N.C. (Ed.). *Manganese in soils and plants*. Dordrecht: Kluwer Academic, 1988. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 1988. p. 125-137.
- CAMPBELL, L.C. & NABLE, R.O. Physiological functions of manganese in plants. In: GRAHAM, R.D.; HANNAM, R.J. & UREN, N.C. (Ed.). *Manganese in soils and plants*. Dordrecht: Kluwer Academic, 1988. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 1988. p.139-154.
- CARVALHO, J.C. Análise de crescimento e produção de grãos da cultura do arroz irrigado por aspersão em função da aplicação de escórias de siderurgia

como fonte de silício. Botucatu, Universidade Estadual Paulista 2000. 119p. (Tese de Mestrado).

CARVER, T.L.W., ZEYEN, R.J. & AHLSTRAND, G.G. The relationship between insoluble silicon and success or failure of attempted primary penetration by powdery mildew (*Erysiphe graminis*) germinating on barley. *Physiol. Molec. Plant. Pathol.*, 31:133-148. 1987.

CASEY, W.H.; KINRADE, S.D.; KNIGHT, C.T.G; RAINS, D.W. & EPSTEIN, E. Aqueous silicate complexes in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant. Cell. Environ.*, 27: 51-54, 2003.

CASTAÑO, J. & KLAP, J. Etiology of grain discoloration in upland rice at west Sumatra, Indonesia, Padang, Indonesia, Sukarami Agricultural Research Institute for Food Crops. 1990, 11 p.

CHANDRA, S. & MONDY, N. Effect of potato virus X on the mineral content of potato tubers. *J. Agric. Food. Chem.*, 81:811-814, 1981.

CHANG, S.J., TZENG, D.D.S. & LI, C.C. Effect of silicon nutrient on bacterial blight resistance of rice (*Oryza sativa* L.). Second Silicon in Agriculture Conference, Kyoto, Japan. 2002.

CHAPIN, F.S. The mineral nutrition of wild plants. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 11: 261-285, 1980.

CHÉRIF, M., ASSELIN, A. & BÉLANGER, R.R. Defense responses induced by soluble silicon in cucumber roots infected by *Pythium* spp. *Phytopathol.*, 84:236-242. 1994.

CHÉRIF, M., BENHAMOU, N., MENZIES, J.G. & BÉLANGER, R.R. Silicon-induced resistance in cucumber plants against *Pythium ultimum*. *Physiol. Molec. Plant. Pathol.*, 41:411-425. 1992a.

- CHÉRIF, M.; MENZIES, J.G.; BENHAMOU, N. & BÉLANGER, R.R. Studies of silicon distribution in wounded and *Pythium ultimum* infected cucumber plants. *Physiol. Molec. Plant. Pathol.*, 41:371-383, 1992b.
- CHÉRIF, M.; MENZIES, J.G.; EHHRET, D.L.; BOGDANOFF, C. & BÉLANGER, R.R. Yield of cucumber infected with *Pythium aphanidermatum* when grown with soluble silicon. *HortScience*, 29:896-897, 1994b.
- CLARKSON, D.T. The uptake and translocation of manganese by plant roots. In: GRAHAM, R.D.; HANNAM, R.J. & UREN, N.C. (Ed.). *Manganese in soils and plants*. Dordrecht: Kluwer Academic, 1988. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 1988. p.101-111.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Safras, 2004. Disponível em <<http://www.conab.gov.br/download/indicadores/>>. Acesso em: 10 dez. 2005.
- CORREA-VICTORIA, F.; DATNOFF, L.E.; WINSLOW, M.D.; OKADA, K.; FRIESEN, D.K.; SANZ, J.I.; SNYDER, G.H. Deficiência de silica em arroz de sequeiro em solos de savana altamente degradados da Colômbia. II. Doenças e qualidade de grão. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE ARROZ PARA A AMERICA LATINA E O CARIBE. Goiânia, 1994. *Arroz na América Latina: perspectivas para o incremento da produção e do potencial produtivo*. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1996. v.2, p.161. (EMBRAPA-CNPAP. Documentos, 62).
- CORREA-VICTORIA, F.J. Principales Enfermedades del Arroz. En: MIP en arroz: manejo integrado de plagas, artrópodos, enfermedades y malezas. PANTOJA, A.; FISCHER, A.; CORREA-VICTORIA, F.; SANINT, L.R. & RAMÍREZ, Y.A. Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT, Cali, Colombia. 1999. p 123-140.

- DATH, A.P. & CHAKRABARTI, N.K. Wild rice species, the alternative hosts of *Helminthosporium oryzae*. *Sci. Cult.*, 39:394-397, 1973.
- DATNOFF, L.E., DEREN, C.W.; SNYDER, G.H. Silicon fertilization for disease management of rice in Florida. *Crop Prot.*, 16:525-531, 1997.
- DATNOFF, L.E., RAID, R.N.; SNYDER, G.H. & JONES, D.B. Effect of calcium silicate on blast and brown spot intensities and yields of rice. *Plant Dis.*, 75:729-732, 1991.
- DATNOFF, L.E.; RAID, R.N.; SNYDER, G.H. & JONES, D.B. Evaluation of calcium silicate slag and nitrogen on brown spot, neck rot, and sheat blight development on rice. *Biol. Cult. Tests Control Plant Dis.*, 5:65, 1990.
- DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H. & DEREN, C.W. Influence of silicon fertilizer grades on blast and brown spot development and on rice yields. *Plant Dis.*, 76:1182-1184, 1992.
- DEREN, C.W.; DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H. & MARTIN, F.G. Silicon concentration, disease response, and yield components of rice genotypes grown on flooded organic histosols. *Crop Sci.*, 34:733-737, 1994.
- DERRY, L.A.; KURTZ, A.C.; ZIEGLER, K. & CHADWICK, O.A. Biological control of terrestrial silica cycling and export fluxes to watersheds. *Nature*, 433:728-731, 2005.
- DOBERMANN, A, & FAIRHURST T. Rice nutrient disorders & nutrient management. Handbook series. Potash & Phosphate Institute (PPI), Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Rice Research Institute, 2000. 191p.
- DODDS, D.M.; HICKMAN, M.V. & HUBER, D.M. Micronutrient uptake by isogenic glyphosate tolerant and normal corn. *Weed Sci. Soc. America Abst*, 42:2., 2002.

- EBEID, M.M.; KUTACEK, M. The effect of manganese and EDTA on the balance of nitrogen in maize xylem. *Biol. Plant.*, 21:170-177, 1979.
- EDWARDS, D.G. & ASHER, C.J. Tolerance of crop and pasture species to manganese toxicity. In: SCAIFE (Ed.), *Proceedings of the ninth plant nutrition colloquium*, Warwick, England. Commonwealth Agricultural Bureau, Farnham Royal, Bucks, 1982, p.140-150.
- ELAWAD, S.H. & GREEN JR, V.E. Silicon and the rice plant environment: A review of recent research. *Il Riso*, Milano, v.28, p.235-253, 1979.
- EL-JAOUAL, T.; COX, D.A. Manganese toxicity in plants. *J. Plant Nut.*, 21:353-386, 1998.
- EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária de Clima Temperado (Pelotas,RS). *Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil*. Pelotas: 1993. 87p. (EMBRAPA-CPACT. Documentos, 3).
- EPSTEIN, E. & BLOOM, A.J. *Mineral nutrition of plants: principles and perspectives*. Sunderland: Sinauer Associates, 2005. 400p.
- FAGERIA, N.K. *Adubação e nutrição mineral da cultura de arroz*. Rio de Janeiro: Campus:Embrapa, 1984. 341p.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. *FAO, Faostat Database*, 2004. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>> Acesso em: 20 dez. 2004.
- FARIA, R.J. *Influência do silicato de cálcio na tolerância do arroz de sequeiro ao déficit hídrico do solo*. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2000. 47p. (Tese de Mestrado).
- FAWE, A.; ABOU, Z.M, MENZIES, J.G. & BÉLANGER, R.R. Silicon-mediated accumulation of flavonoid phytoalexins in cucumber. *Phytopathol.*, 88:396-401, 1998.

- FAZLI, S.F.I. & SCHROEDER, H.W. Effect of kernel infection of rice by *Helminthosporium oryzae* on yield and quality. *Phytopathol.*, 56:1003-1005. 1966.
- FEAKIN, S. Pest control in rice 2. London: Centre for Overseas Pest Research, 1976. 295 p. (PANS. Manual, 3).
- FECHE-CHRISTOFFERS, M.M.; MAIER, P. & HORST, W.J. Apoplastic peroxidase and ascorbate are involved in manganese toxicity and tolerance of *Vigna unguiculata*. *Physiol Plant*, 117: 237-244, 2003.
- FERNANDEZ, M.R. & HEAT, M.C. Interaction of the nonhost french bean plant (*Phaseolus vulgaris*) with parasitic and saprophytic fungi. III. Cytologically detectable responses. *Can. J. Botany*, 67:676-686, 1989.
- FOY, C.D. Manganese and plants. In: FOY, C.D. Manganese: Washington, National Academy of Sciences, 1973. p.51-76.
- FOY, C.D. Physiological effects of hydrogen, aluminum and manganese toxicities in acid soil. In: ADAMS, F. (Ed.). Soil acidity and liming 2.ed. Madison, Soil Science Society of America, 1984. p.57-97.
- FOY, C.D. Plant adaptation to acid, aluminum-toxic soils. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 19:959-987, 1988.
- FOY, C.D.; CHANEY, R.L. & WHITE, M.C. The physiology of metal toxicity in plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 29:511-566, 1978.
- GANGOPADHYAY, S. & CHATOPADHYAY, S.B. Total silica and brown spot disease development of rice under varying levels of nitrogen. *Current Science*, 44:91-94, 1974a.
- GANGOPADHYAY, S. & CHATTOPADHYAY, S.B. Correlation between leaf angle and incidence of brown spot disease of rice incited by *Helminthosporium oryzae*. *Indian J. Mycol. Plant Pathol.*, 4 :34-39, 1974b.

