

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

DESENVOLVIMENTO E MARCHA DE ABSORÇÃO DE SILÍCIO
EM PLANTAS DE ARROZ SOB CONDIÇÃO DE DÉFICIT HÍDRICO
E ADUBAÇÃO SILICATADA

MUNIR MAUAD

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP -
Campus de Botucatu, para obtenção do
título de Doutor em Agronomia - Área
de Concentração em Agricultura.

BOTUCATU-SP
ABRIL – 2006

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

DESENVOLVIMENTO E MARCHA DE ABSORÇÃO DE SILÍCIO
EM PLANTAS DE ARROZ SOB CONDIÇÃO DE DÉFICIT HÍDRICO
E ADUBAÇÃO SILICATADA

MUNIR MAUAD

Orientador: Prof. Dr. Hélio Grassi Filho

Co – Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Campus de
Botucatu, para obtenção do título de Doutor
em Agronomia - Área de Concentração em
Agricultura.

BOTUCATU-SP
ABRIL – 2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E
TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

M447d Mauad, Munir, 1970-
Desenvolvimento e marcha de absorção de silício em plantas de arroz sob condição de déficit hídrico e adubação silicatada / Munir Mauad. - Botucatu : [s.n.], 2006.
xiv, 107 f. : gráfs, tabs.

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2006

Orientador: Nélcio Grassi Filho

Co-orientador : Carlos Alexandre Costa Crusciol

Inclui bibliografia

1. Arroz. 2. Silício. 3. Arroz de sequeiro. 4. Adubação.
5. Arroz - Nutrição. I. Grassi Filho, Nélcio. II. Crusciol, Carlos Alexandre. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

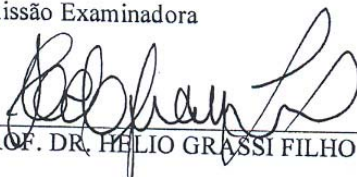
TÍTULO: **DESENVOLVIMENTO E MARCHA DE ABSORÇÃO DE SILÍCIO EM PLANTAS DE ARROZ SOB CONDIÇÃO DE DÉFICIT HÍDRICO E ADUBAÇÃO SILICATADA.**

ALUNO: MUNIR MAUAD

ORIENTADOR: PROF. DR. HELIO GRASSI FILHO

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL

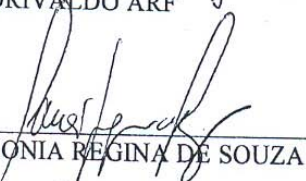
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. HELIO GRASSI FILHO



PROF. DR. ORIVALDO ARF



PROF.ª DR.ª SONIA REGINA DE SOUZA



PROF. DR. GASPARE HENRIQUE KORNDORFER



PROF. DR. JOSÉ SALVADOR SIMONETI FOLONI

Data da Realização: 10 de abril de 2006

DEDICO *IN MEMORIAN* DE MEU AVÔ
RIZK MAUAD.

AGRADECIMENTOS

- A **DEUS**, pela vida, pela minha família e por me guiar nas horas mais difíceis.
- Aos meus pais **Hannah Rizk Mauad** e **Leila Mouzawak Mauad**, pelo amor, apoio, compreensão e incentivo incansável.
- À minha esposa **Juliana**, pelo amor, companheiro, compreensão e incentivo.
- Aos meus irmãos, cunhados (a) e sobrinhos, pelo apoio, incentivo e alegria que me proporcionam
- Ao Prof. Dr. **Hélio Grassi Filho**, pela orientação, apoio, confiança e amizade.
- Ao Prof. Dr. **Carlos Alexandre Costa Crusciol**, pela co-orientação, amizade, incentivo e entusiasmo incansável. Por melhor que um adjetivo possa expressar a minha gratidão e agradecimento, ainda assim ficará distante. Obrigado.
- . - À CAPES, pela concessão da bolsa.
- Ao tio **Enio Bandarra** e á tia **Sandra Bandarra** pelos ensinamentos, carinho e amor. Sem vocês, o caminho talvez não fosse esse.
- A Prof.(a) Dra. **Guisseppina Pace Pereira Lima**, pela orientação e pelo auxílio nas análises bioquímicas do presente trabalho.
- Ao Prof Dr. **João Carlos Cury Saad**, pelas sugestões e fornecimento dos tensiômetros utilizados no presente trabalho.
- Aos Professores do Departamento de Produção Vegetal - Agricultura pelos ensinamentos e exemplos.
- Aos amigos Silvio Bandarra, Maurico Masci, Mauro Tamburini, Marco Furlan, Fernando Sodré e Eduardo Zambello de Pinho pela amizade e a presença nas horas difíceis.

- Aos amigos da Pós-Graduação Juliano Corruli, José Carlos Feltran, Gustavo P. Matheus, Neumarcio, Rodolfo (Taubaté), Emerson Borghi e Laerte Marques pela convivência harmônica e apoio.
- Aos **Funcionários do Departamento de Produção Vegetal - Setor Agricultura**, pelo auxílio durante esses anos, em especial a Valéria, Vera Lucia, Elanir e Dorival..
- Aos **Funcionários da Biblioteca** “Paulo de Carvalho Mattos”,
- Ao Gilberto Winckher (Giba) do Departamento de Engenharia Rural pela atenção e prestatividade.
- À todos que direta e indiretamente participaram da elaboração deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE FIGURAS.....	XIII
1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY.....	3
3 INTRODUÇÃO.....	5
4 REVISÃO DE LITERATURA.....	8
4.1 Panorama da cultura do arroz.....	8
4.2 Disponibilidade hídrica no solo e cultivo de arroz de terras altas.....	9
4.3 Componentes da produção.....	11
4.4 Déficit hídrico e seus efeitos nos componentes vegetativos, componentes da produção e na absorção de nutrientes.....	14
4.6 Silício no Solo e na Planta.....	24
4.6.1 Silício no solo.....	24
4.6.2 Silício na planta.....	26
4.6.3 Silício e estresses.....	29
4.6 Silício no Solo e na Planta.....	24
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	32
5.1 Localização dos experimentos.....	32
5.1.1 Experimento 1: Desenvolvimento de plantas de arroz sob condições de déficit hídrico e adubação silicatada.....	32
5.1.1.1 Delineamento experimental e tratamentos empregados.....	32
5.1.1.2 Descrição do tipo de solo.....	33
5.1.1.3. Condução do primeiro experimento.....	33
5.1.1.4 Variáveis Analisadas	34

	Página
5.1.1.4.1 Variáveis bioquímicas.....	34
5.1.1.4.1.1 Determinação do teor de prolina.....	34
5.1.1.4.1.2. Atividade da enzima peroxidase (POD) (EC 1.11.1.7).....	35
5.1.1.4.2 Altura da planta (cm).....	35
5.1.1.4.3 Número de colmos por metro quadrado.....	35
5.1.1.4.4 Porcentagem de colmos férteis.....	35
5.1.1.4.5 Número de panículas.....	35
5.1.1.4.6 Número total de espiguetas por panícula.....	36
5.1.1.4.7 Número de espiguetas granadas e chochas por panícula.....	36
5.1.1.4.8 Fertilidade das espiguetas.....	36
5.1.1.4.9 Massa de 1000 grãos:.....	36
5.1.1.4.10 Produtividade de grãos:	36
5.1.1.4.11 Análise foliar.....	36
5.1.1.4.12 Determinação do silício no tecido vegetal.....	37
5.2 Experimento 2: Componentes da produção e marcha de absorção e acúmulo de silício em função da aplicação de calcário e silicato de cálcio.....	37
5.2.1 Delineamento experimental e tratamentos empregados.....	37
5.2.2 Descrição do tipo de solo.....	38
5.2.3 Instalação e condução do experimento.....	38
5.3 Cultivares.....	40
5.3.1 Caiapó.....	40
5.3.2 Maravilha.....	40
5.4 Variáveis analisadas.....	40
5.4.1 Número de colmos por planta	40