- GILKES, R.J & MCKENZIE, R.M. Geochemistry and mineralogy of manganese in soils. GRAHAM, R.D.; HANNAM, R.J. & UREN, N.C. (Ed.). Manganese in soils and plants. Dordrecht: Kluwer Academic, 1988. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, the Netherlands, 1988. p.23-25.
- GONG, H.; ZHU, X.; CHEN, K.; WANG, S. & ZHANG, C. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Science*, 169:313-321, 2005.
- GRAHAM, R.D. & WEBB, M.J. Micronutrients and disease resistance and tolerance in plants. p. 329-370. In: MORTVEDT, J.J; COX, F.R.; SHUMAN, L.M.; WELCH, R.M. (Eds.) *Micronutrients in Agriculture*. 2nd edition. Soil Science Society of America, 1991.
- GROTHGE-LIMA, M.T. Interrelação cancro da haste (*Diaporthe phaseolorum* f. sp. *meridionalis*), nodulação (*Bradyrhizobium japonicum*) e silício em soja [*Glycine max* (L.) Merrill]. Piracicaba, 1998. 58p. Tese (Doutorado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo.
- GUNES, A.; INAL, A.; BAGCI, E.G. & PILBEAM, D.J. Silicon-mediated changes of some physiological and enzymatic parameters symptomatic for oxidative stress in spinach and tomato grown in sodic-B toxic soil. *Plant Soil*, 290:103-114, 2007.
- GUNATILLEKE, C.V.S.; GUNATILLEKE, I.A.U.N.; PERERA, G.A.D.; BURSLEN, D.F.R.P.; ASHTON, P.M.S. & ASHTON, P.S. Responses to nutrient addition among seedlings of eight closely related species of *Shorea* in Sri Lanka. *J. Ecol.*, 85:301-311, 1997.
- HAMMERSCHMIDT, R. Phytoalexins: what have we learned after 60 years?. *Ann. Rev. Phytopathol*, 37:285-306, 1999.

- HAMMERSCHMIDT, R. & KUC, J. Lignification as a mechanism for induced systemic resistance in cucumber. *Physiology Plant Pathology*, 20:61-71, 1982.
- HANNAM, R.J. & OHKI, K. Detection of manganese deficiency and toxicity in plants. In: GRAHAM, R.D.; HANNAM, R.J. & UREN, N.C. (Ed.). *Manganese in soils and plants*. Dordrecht: Kluwer Academic, 1988. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 1988. p.243-260.
- HARISH, S.; SARAVANAN, T.; RADJACOMMARE, R.; EBENEZAR, E.G. & SEETHARAMAN, K. Mycotoxic effect of seed extracts against *Helminthosporium oryzae* Breda de Hann, the incitant of rice brown spot. *J. Biol. Sci.*, 4:366-369. 2004.
- HECKMAN, J.R.; CLARKE, B.B. & MURPHY, J.A. Optimizing manganese fertilization for the suppression of take-all patch disease on creeping bentgrass. *Crop. Sci.*, 43:1395-1398, 2003.
- HILL, W.J.; HECKMAN, J.R.; CLARKE, B.B. & MURPHY, J.A. Take-all patch suppression in creeping bentgrass with manganese and copper. *Hortscience*, 34:891-892, 1999.
- HODSON, M.J. & SANGSTER, A.G. The interaction between silicon and aluminium in *Sorghum bicolor* (L.) Moench: Growth analysis and x-ray microanalysis. *Ann. Bot.*, 72:389-400, 1998.
- HOSSAIN, M.T.; MORI, R.; SOGA, K.; WAKABAYASHI, K.; KAMISAKA, S.; FUJII, S.; YAMAMOTO, R. & HOSON, T. Growth promotion and an increase in cell wall extensibility by silicon in rice and some other Poaceae seedlings. *J Plant Res*, 115: 23-27, 2002.
- HORIGUCHI, T. Mechanism of manganese toxicity and tolerance of plants II. Deposition of oxidized manganese in plant tissues. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 33:595-606, 1987.

- HORIGUCHI, T. Mechanism of manganese toxicity and tolerance of plants. IV. Effects of silicon on alleviation of manganese toxicity of rice plants. *Soil Sci. Plant Nutr.* 34:65-73, 1988.
- HORST, W.J. The physiology of manganese toxicity. In: GRAHAM, R.D.; HANNAM, R.J. & UREN, N.C. (Eds.). *Manganese in soils and plants*. Dordrecht: Kluwer Academic, 1988. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, the Netherlands, 1988. p.175-188.
- HUBER, D.M. & KEELER, R.R. Alteration of wheat peptidase activity after infection with powdery mildew. *Proc. Am. Phytopathol. Soc.*, 4:163, 1977.
- HUBER, D.M. & WILHELM, N.S. The role of manganese in resistance to plant disease. In: GRAHAM, R.D.; HANNAM, R.J. & UREN, N.C. (Eds.). *Manganese in soils and plants*. Dordrecht: Kluwer Academic, 1988. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 1988. p.155-173.
- HUBER, D.M. The influence of mineral nutrition on vegetable diseases. *Hort. Bras.*, 12:206-214, 1994.
- HUBER, D.M. The use of fertilizers and organic amendments in the control of plant disease. In: PIMENTAL, D. (Ed.). *Handbook of pest management in agriculture* (2nd ed.), CRC Press, Boca Raton, FL. 1991, p.405-494.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola, 2005. <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/lspa/default.shtm>. Acesso em 16 nov. 2005.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa de orçamentos familiares, 2003. <http://www.ibge.gov.br/home/>. Acesso em 17 dez. 2005.
- INANAGA, S.; OKASAKA, A. & TANAKA, S. Does silicon exist in association with organic compounds in rice plant? *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.* 11:111-117, 1995.

- IRGA, Instituto Riograndense do Arroz. Arroz RS - O programa da produtividade, 2004. Acesso em 20 de agosto de 2005. Online. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/arrozrs.htm>.
- IRRI. Disease resistance. In: IRRI Annual Report For 1981. Los Banos, Philippines: International Rice Research Institute. 1981. p.36-53.
- IRRI. Disease resistance. In: IRRI Annual Report For 1984. Los Banos, Philippines: International Rice Research Institute. 1984. p.46-64
- IRRI Standard Evaluation System for Rice, 4th Edition. IRRI, Los Baños, Philippines. 1996.
- ISHIGURO, K. Review of research in Japan on the roles of silicon in conferring resistance against rice blast. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H. & KORNDÖRFER, G.H. (Eds.). Silicon in Agriculture. The Netherlands: Elsevier Science, 2001. p.277-291.
- IWASAKI, K; MAIER, P; FECHT, M. & HORST, W.J. Influence of the apoplastic silicon concentration on the manganese tolerance of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). J. Plant. Physiol., 159:167-173, 2002.
- JONES, L.H.P. & K.A. HANDRECK. Silica in soils, plants, and animals. Adv. Agron., 19:107-149. 1967.
- JUO, A.S.R. & SANCHEZ, P.A. Soil nutritional aspects with a view to characterize upland rice environment. In: International Rice Research Institute. "Upland Rice Research", Los Banos, Laguna, Philippines. 1986. pp.81-95.
- KABATA-PENDIAS, A. & PENDIAS, H. Trace elements in soils and plants. Boca Raton: CRC Press, 1985. 315p.

- KANTO, T ; MIYOSHI, A ; OGAWA, T ; MAEKAWA, K & AINO, M.
Suppressive effect of potassium silicate on powder mildew of strawberry in hydroponics. *J. Gen. Plant Pathol.*, 70:207-211, 2004.
- KEULEN, H. Plant data. In: Van KEULEN, H. & WOLF, J. (eds.), *Modelling of agricultural production: weather, soils and crops*. Wageningen: Centre for Agricultural Publications and Documentation, 1986. 480 p., p. 246.
- KIM, S.G.; KIM, K.W.; PARK, E.W & CHOI, D. Silicon-induced cell wall fortification of rice leaves: A possible cellular mechanism of enhanced host resistance to blast. *Phytopathol.*, 92:1095-1103, 2002.
- KNIGHT, C.T.G. & KINRADE, S.D. A primer on the aqueous chemistry of silicon. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H. & KORNDÖRFER, G.H. (Ed.). *Silicon in Agriculture*. The Netherlands: Elsevier Science, 2001. p.57-84.
- KOCHIAN, L.V. Mechanisms of uptake and translocation in plants. In: *Micronutrients in Agriculture*,. MORTVEDT, J.J.; COX, F.R.; SHUMAN, L.M.; WELCH, L.M. (Eds). Soil Sci Soc.of Am., Madison WI. p.230. 1991.
- KOGA, H.; ZEYEN, R.J.; BUSHNELL, W.R. & AHLSTRAND, G.G. Hypersensitive cell death, autofluorescence and insoluble silicon accumulation in barley leaf epidermal cells under attack by *Erysiphe graminis* f. sp. *hordei*. *Physiol. Mol. Plant. Pathol.*, 32:395-409, 1998.
- KORNDÖRFER, G. H.; COELHO, N. M.; SNYDER, G. H. & MIZUTANI, C.T. Avaliação de métodos de extração de silício para solos cultivados com arroz de sequeiro. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:101-106, 1999a.
- KORNDÖRFER, G.H.; DATNOFF, L.E. & CORRÊA, G.F. Influence of silicon on grain discoloration and upland rice grown on four savanna soils from Brazil. *J. Plant Nutr.*, 22:93-102, 1999b.

- KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, H.S. & CAMARGO, M.S. Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura. Uberlândia, GPSi/ICIAG/UFU, 2004a. 28p. (Boletim Técnico, 1).
- KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, H.S. & NOLA, A. Análise de silício: solo, planta e fertilizante. Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU, 2004b. 34p. (Boletim técnico, 2).
- KRUPINSKY, J.M., BERDAHL, J.D., SCHOCH, C.L. & ROSSMAN, A.Y. Leaf spot on switch grass (*Panicum virgatum*), symptoms of a new disease caused by *Bipolaris oryzae*. Can. J. Plant Pathol., 26:371-378. 2004.
- LEE, C.R. Interrelationships of aluminum and manganese on the potato plant. Agron. J., 64:546-549, 1972.
- LEE, K.S.; AHN, S.B.; RHEE, G.S.; YEON, B.Y. & PARK, J.K. Studies of silica application to nursery beds on rice seedling growth. Farm Prod. Utiliz. 27:23-27, 1985.
- LEE, T.S.; HSU, L.S.; WANG, C.C. & JENG, Y.H. Amelioration of soil fertility for reducing brown spot incidence in the paddy field of Taiwan. J. Agric. Res. China 30:35-49, 1981.
- LEE, T.S.; KWON, T.O. & PARK, K.H. Influence of nitrogen and silicon on the yield and the lodging related traits of paddy rice. Soil and Fertilizers, 32:15-23, 1990.
- LEINA, M., TAN, T.K. & WONG, S.M. Resistance of *Hibiscus esculentus* L. and *Vigna sinensis* (L.) Endl. to *Pseudocercospora* and plant peroxidase activity in relation to infection. Ann. Appl. Biol., 129:197-206, 1996.
- LIANG Y.; ZHANG, W.; CHEN, Q. & DING, R. Effects of silicon on H⁺-ATPase and H⁺-PPase activity, fatty acid composition and fluidity of tonoplast vesicles from roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). Env. Exp. Bot., 53:29-37, 2005.