	Página
5.4.2 Porcentagem de colmos férteis.....	40
5.4.3 Número de panículas por planta.....	40
5.4.4 Número total de espiguetas por panícula.....	41
5.4.5 Número de espiguetas granadas e chochas por panícula.....	41
5.4.6 Fertilidade das espiguetas.....	41
5.4.7 Massa de 1000 grãos.....	41
5.4.8 Produtividade de grãos.....	41
5.4.9 Determinação do silício no tecido vegetal.....	41
5.5 Análise estatística.....	41
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
6.1 Experimento 1: Desenvolvimento de plantas de arroz sob condições de déficit hídrico e adubação silicatada.....	43
6.1.1 Características das plantas.....	43
6.1.2 Produção de matéria seca e teor de macronutriente na folha e silício na planta.....	56
6.1.3. Parâmetros Bioquímicos	62
6.2. Experimento 2: Componentes da produção e marcha de absorção e acúmulo de silício em função da aplicação de calcário e silicato de cálcio.....	71
6.2.1 Acúmulo de matéria seca e silício	78
7 CONCLUSÕES.....	87
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1	Características químicas da amostra de solo na camada de 0 - 0,20 m.....	33
2	Características químicas da amostra de solo na camada de 0 - 0,20 m.	38
3	Composição química do silicato de cálcio e magnésio.....	39
4	Número de colmos, colmos férteis (%), número de panículas por metro quadrado, número de espiguetas: totais, granadas e chochas e fertilidades das espiguetas (%) em função de cultivares tensão de água e doses de silício.....	44
5	Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente ao número de panículas por metro quadrado.....	46
6	Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente ao número de espiguetas granadas/panícula.....	48
7	Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente ao número de espiguetas chochas/panícula.....	49
8	Desdobramento das interações (T x S) da análise de variância referente ao número de panícula de espiguetas chochas/panícula.....	50
9	Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente a fertilidade da espiguetas.....	51
10	Desdobramento das interações (T x S) da análise de variância referente a fertilidade da espiguetas.....	51

Tabela		Página
11	Altura de planta (cm), massa de 1000 grãos (g) e produtividade de grãos (g m^{-2}) em função de cultivares tensão de água e doses de silício.....	52
12	Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente à altura de planta.....	53
13	Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente à massa de 1000 grãos.....	54
14	Desdobramento das interações (C x S) da análise de variância referente à massa de 1000 grãos	55
15	Desdobramento das interações (T x S) da análise de variância referente à massa de 1000 grãos.....	55
16	Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente à produtividade.....	56
17	Produção de matéria seca, teor de macronutrientes na folha bandeira e silício na planta em função de cultivares, tensão de água no solo e doses de silício.....	57
18	Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente ao teor de silício.....	59
19	Desdobramento das interações (C x S) da análise de variância referente ao teor de silício.....	60
20	Desdobramento das interações (S x T) da análise de variância referente ao teor de silício.....	61
21	Teor de prolina nas fases vegetativa e reprodutiva em função de cultivares da tensão de água no solo e doses de silício	62

Tabela**Página**

22	Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente à atividade de prolina na fase vegetativa.....	63
23	Desdobramento das interações (T x S) da análise de variância referente ao teor de prolina na fase vegetativa.....	64
24	Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente ao teor de prolina na fase reprodutiva.....	65
25	Desdobramento das interações (C x S) da análise de variância referente ao teor de prolina na fase reprodutiva.....	67
26	Desdobramento das interações (T x S) da análise de variância referente ao teor de prolina na fase reprodutiva.....	67
27	Atividade de peroxidase na fase vegetativa e reprodutiva em função da tensão em função de cultivares tensão de água e doses de silício.....	68
28	Desdobramento das interações (T x S) da análise de variância referente à atividade de peroxidase (μmol de H_2O_2 decomposto/mim.mg de proteína), na fase vegetativa.....	69
29	Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente à atividade de peroxidase (μmol de H_2O_2 decomposto/mim.mg de proteína), na fase reprodutiva.....	70
30	Desdobramento das interações (T x S) da análise de variância referente à atividade de peroxidase (μmol de H_2O_2 decomposto/mim.mg de proteína), na fase reprodutiva.....	71