- LIANG, Y. Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. *Plant Soil*, 209:217-224, 1999.
- LIANG, Y.; CHEN, Q.; LIU, Q., ZHANG W. & DING R. Exogenous silicon increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *J. Plant Physiol.*, 160:1157-1164, 2003.
- LIANG, Y.C.; MA, T.S.; LI, F.J. & FENG, Y.J. Silicon availability and response of rice and wheat to silicon in calcareous soils. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 25:2285-97, 1994.
- LIDON, F.C. & TEIXEIRA, M.G. Rice tolerance to excess Mn: implications in the chloroplast lamellae and synthesis of a novel Mn protein. *Plant Physiol. Biochem*, 38: 969-978, 2000.
- LONERAGAN, J.F. Distribution and movement of manganese in plants. In: GRAHAM, R.D.; HANNAM, R.J. & UREN NC, (Eds.). *Manganese in soils and plants*. Kluwer Academic Publ Netherlands, Dordrecht, 1988, p.113-124.
- LUK, E., CARROLL, M., BAKER, M. & CIZEWSKI CULOTTA, V. Manganese activation of superoxide dismutase 2 in *Saccharomyces cerevisiae* requires TM1, a member of the mitochondrial carrier family. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 100:10353-1035, 2003.
- LUX, A.; LUXOVÁ, M; HATTORI, T.; INANAGA, S.; SUGIMOTO, Y. Silicification in sorghum (*Sorghum bicolor*) cultivars with different drought tolerance. *Physiol. Plant.*, 115:87-92, 2002.
- MA, J.F; GOTO, S.; TAMAI, K. & ICHII, M. Role of root hairs and lateral roots in silicon uptake by rice. *Plant Physiol*, 127: 1773-1780, 2001A.

- MA, J.F.; MIYAKE, Y & TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H. & KORNDÖRFER, G.H. (Ed.). Silicon in Agriculture. The Netherlands: Elsevier Science, 2001b. p. 17-39.
- MA, J.F. & TAKAHASHI, E. Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. Elsevier, Amsterdam, 2002.
- MALAVOLTA, E. & FORNASIERI FILHO, D. Nutrição mineral da cultura do arroz. In: FERREIRA, M.E.; YAMADA, T. & MALAVOLTA, E. (Eds.). Cultura do arroz de sequeiro: fatores afetando a produtividade. Piracicaba: POTAFOS, 1983. p.95-140.
- MALAVOLTA, E. & KLIEMANN, H.J. Desordens nutricionais no cerrado. Piracicaba: POTAFOS, 1985. 136p.
- MALAVOLTA, E. Absorção e transporte de íons e nutrição mineral. In: FERRI, M.G. (Ed.) Fisiologia vegetal 1. São Paulo. USP. p.77-113. 1979.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. & OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações. Piracicaba, POTAFOS, 1997. 308p.
- MALAVOLTA, V.M.A. Manchas de grãos em arroz ocasionadas pelos fungos *Bipolaris oryzae*, *Microdochium oryzae* e *Phoma sorghina*: danos segundo o estágio vegetativo da planta, resistência varietal e controle químico. 1999. 65 f. Tese (Doutorado em Agronomia (Fitopatologia) - Universidade de São Paulo.
- MALAVOLTA, V.M.A. & TAKADA, H.M. Controle químico de fungos causadores de manchas de grãos em arroz. Summa Phytopathol., v.23, n.1, p.25-28, 1997.
- MALAVOLTA, V.M.A.; PARISI, J.J.D.; TAKADA, H.M. & PARISI, M.C.M. Efeito de diferentes níveis de incidência de *Bipolaris oryzae* em sementes

de arroz sobre aspectos fisiológicos, transmissão do patógeno às plântulas e produção. 2006. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2006_3/bipolaris/Index.htm>. Acesso em: 18/2/2007.

MALAVOLTA, V.M.A.; SOUZA, T.M.W & AMARAL, R.E.M. Avaliação de reações foliares de cultivares/linhagens de arroz à mancha-parda (*Bipolaris oryzae*). Summa Phytopathol., 18:118-124. 1992.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. London: Academic Press, 1995. 889p.

MARSCHNER, P.; ASCHER, J. S. & GRAHAM, R. D. Effect of manganese-reducing rhizosphere bacteria on the growth of *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* and on manganese uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.). Biol. Fert. Soils, 12:33-38, 1991.

MATICHENKOV, V.V.; BOCHARNIKOVA, E.A. & AMMOSOVA, J.A.M. The influence of silicon fertilizers on the plants and soils. Agrochemistry, 12:30-37, 2001.

MATTIELLO, E.M. Estado nutricional e aspectos fisiológicos e anatômicos em milho sob omissão de micronutrientes catiônicos. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2004. 69p. (Tese de mestrado).

MATOH T.; KAIRUSMEE, P. & TAKAHASHI, E. Salt-induced damage to rice plants and alleviation effect of silicate. Soil Sci. Plant Nutr., 32:295-304, 1986.

MAUAD, M.; GRASSI FILHO, H.; CRUSCIOL, C. A. C. & CORRÊA, J. C. Teores de silício no solo e na planta de arroz de terras altas com diferentes doses de adubação silicatada e nitrogenada. Rev. Bras. Ci. Solo, 27: 867-873, 2003.

- MAUCH-MANI, B. & SLUSARENKO, A.J. Production of salicylic acid precursors is a major function of phenylalanine ammonia-lyase in the resistance of *Arabidopsis* to *Peronospora parasitica*. *Plant Cell*, 8:203-212, 1996.
- McKEAGUE, J.A. & CLINE, M.G. Silica in soil solution. II The adsorption of monosilicic acid by soil by other substances. *Can. J. Soil Sci.*, 43:83-95, 1963.
- MELO, S.P. Silício e fósforo para estabelecimento do capim-marandu num Latossolo Vermelho-Amarelo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz., 2005. 110p. (Tese de Doutorado).
- MENZIES, J., BOWEN, P., EHRET, D. & GLASS, A.D.M. Foliar applications of potassium silicate reduce severity of powdery mildew on cucumber, muskmelon, and zucchini squash. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 117:902-905. 1992.
- MENZIES, J.G.; EHRET, D.L.; GLASS, A.D.M.; HELMER, T.; KOCH, C. & SEYWERD, F. Effects of soluble silicon on the parasitic fitness of *Sphaerotheca fuliginea* on *Cucumis sativus*. *Phytopathol.*, 81:84-88, 1991a.
- MENZIES, J.G.; EHRET, D.L.; GLASS, A.D.M. & SAMUELS, A.L. The influence of silicon on cytological interactions between *Sphaerotheca fuliginea* and *Cucumis sativus*. *Physiol. Molec. Plant. Pathol.*, 39:403-414, 1991b.
- MEW, T.W. & GONZALES, P. A handbook of rice seedborne fungi. International Rice Research Institute/Science Publishers, Inc. 2002, 83 p.
- MIYAKE, Y & TAKAHASHI, E. Effect of silicon on the growth of solution-cultured cucumber plants. *Soil. Sci. Plant. Nutr.*, 29:71-78, 1983.
- MOHAN KRISHNA, T. & BHARTI, S. Modulation, by phenolic compounds, of endogenous manganese during IAA-induced growth in *Avena* coleoptile

- segments: An electron spin resonance study. *New Phytologist*, 93:531-536, 1983.
- MOLETTI M.; GIUDICI M.L. & VILLA B. Rice Akiuchi-brown spot disease in Italy: agronomic and chemical control. *Cahiers Options Méditerranéennes*. In : Chataigner J. (Ed.). Rice diseases in the Mediterranean region and breeding for resistance: Proceedings. Montpellier: CIHEAM-IAMM, 1997. v.15, n. 3, p. 79-85.
- MOREIRA, M.A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2001. 250p
- MORGAN, P.W.; TAYLOR, D.M. & JOHAM, J.M. Manipulation of AIA oxidase activity and auxin-deficiency symptoms in intact cotton plants with manganese nutrition. *Physiol. Plant.*, 37:149-156, 1976.
- MORTLEY, D.G. Manganese toxicity and tolerance in sweet potato. *Hort. Sciences Soil. Nutrition and Fertilizer*, 28:812-81, 1993.
- MOTOMURA H.; FUJII, T. & SUZUKI, M. Distribution of silicified cells in the leaf blades of *Pleioblastus chino* (Franchet et Savatier) Makino (Bambusoideae). *Ann. Bot.*, 85: 751-757, 2000.
- MUKHOPADHYAY, M.J. & SHARMA, A. Manganese in cell metabolism of higher plants. *Bot. Rev.*, 57:117-149, 1991.
- NAKAYAMA, L.H.I.; ANDEBRHAN, T. & ALBUQUERQUE, P.S.B. Indução de resistência em *Theobroma cacao* ao *Crinipellis pernicioso*, agente causador da vassoura-de-bruxa, através do manganês, boro e interação Mn x B. In: FERTIBIO 98, 1998, Caxambú-MG, 1998. p. 527.
- NAKAYAMA, L.H.I.; BATISTA, M.M.F.; SILVA, R.C.L. & ANDEBRHAN, T. Modificações nos teores de nutrientes nos teores vegetativos de *Theobroma* spp infectados com *Crinipellis pernicioso*. In: XXXIII

Congresso Brasileiro de Fitopatologia, 2000, Belém. Fitopatologia Brasileira, suplemento, 2000.

NANDA, H.P. & GANGOPADHYAY, S. Role of silicated cells in rice leaf on brown spot disease incidence by *Bipolaris oryzae*. Int. J. Trop. Plant Dis., 2:89-98. 1984.

NELSON, R.R. & KLINE, D.M. The pathogenicity of certain species of *Helminthosporium* to species of the gramineae. Plant Dis. Rep., 45:644-648, 1961.

NERI, D.K.P.; MORAES, J.C. & GAVINO, M.A. . Interação silício com inseticida regulador de crescimento no manejo da lagarta-do-cartucho *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith, 1797) (Lepdoptera: Noctuidae) em milho. Ciência e Agrotec., 29:1167-1174, 2005.

NGUEFACK, J., LETH, V., ZOLLO, P.H.A. & MATHUR, S.B. Use of three essential oils as seed treatments against seed-borne fungi of rice (*Oryza sativa* L.) under laboratory and field conditions. Phytopathol., 94:S75. 2004

NICHOLSON, R.L. & HAMMERSCHMIDT, R. Phenolic compounds and their role in disease resistance. Ann. Rev. Phytopathol, 30:369-380, 1992.

NOGUEIRA, M.A. & CARDOSO, E.J.B.N. Interações microbianas na disponibilidade e absorção de manganês por soja. Pesq. agropec. bras., 37:1605-1612, 2002.

NORVELL, W.A. Inorganic reactions of manganese in soils. In: GRAHAM, R.D.; HANNAM, R.J. & UREN, N.C. (Eds.). Manganese in soils and plants. Dordrecht: Kluwer Academic, 1988. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 1988. p.37-58.

NYVALL, R.F. Field crop diseases handbook, 2nd ed. Van Nostrand Reinhold: New York, 1989. 817 p.

- O'BRIEN, T. P. & McCULLY, M. E. The study of plant structure principles and select methods. Termarcarphi Pty: Melbourne, 1981. 45p.
- OKUDA, A & TAKAHASHI, E. Studies on the physiological role of silicon in crop plant. Part 9. Effect of various metabolic inhibitors on the silicon uptake by rice plant. J. Sci. Soil. Manure, 33: 453-455, 1962.
- OSUNA-CANIZALEZ, F.J.; DE DATTA, S.K. & BONMAN, J.M. Nitrogen form and silicon nutrition effects on resistance to blast disease of rice. Plant Soil, 35:223-231, 1991.
- OU, S.H. Rice Diseases. 2nd Ed. Commonwealth Agricultural Bureau, Kew, England. 1985.
- PADMANABHAN, S.Y. The Great Bengal famine. Ann. Rev. Phytopathol., 11:11-26, 1973.
- PADWICK, G.W. Manual of rice diseases. Kew, Surrey, England, Commonwealth Mycological Institute. 1950. 198 p.
- PASCHOLATI, S.F. & LEITE, B. Hospedeiro: mecanismos de resistência. In: BERGAMIN FILHO, A.; KIMATI, H. & AMORIN, L. Manual de fitopatologia. São Paulo: Ceres, 1995. p.417-453.
- PEDLER, J.F.; WEBB, M.J.; BUCKHORN, S.C. & GRAHAM, R.D. Manganese-oxidizing ability of isolates of the take-all fungus is correlated with virulence. Biol. Fert. Soils, 22:272-278, 1996.
- PAVAN, M.A. & BINGHAM, F.T. Toxidez de metais em plantas. I. Caracterização de toxidez de manganês em cafeeiros. Pesq. Agrop. Bras., 16:825-821, 1981.
- PEREIRA, G.D. Manganês em cultivares de arroz de sequeiro: prognose da disponibilidade, nutrição mineral e produção. Lavras: UFLA, 1999. 111p. (Dissertação - Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).

- PERSHIN, B.M.; PERSHINA, A.N. & EGORINA, L.M. Silicon and rice production in the Primorskii region. *Agrokhimiya*, 10:68-74, 1995.
- PONNAMPERUMA, F.N. & LANTIN, R.S. Diagnoses and amelioration of nutritional disorders of rice. Los Baños: IRRI, 1985. 20p.
- POZZA, A.A.; ALVES, E.; POZZA, E.A.; CARVALHO, J.G.; MONTANARI, M.; GUIMARÃES, P.T.G. & SANTOS, D.M. Efeito do silício no controle da cercosporiose em três variedades de cafeeiro. *Fitopatol. bras.*, 29:185-188. 2004.
- PRABHU, A.S. & FILIPPI, M.C. Arroz (*Oryza sativa* L.) Controle de Doenças. In.: Controle de Doenças de Plantas: Grandes culturas. Ed.: VALE, F.X.R & ZAMBOLIN, L. Viçosa: UFV, Departamento de Fitopatologia; Brasília: Ministério da Agricultura e do Abastecimento. 1997. p. 51-79.
- PRABHU, A.S. & VIEIRA, N.R.A. Sementes de arroz infectadas por *Drechslera oryzae*: germinação, transmissão e controle. Goiânia: Embrapa CNPAF, 1989. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento).
- PRABHU, A.S., LOPES, A.D.M. & ZIMMERMANN, F.J.P. Infecção da folha e do grão de arroz por *Helminthosporium oryzae* e seus efeitos sobre os componentes de produção. *Pesq. agrop. bras.*, 15:183-189. 1980.
- PRABHU, A.S.; FILIPPI, M.C. & RIBEIRO, A.S. Doenças e seu controle. In: VIEIRA, N.R.A.; SANTOS, A.B. & SANT'ANA, E.P. A cultura do arroz no Brasil. Goiás: Embrapa - Arroz e Feijão, 1999, p.262-307.
- RAINS, D.W.; EPSTEIN, E.; ZASOSKI, R.J. & ASLAM, M. Active silicon uptake by wheat. *Plant Soil*, 280:223-228, 2006.
- RAJU, K.; MANIAN, S. & ANBUGANAPATHI, G. Effects of certain herbal extracts on the rice brown leaf spot pathogen. *J. Ecot. Env. Monit.*, 14:31-37. 2004.

- RAUSER, W.E. Structure and function of metal chelators produced by plants: the case for organic acids, amino acids, phytin, and metallothioneins. *Cell Biochem. Biophys.*, 31:19-48, 1999.
- RAVEN, J.A. The transport and function of silicon in plants. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 58:179-207, 1983.
- REISSIG, W.H.; HEINRICHS, E.A.; LITSINGER, J.A.; MOODY, K.; FIEDLER, L.; NEW, T.W. & BARRION, A.T. Illustrated guide to integrated pest management in rice in Tropical Asia. Los Baños:IRRI, 1986. 411p.
- RENGEL, Z. Root exudation and microflora populations in rizosphere of crop genotypes differing in tolerance to micronutrient deficiency. *Plant Soil*, 196:255-260, 1997.
- RENGEL, Z.; GRAHAM, R.D. & PEDLER, J.F. Manganese nutrition and accumulation of phenolics and lignin as related to differential resistance of wheat genotypes to the take all fungus. *Plant Soil*, 151:255-263, 1993.
- RODRIGUES, F.A.; DATNOFF, L.E.; KORNDÖRFER, G.H.; SEEBOLD, K.W. & RUSH, M.C. Effect of silicon and host resistance on sheath blight development in rice. *Plant Dis.*, 85:827-832, 2001.
- RODRIGUES, F.A., BENHAMOU, N., DATNOFF, L.E., JONES, J.B. & BÉLANGER, R.R. Ultrastructural and cytochemical aspects of silicon-mediated rice blast resistance. *Phytopathol.*, 93:535-546, 2003.
- RODRIGUES, F.A.; MCNALLY, D.J.; DATNOFF, L.E.; JONES, J.B.; LABBÉ, C.; BENHAMOU, N.; MENZIES, J.G. & BÉLANGER, R.R. Silicon enhances the accumulation of diterpenoid phytoalexins in rice: a potential mechanism for blast resistance. *Phytopathol.*, 94:177-183, 2004.
- RODRIGUES, F.A. & DATNOFF, L.E. Silicon and rice disease management. *Fitopat. bras.*, 30:457-470, 2005.

- ROGALLA, H. & RÖMHELD, V. Role of leaf apoplast in silicon-mediated manganese tolerance of *Cucumis sativus* L. *Plant. Cell. Environ.*, 25:549-555, 2002.
- RÖMHELD, V. Aspectos fisiológicos dos sintomas de deficiência e toxicidade de micronutrientes e elementos tóxicos em plantas superiores. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; RAIJ, B. van & ABREU, C.A. Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura. Jaboticabal: CNPq; Fapesp; Potafos, 2001. p.71-85.
- RÖMHELD, V. & MARSCHNER, H. Functions of micronutrients in plants. In: MORTVEDT, J.J. (Ed.). *Micronutrients in Agriculture*. Madison: Soil Science Society of America, 1991. p.297-328
- RUPINSKY, J.M., BERDAHL, J.D., SCHOCH, C.L. & ROSSMAN, A.Y. Leaf spot on switch grass (*Panicum virgatum*), symptoms of a new disease caused by *Bipolaris oryzae*. *Can. J. Plant Pathol.*, 26:371-378. 2004.
- SALVADOR, J.O.; MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. & CABRAL, C.P. Influência do boro e do manganês no crescimento e na composição mineral de mudas de goiabeira. *Ciênc. agrot.*, 27:325-331, 2003.
- SAMUELS, A.L.; GLASS, A.D.M.; MENZIES, J.G. & EHRET, D.L. Silicon in cell walls and papillae of *Cucumis sativus* during infection by *Sphaerotheca fuliginea*. *Physiol. Molec. Plant. Pathol.*, 44:237-42, 1994.
- SAMUELS, A.L.; GLASS, A.D.M.; EHRET, D.L. & MENZIES J.G. Distribution of silicon in cucumber leaves during infection by powdery mildew fungus (*Sphaerotheca fuliginea*). *Can. J. Botany.*, 69:140-146, 1991.
- SANTOS, G. R. ; SANTIAGO, C. M. ; MARRA, B. ; DIDONET, J. ; PELÚZIO, J. M. . Efeito da aplicação de fungicidas sobre o controle das principais doenças e produtividade do arroz irrigado e de terras altas. *Agropecuária Técnica*, 26: 44-50, 2005.

- SANTOS, G.R.; COSTA, W.M. & COSTA, H. Incidência de mancha-parda do arroz no Projeto Formoso, Estado do Tocantins. *Fitopat. bras.*, 19:299, 1994. Suplemento.
- SAVANT, N.K.; SNYDER, G.H. & DATNOFF, L.E. Silicon management and sustainable rice production. *Adv. Agron.*, 58:151-199, 1997.
- SCHICKLI, L.M. & PERCICH, J.A. Early infection events of *Bipolaris oryzae* on wild rice. *Phytopathology*, 74:884-885. 1984.
- SCHNEIDER, S. & ULLRICH, W.R. Differential induction of resistance and enhanced enzyme activities in cucumber and tobacco caused by treatment with various abiotic and biotic inducers. *Physiol. Mol. Plant Pathol.*, 45: 291-304, 1994.
- SEEBOLD, K.W.; DATNOFF, L.E.; CORREA-VICTORIA, F.J.; KUCHARREK, T.A. & SNYDER, G.H. Effect of silicon rate and host resistance on blast, scald, and yield of upland rice. *Plant Disease*, v. 84, p. 871-876, 2000.
- SEEBOLD, K.W., DATNOFF, L.E., CORREA-VICTORIA, F.J., KUCHARREK, T.A. & SNYDER, G.H. Effects of silicon and fungicides on the control of leaf and neck blast in upland rice. *Plant Disease*, 88:253-258, 2004.
- SEEBOLD, K.W.; KUCHARREK, T.A.; DATNOFF, L.E.; CORREA-VICTORIA, J.F. & MARCHETTI, M.A. The influence of silicon on components of resistance to blast in susceptible, partially resistant, and resistant cultivars of rice. *Phytopathol.*, 91:63-69, 2001.
- SERGHAT, S.; MRADMI, K.; TOUHAMI, A.O. & DOUIRA, A. Rice leaf pathogenic fungi on wheat, oat, *Echinochloa phyllopogon* and *Phragmites australis*. *Phytopathol. Medit.*, 44:44-49, 2005.