Tabela**Página**

31	Número de colmos, colmos férteis (%), número de panículas por metro quadrado, número de espiguetas: totais, granadas e chochas e fertilidades das espiguetas (%) em função de cultivares e corretivos do solo	72
32	Desdobramento das interações (C x Co) da análise de variância referente ao número total de espiguetas.....	74
33	Desdobramento das interações (C x Co) da análise de variância referente ao número de espiguetas granadas/panícula.....	75
34	Massa de 1000 grãos e produtividade em função de cultivares e corretivos do solo.....	76
35	Desdobramento das interações (C x Co) da análise de variância para massa de 1000 grãos.....	77
36	Desdobramento da interação (C x Co) da análise de variância referente à produtividade.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Esquema representativo das fases e época em que são definidos os componentes da produção da cultura do arroz.....	13
2	Esquema metabólico para biossíntese e degradação da prolina em plantas, proposto por Kir`yan & Shevyakova (1984).....	20
3	Acúmulo de massa de matéria seca na folha (g planta^{-1}) pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha.....	78
4	Acúmulo de silício na folha (mg planta^{-1}) pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha.....	79
5	Acúmulo de massa de matéria seca de colmo + bainha (g planta^{-1}) pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha.....	80
6	Acúmulo de silício no colmo + bainha (mg planta^{-1}) pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha.....	81
7	Acúmulo de massa de matéria seca na panícula (g planta^{-1}) pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha.....	82
8	Acúmulo de silício na panícula (mg planta^{-1}) pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha.....	83
9	Acúmulo de massa de matéria seca total (folha + colmo+bainha + panícula) (g planta^{-1}) pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha.....	83
10	Acúmulo total de silício (mg planta^{-1}) pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha.....	84
11	Acúmulo de silício (mg planta^{-1}) total, no colmo + bainha, na folha e na panícula pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha utilizando calcário.....	85

Figura		Página
12	Acúmulo de silício (mg planta^{-1}) total, no colmo + bainha, na folha e na panícula pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha utilizando silicato.....	86

1 RESUMO

O cultivo de arroz de terras altas sob condições de sequeiro é considerado um cultivo de risco, sendo a água o fator ambiental mais ligado à baixa produtividade. A identificação e a compreensão dos mecanismos de tolerância à seca, bem como o desenvolvimento de práticas culturais que aumentem essa tolerância são fundamentais para alcançar maior estabilidade na produção. A adubação silicatada tem aumentado a tolerância das plantas aos estresses biótico e abiótico. O trabalho teve como objetivo avaliar o desenvolvimento de cultivares de arroz de terras altas sob condição de déficit hídrico e adubação silicatada e a marcha de absorção e acúmulo de silício na parte aérea. Foram instalados dois experimentos em casa de vegetação, o primeiro foi delineado em blocos ao acaso em esquema fatorial $2 \times 2 \times 2$ com quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos por duas cultivares (Caiapó - tradicional e Maravilha - moderno), em duas tensões de água no solo ($-0,025$ MPa e $-0,050$ MPa) e duas doses de silício (0 e $350 \text{ kg ha}^{-1}\text{Si}$). O segundo experimento foi conduzido de maneira inteiramente casualizado em esquema fatorial $2 \times 2 \times 7$ com quatro repetições, sendo duas cultivares (Caiapó e Maravilha) dois corretivo de solo (carbonato de cálcio e silicato de cálcio) e sete estádios de desenvolvimento (início do perfilhamento, perfilhamento máximo, diferenciação do primórdio da panícula, emborrachamento, antese, grão leitoso e maturação fisiológica.) O estresse hídrico reduziu o

número de panícula por metro quadrado, o número total de espiguetas por panícula, a fertilidade das espiguetas e, consequentemente, a produtividade de grãos. Sob condições de estresse hídrico, o silício reduz o teor de prolina na fase vegetativa e reprodutiva e aumenta a atividade da peroxidase na fase reprodutiva, podendo ser um indicativo de tolerância a esse estresse. As cultivares de arroz acumulam silício em quantidades diferentes. A marcha de absorção e acúmulo de silício é gradativa na cultivar Caiapó, desde o perfilhamento até a maturação, enquanto na Maravilha o acúmulo total ocorre em menor tempo desde o perfilhamento até o emborrachamento. Com a aplicação de silicato a Caiapó acumulou mais silício do que a cultivar Maravilha, principalmente no colmo + bainha.