- SHANER, G. & FINNEY, R.E. The effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-mildewing resistance in knox wheat. *Phytopathol.*, 70:1183-1186, 1977.
- SHENKER, M.; PLESSNER, O.E. & TEL-OR, E. Manganese nutrition effects on tomato growth, chlorophyll concentration, and superoxide dismutase activity. *J. Plant Physiol.*, 161:197-202, 2004.
- SHERF, A.F., PAGE, R.M., TULLIS, E.C. & MORGAN, T.L. Studies on factors affecting the infectivity of *Helminthosporium oryzae*. *Phytopathol.*, 37:281-290. 1947.
- SHOEMAKER, R.A. Nomenclature of *Drechslera* and *Bipolaris*, grass parasites segregated from '*Helminthosporium*'. *Can. J. Botany*, 37: 879-887. 1959.
- SILVA, L.S.; & BOHNEN, H. Rendimento e acúmulo de nutrientes pelo arroz (*Oryza sativa*) em solução nutritiva com e sem a adição de silício. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:771-777, 2001.
- SIMOGLOU, K.B. & DORDAS, C. Effect of foliar applied boron, manganese and zinc on tan spot in winter durum wheat. *Crop Prot.*, 25:657-663, 2006.
- SNYDER, G.H.; JONES, D.B. & GASCHO, G.J. Silicon fertilization of rice on Everglades Histosols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50:1259-1263, 1986.
- SOAVE J.; PRABHU, A.S.; RICCI, M.T.D.T.; BARROS, L.G.; SOUZA, N.R.G.; CURVO, R.C.V.; FERREIRA, R.P. & SOBRAL, C.A.M. Etiologia de manchas de sementes de cultivares de arroz de sequeiro no Centro-Oeste Brasileiro. *Summa Phytopathol*, 23: 122-127, 1997.
- SOAVE, J.; PIZZINATO, M.A.; USBERTI JUNIOR, J.A.; CAMARGO, O.B.A & VILLELA, O.V. Selection of rice cultivars resistant to some pathogens using seed health testing. *Pesq. agrop. bras.*, 19:449-453, 1984.

- SOUSA, N.R.G., RIBEIRO, A.S. & GALLI, J. Variabilidade do fungo *Helminthosporium oryzae*. Pesq. agrop. bras., 19:1335-1343, 1984.
- SOUZA, N.S.; BARROS, L.G.; PRABHU, A.S. Incidência de mancha de grãos do arroz em relação à época de plantio e aplicação de fungicidas. Cuiabá: EMPAER, 1993. 19 p. (Boletim de Pesquisa, 4).
- STUMPF, P.K. & CONN, E.E. The Biochemistry of Plants - Secondary Plant Products. New York: Academic Press. 1981.
- SUZUKI, H. The influence of some environmental factors on the susceptibility of the rice plant to blast and *Helminthosporium* diseases and on the anatomical characters of the plant III. Influence of differences in soil moisture and in amounts of fertilizer and silica given. J. Coll. Agric., 13:277-331, 1935.
- SWAIN, B.N. & PRASAD, J.S. Influence of silica content in the roots of rice varieties on the resistance to root-knot nematodes. Indian J. Nemat., 18:360-361, 1988.
- TAIZ, L. & ZEIGER, E. Plant physiology. Califórnia: The Benjamin/Cummings Publishings Company, 1991. 565p.
- TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K. & HIRATA, H., (Ed.). Science of the rice plant: physiology. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, 1995. p.420-433.
- TAKAHASHI, E; MA, J.F. & MIYAKE, Y. The possibility of silicon as an essential element for higher plants. Comments Agric. Food. Chem., 2:99-122, 1990.
- TAKAHASHI, Y. Nutritional studies in the development of *Helminthosporium* leaf spot. In: Rice diseases and their control by growing resistant varieties and other measures. Proceedings of a Symposium on Tropical Agriculture

- Researches. Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council. p. 157-170. 1967.
- TAMAI, K. & MA J.F. Characterization of silicon uptake by rice roots. *New Phytol.*, 158: 431–436, 2003.
- TANAKA, A. & YOSHIDA, S. Nutritional disorders of the rice plant in Asia. Los Baños: International Rice Research Institute, 1970. 51p. (Technical Bulletin, 10).
- TAUGER, M. Entitlement, shortage, and the 1943 Bengal famine: another look. *J. Peasant Stud.*, 31:45-72, 2003.
- TERRY, N. & A. ULRICH. Photosynthetic and respiratory CO₂ exchange of sugar beet leaves as influenced by manganese deficiency. *Crop. Sci.*, 14: 502-504, 1974.
- TOLEDO, J.; ROJAS, I. & APARICIO, L. Transmisión y control de *Bipolaris oryzae*, *Gelachia oryzae* y *Alternaria padwickii* em semillas de arroz producidas en Santa Cruz, Bolivia. Resumos, 39° Congresso Brasileiro de Fitopatologia, Salvador. 2006. p. S132.
- TOMPSON, I.A. & HUBER, D.M. Manganese and plant disease. In: DATNOFF, L.E.; ELMER, W.H. & HUBER, D.M. (Org.). *Mineral Nutrition and Plant Disease: American Phytopathological Society*, 2007. 278 p (no prelo).
- TULLIS, E.C. Histological studies of rice leaves infected with *Helminthosporium oryzae*. *J. Agric. Res.*, 50:82-90. 1935.
- TUMPF, P. K. & CONN, E. E. *The Biochemistry of Plants - Secondary Plant Products*, Academic Press, New York. 1981, 798 p.

- VALARINI, P.J.; LASCA, C.C. & CHIBA, S. Eficiência de fungicidas em tratamento de sementes de arroz para o controle de *Helminthosporium oryzae*. Pesq. agropec. bras., 23:41-44, 1988.
- VALE, F.X.R.; FERNANDES FILHO, E.I. & LIBERATO, J.R. Quant - A software for plant disease severity assessment. In: 8th International Congress of Plant Pathology. Christchurch, New Zealand, 2-7 de fevereiro de 2003, p. 105. Abstract 8.18
- VAN NGUYEN, N. & FERRERO, A. Meeting the challenges of global rice production. Paddy Water Environ, 4: 1-9, 2006.
- VIDHYASEKARAN, P. Concise encyclopedia of plant pathology. Binghamton, NY: The Haworth Press, 2004.
- VELOSO, C.A.C.; MURAOKA, T.; MALAVOLTA, E. & CARVALHO, J.G. Influência do manganês sobre a nutrição mineral e crescimento da pimenteira-do-reino. Sci Agric., 52:376-383, 1995.
- VILARINHO, C.R.O. Acumulação de alumínio, cálcio e silício em espécies lenhosas do cerrado em dois solos. Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia. 2002. 53p. (Tese de Mestrado).
- WEBSTER, R.K. & GUNNEL, P.S. Compendium of rice diseases. St. Paul, Minnesota: APS Press. 62p. 1992.
- WERNER, D. & ROTH, R. Silica metabolism. In: LÄUCHLI, A & BIELESKI, R.L (Ed.). Encyclopedia of plant physiology. New Series, Berlin: Springer-Verlag, v.15b, p. 682-694, 1983.
- WILSON, J.R. Variation of leaf characteristics with level of insertion on a grass tiller. Anat. Aust. J. Agric. Res., 27:355-364, 1976.

- WISSEMEIER, A.H. & HORST, W.J. Effect of light intensity on manganese toxicity symptoms and callose formation in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). *Plant Soil*, 143:299-309, 1992.
- XIAO, J.Z.; TSUDA, M.; DOKE, N. & NISHIMURA, S. Phytotoxins produced by germinating spores of *Bipolaris oryzae*. *Phytopathol.*, 81:58-64. 1991.
- YAMAUCHI, M. & WINSLOW, M. D. Silica reduces disease on upland rice in a high rainfall area. *IRRI*. 12:622-23.1987.
- YEO, A.R.; FLOWERS, S.A.; RAO, G.; WELFARE, K.; SENANAYAKE, N. & FLOWERS T.J. Silicon reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions and this is accounted for by a reduction in the transpirational bypass flow. *Plant Cell Env.*, 22:559–565, 1999.
- YOSHIDA, S. Chemical aspects of the role of silicon in physiology of the rice plant. *Bulletin of the National Institute of Agronomic Science Serie B*, 15:1-58, 1965.
- YOSHIDA, S. *Fundamentals of rice crop science*. Los Baños: IRRI, 1981. 269p.
- ZHAO, Y.F.; LI, X.M. & HOU, Y.B. Biochemical changes in ginseng red coating root disease and comprehensive evaluation on the quality of diseased roots. *Acta Phytopathol. Sinica*, 27:175-179, 1997.
- ZHU, Z.; WEI, G.; LI, J.; QIAN, Q. & YU, J. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Sci.*, 167:527-533, 2004.
- ZIESLIN, N. & BEN-ZAKEN, R. Peroxidase activity and presence of phenolic substances in peduncles of rose flowers. *Plant Physiol. Biochem.*, 31: 333-339, 1993.

APÊNDICE

APÊNDICE

Quadro 1A. Análise de variância da massa da matéria seca de raízes (MSR), bainhas (MSB), folhas (MSF), parte aérea (MSPA), razão raiz/parte aérea (R/PA), ângulo de inserção da folha (ANG) e distância entre o ponto médio da linha que une a ponta da folha com a inserção da lâmina foliar na bainha e a face adaxial da lâmina foliar (ARC), de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com três doses de Mn, na ausência ou presença de Si.

VARIÁVEL	QMR (20 GL)	C.V.%	QMSi (1 GL)	d/Si=0 mmol L ⁻¹		d/Si=2 mmol L ⁻¹	
				QMMnl ¹ (1 GL)	QMMnQ ² (1 GL)	QMMnl (1 GL)	QMMnQ (1 GL)
MSR	0,0043	8,40	0,076**	0,1105**	0,1276**	1,90E-05 ^{ns}	1,40E-05 ^{ns}
MSB	0,0299	13,70	1,133**	0,1544*	0,3968**	0,012 ^{ns}	0,072 ^{ns}
MSF	0,0212	20,07	2,332**	0,1283*	0,5385**	0,028 ^{ns}	0,002 ^{ns}
MSPA	0,0589	12,62	6,717**	0,564**	1,8598**	0,003 ^{ns}	0,051 ^{ns}
R/PA	0,0087	21,08	0,265**	0,0103 ^{ns}	0,0797**	0,000 ^{ns}	0,002 ^{ns}
ANG	9,8630	16,47	2726,533**	50,45679*	21,9428 ^{ns}	8,314 ^{ns}	1,819 ^{ns}
ARC	0,4311	21,65	89,441**	0,867359 ^{ns}	0,00864 ^{ns}	0,530 ^{ns}	1,027 ^{ns}

¹Mnl = Efeito linear para as doses de Mn; ² Efeito quadrático para as doses de Mn
^{ns}, * e **: Não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 2A. Análise de variância do acúmulo de N (AcNR), P (AcPR), K (AcKR), Ca (AcCaR), Mg (AcMgR), Cu (AcCuR), Fe (AcFeR), Mn (AcMnR), Zn (AcZnR) e Si (AcSiR), nas raízes de arroz cultivado com três doses de Mn, na presença ou na ausência de Si na solução nutritiva.