Palavras-chave: *Oryza sativa* L., componentes da produção, silicato, arroz de terras altas.

DEVELOPMENT AND UPTAKE DYNAMICS OF SILICON AT THE RICE PLANT GROWTH UNDER WATER STRESS CONDITION AND SILICON FERTILIZATION. Botucatu, 2006. 107. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: MUNIR MAUAD

Adviser: PROF. DR. HÉLIO GRASSI FILHO

Co-advisor: PROF. DR. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL

2 SUMMARY

The highland rice cultivate under upland condition is considered a risk cultivate, being the water environment factor most linked to low productivity. The identification and the understanding of the dry tolerance mechanisms as well as the development of culture practical that increase this tolerance are fundamental to achieve more stability, productivity on highland rice cultivate specially on upland system. The silicon fertilization have been increased the plants tolerance under biotic and abiotic stress. This silicon fertilization have been increased the plants tolerance to biotic and abiotic stress. This research had the objective to evaluate the development of the upland rice cultivar under water stress condition and silicon fertilization and uptake dynamic of silicon in the aerial part of the plant. There were installed two experiments in greenhouse, the first experiment was outlined at random blocks design in a factorial draft 2x2x2 with four replication. The treatments were

two cultivars (Caiapó- Traditional and Maravilha – Modern) for two tension of water on the ground ($-0,025$ MPa e $-0,0050$ MPa) and for two silicon rates (0 and $350 \text{ kg ha}^{-1}\text{Si}$). The second experiment was carried out as entirely randomized design factorial draft $2 \times 2 \times 7$ with four replication, being two cultivares (Caiapó and Maravilha) two soil amendments (limestone and calcium silicate) and seven estage of development. The water stress decreased the number of panicle per square meter, the total number of spikets per panicle, spiketel fertility and consequently the grains productivity. Under water stress, the silicon decrease the proline level at vegetation and reproductive stage and increase the peroxide activity at reproductive stage, could be a tolerance indicative to this stress. The rice cultivares accumulate silicon in different quantity. The silicon uptake dynamic and silicon accumulate is gradual at the Caiapó cultivar, since the tillering to the booting, while at Maravilha the total accumulate occur at a short time since the tillering until the . With the application of silicate the Caiapó accumulate more silicon than the Maravilha cultivar, specially at the stems + sheath.

Key-words: *Oryza sativa* L, production components, silicat, upland rice.

3 INTRODUÇÃO

O encaminhamento da agricultura para áreas consideradas marginais, com problemas de natureza química do solo como baixa fertilidade natural e baixo pH, e física como a compactação do solo, além de problemas relacionados ao ambiente, em especial à disponibilidade hídrica, é uma realidade decorrente da necessidade de produzir alimentos para suprir a demanda ocasionada pelo crescimento da população mundial.

Entre as culturas anuais, o arroz é a mais importante no mundo, pois constitui a dieta básica de mais de 50% da população mundial. A maior área cultivada e o maior consumo de arroz estão na Ásia (FAGERIA et.al., 2004). A importância da cultura do arroz para o Brasil, juntamente com a do feijão, já é bastante conhecida e aumenta à medida que cresce o contingente populacional brasileiro.