VARIÁVEL	QMR (20 GL)	C.V.%	QMSi (1 GL)	d/Si=0 mmol L ⁻¹		d/Si=2 mmol L ⁻¹	
				QMMnl (1 GL)	QMMnQ (1 GL)	QMMnl (1 GL)	QMMnQ (1 GL)
AcNR	7,592	11,65	144,024**	68,82802**	167,646**	8,435 ^{ns}	0,256 ^{ns}
AcPR	0,275	14,67	2,859**	4,214264**	2,4793**	0,165 ^{ns}	0,498 ^{ns}
AcKR	9,600	9,82	278,483**	111,6419**	545,512**	21,509 ^{ns}	8,306 ^{ns}
AcCaR	0,046	19,33	0,734**	0,753672**	0,1333 ^{ns}	0,041 ^{ns}	0,001 ^{ns}
AcMgR	0,063	11,80	1,862**	0,693675**	1,78003**	0,0574 ^{ns}	0,002 ^{ns}
AcCuR	794,94	21,96	1,47E+04**	365,9484 ^{ns}	10463**	27,712 ^{ns}	130,317 ^{ns}
AcFeR	9385,41	13,71	9,18E+05**	8915,244 ^{ns}	120830**	2,26E+05**	8,82E+04**
AcMnR	1198,90	11,57	1,92E+05**	398543,6**	1076,31 ^{ns}	8,48E+05**	9,79E+04**
AcZnR	4,715	11,43	82,407**	50,25528**	80,5829**	10,314 ^{ns}	6,677 ^{ns}
AcSiR	0,018	20,40	5,657**	0,096169*	0,09617*	0,017 ^{ns}	0,066 ^{ns}

^{ns}, * e **: Não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 3A. Análise de variância do acúmulo de N (AcNB), P (AcPB), K (AcKB), Ca (AcCaB), Mg (AcMgB), Cu (AcCuB), Fe (AcFeB), Mn (AcMnB), Zn (AcZnB) e Si (AcSiB), nas bainhas de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com três doses de Mn, na ausência ou presença de Si.

VARIÁVEL	QMR (20 GL)	C.V.%	QMSi (1 GL)	d/Si=0 mmol L ⁻¹		d/Si=2 mmol L ⁻¹	
				QMMnl (1 GL)	QMMnQ (1 GL)	QMMnl (1 GL)	QMMnQ (1 GL)
AcNB	25,869	19,12	813,990**	259,2372**	444,925**	0,0081 ^{ns}	85,7707 ^{ns}
AcPB	1,399	22,41	6,532*	11,32468*	18,7606**	3,0614 ^{ns}	1,6211 ^{ns}
AcKB	74,085	23,17	1515,070**	320,1611 ^{ns}	1062,08**	4,5600 ^{ns}	4,1229 ^{ns}
AcCaB	0,118	1,53	0,838*	0,282599 ^{ns}	2,76058**	0,0416 ^{ns}	0,6003*
AcMgB	0,317	23,53	1,117*	0,95509 ^{ns}	6,65392**	0,0012 ^{ns}	0,0196 ^{ns}
AcCuB	16,798	25,08	147,032**	150,5095**	295,758**	2,4540 ^{ns}	42,7124 ^{ns}
AcFeB	2274,20	24,94	32061,60*	5695,157 ^{ns}	60619,5**	2,60E+03 ^{ns}	3,55E+03 ^{ns}
AcMnB	19288,65	21,89	1711,434 ^{ns}	2021101**	71384,1 ^{ns}	1,26E+06**	7,09E+05**
AcZnB	24,169	23,24	701,510*	153,3046*	208,496*	6,4748 ^{ns}	173,9416 ^{ns}
AcSiB	0,460	25,34	125,812**	0,21505	0,24006 ^{ns}	4,3579**	2,1383*

^{ns}, * e**: Não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 4A. Análise de variância do acúmulo de N (AcNF), P (AcPF), K (AcKF), Ca (AcCaF), Mg (AcMgF), Cu (AcCuF), Fe (AcFeF), Mn (AcMnF), Zn (AcZnF) e Si (AcSiF), nas folhas de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com três doses de Mn, na ausência ou presença de Si.

VARIÁVEL	QMR (20 GL)	C.V.%	QMSi (1 GL)	d/Si=0 mmol L ⁻¹		d/Si=2 mmol L ⁻¹	
				QMMnl (1 GL)	QMMnQ (1 GL)	QMMnl (1 GL)	QMMnQ (1 GL)
AcNF	58,772	14,93	4103,0740**	304,6839*	1485,8570**	70,9802 ^{ns}	18,3302 ^{ns}
AcPF	0,417	13,88	5,7208**	6,9313**	12,1610**	15,4701**	7,6065**
AcKF	23,729	14,48	2159,6700**	105,8978 ^{ns}	389,5626**	3,2306 ^{ns}	480,2534**
AcCaF	0,492	18,11	0,0527 ^{ns}	1,4798 ^{ns}	15,3647**	0,2674 ^{ns}	1,4203 ^{ns}
AcMgF	0,208	17,80	0,6123 ^{ns}	2,2796**	5,2853**	0,0430 ^{ns}	0,7805 ^{ns}
AcCuF	20,121	18,45	1462,1010**	35,7419 ^{ns}	287,8900**	1003,9900**	68,3184 ^{ns}
AcFeF	2251,90	23,14	2009,6630 ^{ns}	1,43E+04*	5,98E+04**	1,26E+04*	1,41E+03 ^{ns}
AcMnF	14335,30	13,99	3,35E+05**	6,20E+06**	1,92E+04 ^{ns}	3,05E+06**	4,04E+05**
AcZnF	18,714	18,81	1151,8360**	113,4151*	113,4151*	30,2136 ^{ns}	6,6002 ^{ns}
AcSiF	1,232	21,27	574,4883**	0,5123 ^{ns}	0,4186 ^{ns}	0,6767 ^{ns}	0,0216 ^{ns}

^{ns}, * e**: Não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 5A. Análise de variância do N (TNR), P (TPR), K (TKR), Ca (TCaR), Mg (TMgR), Cu (TCuR), Fe (TFeR), Mn (TMnR), Zn (TZnR) e Si (TSiR), nas raízes de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com três doses de Mn, na ausência ou presença de Si.

VARIÁVEL	QMR (20 GL)	C.V.%	QMSi (1 GL)	d/Si=0 mmol L ⁻¹		d/Si=2 mmol L ⁻¹	
				QMMnl (1 GL)	QMMnQ (1 GL)	QMMnl (1 GL)	QMMnQ (1 GL)
TNR	4,667	7,12	21,5053*	2,6881 ^{ns}	9,6692 ^{ns}	0,3172 ^{ns}	2,7093 ^{ns}
TPR	0,183	9,35	0,4320 ^{ns}	0,4986 ^{ns}	0,0067 ^{ns}	0,6490 ^{ns}	1,2048 ^{ns}
TKR	3,945	4,92	60,2083**	2,1705 ^{ns}	166,0616**	11,3704*	7,5614 ^{ns}
TCaR	0,039	14,04	0,4083**	0,3423**	0,0030 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	1,3316 ^{ns}
TMgR	0,057	8,76	0,7363**	0,0044 ^{ns}	0,3596*	0,0021**	13,8303 ^{ns}
TCuR	878,644	18,09	9,98E+03**	820,8200 ^{ns}	4423,6250*	156,3428 ^{ns}	0,0303 ^{ns}
TFeR	9858,730	11,03	8,18E+05**	3,70E+04 ^{ns}	9,27E+03 ^{ns}	1,23E+05**	32,574**
TMnR	497,523	6,40	2,42E+05**	5,29E+05**	13,2500 ^{ns}	1,41E+05**	2524,06**
TZnR	3,510	7,67	9,6333 ^{ns}	1,4141 ^{ns}	0,3193 ^{ns}	11,2477 ^{ns}	4,0889 ^{ns}
TSiR	0,008	11,77	5,4273**	0,0666*	1,70E-05 ^{ns}	0,0527*	5,188 ^{ns}

^{ns}, * e**: Não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 6A. Análise de variância do N (TNB), P (TPB), K (TKB), Ca (TCaB), Mg (TMgB), Cu (TCuB), Fe (TFeB), Mn (TMnB), Zn (TZnB) e Si (TSiB), nas bainhas de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com três doses de Mn, na ausência ou presença de Si.

VARIÁVEL	QMR (20 GL)	C.V.%	QMSi (1 GL)	d/Si=0 mmol L ⁻¹		d/Si=2 mmol L ⁻¹	
				QMMnl (1 GL)	QMMnQ (1 GL)	QMMnl (1 GL)	QMMnQ (1 GL)
TNB	6,888	8,48	15,9870 ^{ns}	35,6149*	12,9062 ^{ns}	9,0076 ^{ns}	0,9977 ^{ns}
TPB	0,491	10,98	21,6750**	0,8950 ^{ns}	0,0263 ^{ns}	5,3307**	5,6146**
TKB	15,093	8,99	32,0333 ^{ns}	7,6599 ^{ns}	51,5730 ^{ns}	6,4053 ^{ns}	54,6275 ^{ns}
TCaB	0,089	16,28	1,4083**	0,1333 ^{ns}	0,2440 ^{ns}	0,0944 ^{ns}	0,1029 ^{ns}
TMgB	0,079	9,57	14,2830**	0,3374 ^{ns}	0,1946 ^{ns}	0,0347 ^{ns}	0,4093*
TCuB	22,265	24,47	72,0750 ^{ns}	41,1396 ^{ns}	52,4932 ^{ns}	0,2446 ^{ns}	2,2887 ^{ns}
TFeB	1513,466	17,52	1,47E+03 ^{ns}	102,6987 ^{ns}	3,00E+04**	5,94E+03 ^{ns}	1,20E+04*
TMnB	2453,723	6,67	8,37E+05**	2,51E+06**	2,01E+04*	1,12E+06**	4,87E+05**
TZnB	4,550	8,69	0,1333 ^{ns}	10,3694 ^{ns}	0,4306 ^{ns}	15,9911 ^{ns}	35,7419*
TSiB	0,068	9,66	92,1903**	0,0093 ^{ns}	0,0221 ^{ns}	2,1554**	0,1267 ^{ns}

^{ns}, * e**: Não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 7A. Análise de variância do N (TNF), P (TPF), K (TKF), Ca (TCaF), Mg (TMgF), Cu (TCuF), Fe (TFeF), Mn (TMnF), Zn (TZnF) e Si (TSiF), nas folhas de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com três doses de Mn, na ausência ou presença de Si.

VARIÁVEL	QMR (20 GL)	C.V.%	QMSi (1 GL)	d/Si=0 mmol L ⁻¹		d/Si=2 mmol L ⁻¹	
				QMMnI (1 GL)	QMMnQ (1 GL)	QMMnI (1 GL)	QMMnQ (1 GL)
TNF	3,0804	3,60	98,2830**	0,1781 ^{ns}	3,4632 ^{ns}	0,2509 ^{ns}	4,378 ^{ns}
TPF	0,1512	8,41	17,6333**	0,8190*	0,0983 ^{ns}	12,1257**	3,382**
TKF	8,6312	9,20	7,2030 ^{ns}	8,0253 ^{ns}	30,1398 ^{ns}	9,7028 ^{ns}	249,729**
TCaF	0,0820	7,30	35,1867**	0,4942*	0,0432 ^{ns}	0,6063*	0,694*
TMgF	0,0679	10,00	17,6333**	0,1113 ^{ns}	0,0101 ^{ns}	0,1790 ^{ns}	0,445*
TCuF	3,1033	7,72	9,6333 ^{ns}	5,7064 ^{ns}	0,0269 ^{ns}	745,7393**	34,661**
TFeF	2,75E-02	4,035	277,3696**	3,94E+03**	9,34E+03**	1,12E+04**	9,23E+02**
TMnF	4111,8235	7,34	2,75E+06**	7,06E+06**	1,79E+05**	1,93E+06**	2,07E+05**
TZnF	5,7033	10,94	0,3000 ^{ns}	0,0054 ^{ns}	45,7276*	49,4157*	4,3175 ^{ns}
TSiF	0,0275	4,04	277,3696	0,1731*	0,0095 ^{ns}	0,0792 ^{ns}	0,0757 ^{ns}

^{ns}, * e **: Não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 8A. Análise de variância da espessura das faces adaxial (ADAX) e abaxial (ABAX) da epiderme de folhas de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com três doses de Mn, na ausência ou presença de Si.

VARIÁVEL	QMR (70 GL)	C.V.%	QMSi (1 GL)	d/Si=0		d/Si=2	
				QMMnI (1 GL)	QMMnQ (1 GL)	QMMnI (1 GL)	QMMnQ (1 GL)
ADAX	0,0048	12,84	0,0984**	9,58E-05 ^{ns}	5,34E-03 ^{ns}	3,10E-03 ^{ns}	4,56E-03 ^{ns}
ABAX	0,0056	15,64	0,0327*	1,14E-03 ^{ns}	6,32E-03 ^{ns}	0,689E-03 ^{ns}	0,52E-02 ^{ns}

^{ns}, * e **: Não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 9A. Análise de variância do período de incubação (PI), lesões por cm² de área foliar (LES), severidade real (SEVR), área abaixo da curva de progresso da mancha-parda (AACPMP) e severidade final da mancha-parda (SEVF) e teores foliares de Mn (TMnF+I) e Si (TSiF+I) em plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com três doses de Mn, na ausência ou presença de Si, inoculadas com o fungo *Bipolaris oryzae*.

VARIÁVEL	QMR (20 GL)	C.V.%	QMSi (1 GL)	d/Si=0 mmol L ⁻¹		d/Si=2 mmol L ⁻¹	
				QMMnI (1 GL)	QMMnQ (1 GL)	QMMnI (1 GL)	QMMnQ (1 GL)
PI	0,0417	4,03	450,6667**	0,0311 ^{ns}	69,4683**	0,0732 ^{ns}	0,0934 ^{ns}
LES	0,5871	16,03	236,2015**	60,2305**	53,1245**	0,1874 ^{ns}	0,1428 ^{ns}
SEVR	0,3681	52,54	182,0120**	1,596 ^{ns}	4,789**	0,1283 ^{ns}	0,0021 ^{ns}
AACPMP	362,3455	10,83	1,84E+05**	1,00E+04**	5961,9360**	489,1538 ^{ns}	13,3054 ^{ns}
SEVF	0,0968	6,66	117,7789**	0,0240 ^{ns}	4,5639**	0,2803 ^{ns}	0,2197 ^{ns}
TMnF+I	68391,9	33,42	2330022**	4,17E+06**	663,7500 ^{ns}	2,30E+05 ^{ns}	6,41E+05**
TSiF+I	0,1307	8,38	222,8332**	0,4110 ^{ns}	0,2745 ^{ns}	0,5231 ^{ns}	0,2195 ^{ns}

^{ns}, * e **: Não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 10A. Massa da matéria seca de raízes (MSR), bainhas (MSB), folhas (MSF), parte aérea (MSPA), razão raiz/parte aérea (R/PA), ângulo de inserção da folha (ANG) e distância entre o ponto médio da linha que une a ponta da folha com a inserção da lâmina foliar na bainha e a face adaxial da lâmina foliar (ARC), de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com três doses de Mn, na ausência ou presença de Si.

Silício mmol L ⁻¹	Mn μmol L ⁻¹	g vaso ⁻¹						
		MSR	MSB	MSF	MSPA	R/PA	ANG -- ° --	ARC -- cm --
0	0,5	0,548	0,400	0,496	0,896	0,638	31,600	4,960
	2,5	0,811	0,840	0,996	1,836	0,450	27,800	4,900
	10,0	0,819	0,762	0,858	1,620	0,520	26,400	4,420
	Média	0,726	0,667	0,783	1,450	0,536	28,600	4,760
2	0,5	0,829	0,956	1,393	2,349	0,359	10,600	1,760
	2,5	0,826	1,136	1,346	2,482	0,334	9,400	1,040
	10,00	0,825	1,076	1,284	2,360	0,351	8,600	1,120
	Média	0,827	1,056	1,341	2,397	0,348	9,533	1,307

^{ns}, * e***: Não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 11A. Acúmulo de N (AcNR), P (AcPR), K (AcKR), Ca (AcCaR), Mg (AcMgR), Cu (AcCuR), Fe (AcFeR), Mn (AcMnR), Zn (AcZnR) e Si (AcSiR), nas raízes de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com três doses de Mn, na ausência ou presença de Si.

Silício mmol L ⁻¹	Mn μmol L ⁻¹	mg vaso ⁻¹				
		AcNR	AcPR	AcKR	AcCaR	AcMgR
0	0,5	15,907	2,339	19,574	0,639	1,308
	2,5	24,979	3,574	35,383	0,975	2,240
	10,0	23,479	3,886	30,595	1,233	2,075
	Média	21,455	3,266	28,517	0,949	1,874
2	0,5	25,272	3,978	34,945	1,204	2,568
	2,5	25,325	3,592	36,146	1,249	2,446
	10,00	26,913	4,081	32,741	1,332	2,105
	Média	25,837	3,884	34,611	1,262	2,373
		μg vaso ⁻¹				AcSiR -- mg vaso ⁻¹ --
		AcCuR	AcFeR	AcMnR	AcZnR	AcSiR
0	0,5	73,700	413,659	57,314	13,177	1,16
	2,5	139,506	641,002	157,373	19,635	2,21
	10,0	105,683	539,990	442,571	19,229	3,23
	Média	106,297	531,550	219,086	17,347	2,20
2	0,5	154,913	1077,590	70,848	20,733	9,86
	2,5	147,174	833,494	381,050	21,929	11,63
	10,00	149,467	733,040	685,837	19,324	11,17
	Média	150,518	881,375	379,245	20,662	10,89

^{ns}, * e***: Não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 12A. Acúmulo de N (AcNB), P (AcPB), K (AcKB), Ca (AcCaB), Mg (AcMgB), Cu (AcCuB), Fe (AcFeB), Mn (AcMnB), Zn (AcZnB) e Si (AcSiB), nas bainhas de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com três doses de Mn, na ausência ou presença de Si.

Silício mmol L ⁻¹	Mn μmol L ⁻¹	AcNB	AcPB	AcKB	AcCaB	AcMgB	
		g vaso ⁻¹					
0	0,5	11,725	2,812	16,806	0,780	1,475	
	2,5	26,830	5,921	39,262	1,877	3,197	
	10,0	25,612	5,697	34,073	1,432	2,578	
	Média	21,389	4,810	30,047	1,363	2,416	
2	0,5	29,253	6,515	43,188	1,535	2,399	
	2,5	35,004	5,505	44,716	1,989	2,316	
	10,00	31,164	5,210	44,876	1,568	2,392	
	Média	31,807	5,744	44,260	1,697	2,369	
		AcCuB	AcFeB	AcMnB	AcZnB	AcSiR	
		μg vaso ⁻¹					-- mg vaso ⁻¹ --
0	0,5	6,455	72,928	224,864	9,370	3,82	
	2,5	18,662	235,040	569,976	19,882	7,44	
	10,0	17,262	167,560	1131,192	19,692	7,58	
	Média	14,126	158,509	642,011	16,315	6,28	
2	0,5	16,388	252,536	124,548	22,996	38,19	
	2,5	20,636	209,156	788,216	30,848	49,89	
	10,00	18,638	209,984	967,950	24,14	53,64	
	Média	18,554	223,892	626,905	25,986	47,24	

^{ns}, * e***: Não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 13A. Acúmulo de N (AcNF), P (AcPF), K (AcKF), Ca (AcCaF), Mg (AcMgF), Cu (AcCuF), Fe (AcFeF), Mn (AcMnF), Zn (AcZnF) e Si (AcSiF), nas folhas de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com três doses de Mn, na ausência ou presença de Si.

Silício mmol L ⁻¹	Mn μmol L ⁻¹	AcNF	AcPF	AcKF	AcCaF	AcMgF	
		mg vaso ⁻¹					
0	0,5	24,906	2,628	17,262	2,548	1,656	
	2,5	50,999	5,122	30,793	5,131	3,271	
	10,0	43,105	4,907	27,392	4,064	3,023	
	Média	39,670	4,219	25,149	3,914	2,650	
2	0,5	66,270	4,894	48,545	4,031	2,673	
	2,5	62,552	3,682	34,737	3,358	2,152	
	10,00	60,357	6,701	43,073	4,102	2,620	
	Média	63,060	5,092	42,118	3,830	2,482	
		AcCuF	AcFeF	AcMnF	AcZnF	AcSiF	
		μg vaso ⁻¹					-- mg vaso ⁻¹ --
0	0,5	11,244	101,108	321,000	11,850	4,92	
	2,5	22,514	267,744	721,374	19,514	9,84	
	10,0	18,232	221,902	1842,330	19,040	10,51	
	Média	17,330	196,918	961,568	16,801	8,42	
2	0,5	25,883	175,820	153,823	28,566	97,53	
	2,5	24,762	213,272	768,226	27,668	97,41	
	10,00	43,232	250,770	1328,688	31,348	92,89	
	Média	31,292	213,287	750,246	29,194	95,94	

^{ns}, * e***: Não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 14A. Teores de N (TNR), P (TPR), K (TKR), Ca (TCaR), Mg (TMgR), Cu (TCuR), Re (TFeR), Mn (TMnR), Zn (TZnR) e Si (TSiR), nas raízes de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com três doses de Mn, na ausência ou presença de Si.