O arroz no Brasil é cultivado em dois ecossistemas de produção denominados terras altas e várzeas, sob diferentes sistemas de cultivo. O ecossistema de terras altas, que engloba o sistema de produção sem uso de irrigação, é o mais difundido territorialmente. Esse sistema correspondeu a 65,4% da área total cultivada com arroz no Brasil e contribuiu com 38,8% da produção nacional (FERREIRA e VILLAR, 2004). Essa baixa produtividade é conseqüência do déficit hídrico causado pela irregularidade pluvial na

época de cultivo, aliado ao baixo investimento em adubos e corretivos decorrente do risco que a cultura apresenta.

Previsões ambientais sinalizam para o aumento do aquecimento global nas próximas décadas. Um aumento dos períodos de seca certamente acompanharão esse fenômeno. O desenvolvimento de cultivares mais tolerantes a períodos de déficit hídrico, bem como o desenvolvimento de tecnologias que auxiliem as plantas a tolerar períodos prolongados de estiagem, tornam-se essenciais na manutenção da produção agrícola em níveis que possam alimentar uma população em constante crescimento (NEPOMUCENO et al., 2004).

A identificação e a compreensão dos mecanismos de tolerância a seca são fundamentais na busca por genótipos de arroz de terras altas tolerantes à deficiência hídrica ou mesmo técnicas que aumentem essa tolerância, de forma a alcançar maior estabilidade da produtividade em áreas de maior risco.

Vários estudos estão sendo realizados no sentido de se verificar a ação de determinados compostos como indicadores de vários tipos de estresse ambiental, principalmente o hídrico. Dentre esses compostos encontram-se a prolina que é acumulada quando as plantas são submetidas a déficit hídrico (FUMES, 1996).

O silício não é considerado parte do grupo de nutrientes essenciais ou funcionais do ponto de vista fisiológico para o crescimento e desenvolvimento das plantas, entretanto, a sua absorção traz inúmeros benefícios, principalmente ao arroz. Isto mostra a essencialidade agrônômica desse elemento para um aumento e ou produção sustentável desta cultura (BARBOSA FILHO et al., 2000).

Efeitos benéficos da adubação com silício têm sido observados em várias espécies vegetais, especialmente quando estas estão submetidas a estresse biótico ou abiótico (SCHIMIDT et al. 1999; FARIA, 2000, THENHOLM et al., 2001; MA et al., 2001). O silício é depositado na forma de sílica gel na parede celular da epiderme das folhas, colmos e casca, formando uma dupla camada de sílica-cutícula e sílica-celulose (YOSHIDA et al., 1959; YOSHIDA et al., 1962; RAVEN, 2003). A deposição de silício aumenta o fortalecimento e a rigidez da parede celular e assim aumenta a resistência do arroz a pragas, doenças, acamamento, melhora a interceptação de luz e diminui a transpiração (EPSTEIN, 1994, TAKAHASHI 1995; AGARIE et al., 1998; BARBOSA FILHO et al., 2001).

Apesar da importância do silício para a agricultura e em especial para as culturas acumuladoras como o arroz, estudos relacionados à marcha de absorção desse elemento são escassos. O entendimento da absorção e do acúmulo de silício nas diferentes fases de desenvolvimento da planta é importante, porque permite inferir as épocas em que o nutriente é mais exigido e sua distribuição nas diferentes estruturas da planta.

O objetivo deste estudo foi o de avaliar o desenvolvimento dos cultivares de arroz de terras altas dos grupos tradicional e moderno em função da adubação silicatada e do déficit hídrico, por meio de parâmetros fitotécnicos como os componentes vegetativos e da produção e, bioquímico como a atividade de enzimas antioxidantes e determinar a marcha de absorção de silício.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Panorama da cultura do arroz

O arroz é uma das fontes alimentares mais importantes para cerca da metade dos seis bilhões de habitantes no mundo. A Ásia é a principal produtora de arroz, concentrando nesse continente 90% da produção mundial, destacando-se China, Índia e Indonésia que respondem respectivamente por 30%, 23% e 8% da produção mundial de arroz (FERREIRA & VILLAR, 2004).

Na safra 2005/2006 foram produzidos 596 milhões de toneladas de arroz em casca. Os países exportadores comercializaram neste mesmo período 25 milhões de toneladas de arroz beneficiado, que corresponde a 4,2 % da produção total (AGRIANUAL 2006).