Silício mmol L ⁻¹	Mn μmol L ⁻¹	TNR	TPR	TKR	TCaR	TMgR
		g kg ⁻¹				
0	0,5	29,060	4,260	35,800	1,160	2,380
	2,5	30,780	4,400	43,600	1,200	2,760
	10,0	28,700	4,700	37,500	1,500	2,540
	Média	29,513	4,453	38,967	1,287	2,560
2	0,5	30,500	4,800	42,200	1,460	3,100
	2,5	30,600	4,360	43,600	1,500	2,960
	10,00	32,520	4,920	39,600	1,600	2,560
	Média					
		TCuR	TFeR	TMnR	TZnR	TSiR
		mg kg ⁻¹				
0	0,5	134,400	755,400	104,600	24,000	2,72
	2,5	172,000	790,800	194,000	24,200	3,02
	10,0	130,550	659,400	540,000	23,400	4,26
	Média	145,650	735,200	279,533	23,867	3,33
2	0,5	186,800	1298,400	85,200	25,000	11,84
	2,5	178,400	1009,600	459,200	26,600	10,72
	10,00	181,200	888,200	832,600	23,400	12,40
	Média	182,133	1065,400	459,000	25,000	10,72

^{ns}, * e***: Não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 15A. Teores de de N (TNB), P (TPB), K (TKB), Ca (TCaB), Mg (TMgB), Cu (TCuB), Fe (TFeB), Mn (TMnB), Zn (TZnB) e Si (TSiB), nas bainhas de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com três doses de Mn, na ausência ou presença de Si.

Silício mmol L ⁻¹	Mn μmol L ⁻¹	TNB	TPB	TKB	TCaB	TMgB
		g kg ⁻¹				
0	0,5	29,240	6,960	41,600	2,000	3,660
	2,5	32,220	7,180	46,400	2,260	3,860
	10,0	33,540	7,560	44,700	1,880	3,400
	Média	31,667	7,233	44,233	2,047	3,640
2	0,5	30,660	6,740	44,800	1,600	2,480
	2,5	30,900	4,980	39,900	1,760	2,060
	10,00	29,060	4,880	41,800	1,480	2,240
	Média	30,207	5,533	42,167	1,613	2,260
		TCuB	TFeB	TMnB	TZnB	TSiB
		mg kg ⁻¹				
0	0,5	17,300	179,200	565,400	24,000	9,64
	2,5	22,600	287,800	677,600	24,000	8,84
	10,0	22,600	220,000	1487,600	25,800	9,92
	Média	20,833	229,000	910,200	24,600	9,47
2	0,5	17,200	263,600	129,600	23,800	40,00
	2,5	18,200	186,000	695,600	27,000	44,06
	10,00	17,800	195,400	903,200	22,600	49,52
	Média	17,733	215,000	576,133	24,467	44,53

^{ns}, * e***: Não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 16A. Teores de N (TNF), P (TPF), K (TKF), Ca (TCaF), Mg (TMgF), Cu (TCuF), Fe (TFeF), Mn (TMnF), Zn (TZnF) e Si (TSiF), nas folhas de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com três doses de Mn, na ausência ou presença de Si.

Silício mmol L ⁻¹	Mn μmol L ⁻¹	TNF	TPF	TKF	TCaF	TMgF	
		g kg ⁻¹					
0	0,5	50,160	5,260	34,600	5,120	3,320	
	2,5	51,260	5,180	30,840	5,160	3,300	
	10,0	50,280	5,740	31,800	4,740	3,500	
	Média	50,567	5,393	32,413	5,007	3,373	
2	0,5	47,640	3,520	35,000	2,880	1,920	
	2,5	46,280	2,820	25,600	2,462	1,560	
	10,00	46,920	5,240	33,700	3,180	2,040	
	Média	46,947	3,860	31,433	2,841	1,840	
		TCuF	TFeF	TMnF	TZnF	TSiF	
		mg kg ⁻¹					-- g kg ⁻¹ --
0	0,5	22,800	200,800	650,000	23,800	9,96	
	2,5	22,600	268,600	723,000	19,600	9,88	
	10,0	21,400	257,800	2158,400	22,400	12,26	
	Média	22,267	242,400	1177,133	21,933	10,70	
2	0,5	18,400	125,000	110,600	20,600	70,08	
	2,5	18,200	157,200	567,800	20,200	72,14	
	10,00	33,600	194,600	1034,800	24,400	72,32	
	Média	23,400	158,933	571,067	21,733	71,51	

^{ns}, * e***: Não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 17A. Período de incubação (PI), lesões por cm² de área foliar (LES), severidade real (SEVR), área abaixo da curva de progresso da mancha-parda (AACPMP) e severidade final da mancha-parda (SEVF) e teores foliares de Mn (TMnF+I) e Si (TSiF+I) de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com três doses de Mn, na ausência ou presença de Si, inoculadas com o fungo *Bipolaris oryzae*.

Silício mmol L ⁻¹	Mn μmol L ⁻¹	PI h	LES	AACPMP	SEVF %	SEVR %	TFMn+I mg kg ⁻¹	TSiF+I g kg ⁻¹
0	0,5	18,00	12,24	2825,78	75,00	60,36	549,50	12,55
	2,5	23,75	6,99	2216,93	60,42	54,52	819,75	9,83
	10,0	19,75	5,41	2515,05	71,25	63,24	1913,25	15,68
	Média	20,50	7,92	2519,25	68,89	59,37	1094,17	12,68
2	0,5	29,75	1,88	725,68	2,458	5,65	96,50	74,15
	2,5	29,00	1,55	675,24	2,208	4,10	719,00	76,38
	10,00	29,25	1,50	602,10	2,008	3,12	597,50	70,35
	Média	29,33	1,64	667,67	2,458	4,29	471,00	73,63

^{ns}, * e***: Não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 18A. Espessura das faces adaxial e abaxial da epiderme de folhas de plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva com três doses de Mn, na ausência ou presença de Si.

Silício mmol L ⁻¹	Mn μmol L ⁻¹	Espessura da face abaxial da epiderme ----- μm -----	Espessura da face adaxial da epiderme ----- μm -----
0	0,5	0,532	0,596
	2,5	0,471	0,553
	10,0	0,535	0,583
	Média	0,513	0,577
2	0,5	0,576	0,607
	2,5	0,604	0,642
	10,00	0,556	0,598
	Média	0,579	0,616

^{ns}, * e***: Não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 19A. Acúmulo foliar de compostos fenólicos solúveis totais (AcCFST) e lignina (AcLIG) em plantas arroz cultivadas em solução nutritiva com três doses de Mn, na ausência ou presença de Si.

Silício mmol L ⁻¹	Mn μmol L ⁻¹	AcCFST ----- μg vaso ⁻¹ -----	AcLIG ----- μg vaso ⁻¹ -----
0	0,5	1308,461	1582,232
	2,5	2332,537	4300,000
	10,0	1784,406	3199,564
	Média	1808,468	3027,265
2	0,5	2065,142	4723,895
	2,5	2179,903	4615,233
	10,00	2185,694	4480,022
	Média	2143,579	4606,383

^{ns}, * e***: Não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 20A. Acúmulo foliar de compostos fenólicos solúveis totais (AcCFST⁺I) e lignina (AcLIG⁺I) em plantas arroz cultivadas em solução nutritiva com três doses de Mn, na ausência ou presença de Si e inoculadas com o fungo *Bipolaris oryzae*.

Silício mmol L ⁻¹	Mn μmol L ⁻¹	AcCFST ⁺ I ----- μg vaso ⁻¹ -----	AcLIG ⁺ I ----- μg vaso ⁻¹ -----
0	0,5	1493,31	2150,36
	2,5	2970,79	4277,94
	10,0	2829,47	4188,51
	Média	2431,19	3538,94
2	0,5	2738,97	4499,98
	2,5	2891,12	5847,25
	10,00	3119,93	5437,49
	Média	2916,67	5261,57

^{ns}, * e***: Não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

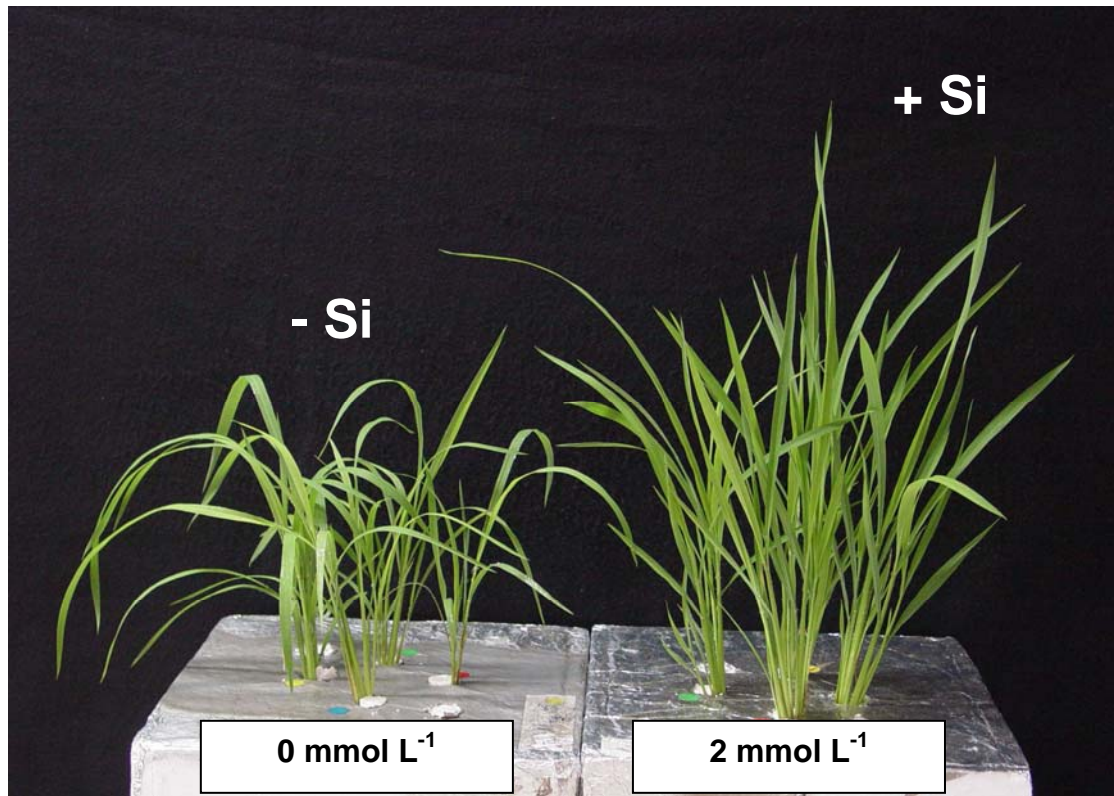


Figura 1A. Aspecto geral do tamanho e da arquitetura de plantas de arroz (cv. Metica-1) crescidas em solução nutritiva na presença e na ausência de Si .