O preço do arroz no mercado internacional é em grade parte controlado por China e Indonésia, haja vista que são grandes produtores, respectivamente com 179,3 e 136,5 milhões de toneladas e possuem alto nível populacional assim, em anos de produção deficitária eles importam arroz, e em anos de excedente, ofertam o produto (FERREIRA & VILLAR, 2004).

O Brasil ocupa a décima colocação no cenário mundial da produção de arroz e a primeira fora dos países asiáticos, participando com 11,7 milhões de toneladas de arroz na safra 2005/06 (CONAB, 2006). A produção de arroz no Brasil pode ser dividida em três regiões: a primeira é a região Sul com destaque para Rio Grande do Sul e Santa Catarina, a segunda é o Centro Oeste, com destaque para Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás, e a terceira o Nordeste, com destaque para o Maranhão (FERREIRA & VILLAR, 2004).

A participação da cultura do arroz no produto interno bruto, no período de 1994 a 2001, foi de 3,85% com média anual de 0,48%, gerando no mesmo período 41,9 milhões de reais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE AGRIBUSINESS, 2002).

As médias de produção e consumo de arroz no Brasil nos últimos nove anos foram, respectivamente, 10,2 milhões e 12,2 milhões, com déficit médio de 2,0 milhões de toneladas (CONAB, 2006). Esse quadro de defasagem entre a oferta e a demanda pode se agravar caso ocorra um aumento do consumo em virtude do Programa Fome Zero, em que o governo assume o compromisso de assegurar o direito humano à alimentação (FERREIRA & VILLAR, 2004).

4.2 Disponibilidade hídrica no solo e cultivo de arroz de terras altas

A produtividade do arroz de terras altas no Brasil é considerada muito baixa, além de ser freqüentemente desestabilizada pela deficiência hídrica, sendo que a disponibilidade de cultivares tolerantes à seca constitui importante estratégia para minorar tal problema (PEREIRA et al. 1994).

Dos fatores ambientais, a água é o mais ligado à baixa produtividade da cultura do arroz no Brasil, à exceção do Rio Grande do Sul, pois a maior parte do arroz no país é cultivada em terras altas. A produtividade do arroz é muito dependente da precipitação pluvial na fase reprodutiva, o que faz dessa cultura um empreendimento de alto risco (FERRAZ, 1987; MOREIRA & KLUGE, 1999).

A ocorrência de déficit hídrico é prejudicial em todas as fases, e o período mais crítico é na fase reprodutiva, sendo o estágio de quinze dias anterior ao florescimento o mais prejudicial. A falta de água nessa época provoca esterilidade ou má

formação das espiguetas, com grande reflexo na produtividade (MOREIRA & KLUGE, 1999). Assim o agricultor sente-se desencorajado a investir em melhor preparo do solo, na correção do pH e da fertilidade do solo, no combate mais eficiente às plantas daninhas, pois o grande responsável pela boa ou má colheita é a chuva (FERRAZ, 1987).

O consumo de água pela cultura do arroz de terras altas é distribuído em 30% durante a fase vegetativa, 55% durante a fase reprodutiva e 15% na fase de maturação (FAGERIA, 1980). Segundo Moraes et al. (1979) o arroz de terras altas necessita de 200 mm de chuva por mês durante o ciclo da cultura, entretanto para Steinmetz (1986), a necessidade total de água para a cultura do arroz de terras altas varia de 600 a 700 mm.

Steinmetz et al. (1984), em levantamento feito em 20 localidades com base no estudo da distribuição da frequência das chuvas, consideraram regiões favoráveis ao cultivo de arroz de terras altas quando a probabilidade de ocorrência de 50 mm ou mais de chuva em dez dias for maior que 66,7%.

Giudece et al. (1974) verificaram que o arroz de terras altas deve ser irrigado, quando for consumida 40% da água disponível na camada de 0 - 0,20 m, enquanto Coelho et al. (1977) obtiveram maior produtividade quando a irrigação foi feita para repor 30% da água consumida na profundidade de 0 - 0,20 m. Pinheiro et al. (1985) consideraram nível crítico de água no solo para a cultura do arroz de terras altas, em um Latossolo Vermelho Amarelo, quando 67% do total de água disponível no perfil de 0 - 0,45 m foi consumida. Pereira et al. (1994), em estudo realizado em casa de vegetação com a cultura do arroz de terras em um solo aluvião do município de Pombal, na Paraíba, verificaram que o limite de umidade do solo, nas fases vegetativa e reprodutiva, para não causar redução acentuada na produção de grãos, foi o correspondente a 70–80% da capacidade de campo.

Os resultados expressos em porcentagem de água disponível só podem ser considerados para solos com características semelhantes, entretanto, se forem expressos em potencial de água do solo, podem ser mais facilmente aplicados em outro tipo de solo (STONE et al., 2004)

Stone et al.(1986) recomendam que para a cultura do arroz de terras altas o potencial matricial de água no solo, determinado por meio de tensiômetros instalados a 15 cm de profundidade, não ultrapasse o valor de -0,025 MPa, pois acima desse valor começa a ocorrer perda de produtividade.

4.3 Componentes da produção

A cultura do arroz apresenta três estádios bem definidos de desenvolvimento: estádios vegetativo, reprodutivo e de maturação, sendo a sua produção definida por quatro componentes: número de panícula por m², número de espiguetas por panícula, fertilidade das espiguetas e massa de 1000 grãos (FORNASIERI FILHO & FORNASIERI 1993). Cada componente é definido em um estágio do desenvolvimento da planta, podendo ser influenciados por fatores ambientais e nutricionais. O número de espiguetas por panícula e a fertilidade das espiguetas são os componentes que mais influenciam na produção, sendo que estes são definidos no estágio reprodutivo.

Os componentes da produção são determinados em diferentes estádios de desenvolvimento da planta e apresentam contribuições quantitativas diferenciadas para produção de grãos. Portanto são interdependentes, isto é, o aumento do número de panícula, através de altas densidades de semeadura, não provoca aumento do número de espiguetas por panícula, podendo até diminuí-lo (MATSUSHIMA, 1970).

Machado (1994) considera que a produtividade de grãos de uma cultura por unidade de área (kg ha⁻¹) é o produto de quatro componentes da produção: número de panícula por unidade de área (ha) x número de espiguetas por panícula x fertilidade das espiguetas (%) x massa de 1000 grãos (g) x 10⁻⁴.

O número de panícula por área é definido na fase vegetativa, que compreende o período entre a germinação até 10 dias após a iniciação do primórdio da panícula, e é caracterizado pelo ativo perfilhamento, gradual aumento da planta e emergência foliar em intervalos regulares (FORNASIERI FILHO & FORNASIERI, 1993, MACHADO 1994, PINHEIRO, 1999). Segundo Crusiol et al. (2003a), a deficiência hídrica devido a veranicos na fase vegetativa da cultura aumenta o período de duração dessa fase, refletindo-se no aumento do ciclo.

Em sistemas de semeadura convencional, e sob condições ambientais favoráveis, o perfilhamento inicia-se de dez a quinze dias após a emergência (FORNASIERI

FILHO & FORNASIERI, 1993). Segundo Pedroso (1980) a temperatura mínima entre 15 e 19°C e máxima de 32 a 34°C são favoráveis ao perfilhamento.

A diferenciação do meristema no ponto de crescimento do colmo demarca a iniciação do primórdio da panícula, com a planta passando da fase vegetativa para reprodutiva (PINHEIRO 1999). Durante essa etapa ocorre, simultaneamente, a alongação do colmo e a diferenciação e desenvolvimento da panícula, estabelecendo-se a competição por assimilados produzidos neste estágio entre os dois órgãos. Cerca de 60% dos assimilados são utilizados na alongação dos entrenós superiores, e o restante é direcionado ao crescimento das folhas e panículas jovens (FORNASIERI FILHO & FORNASIERI, 1993).

A fase reprodutiva é o período mais crítico à cultura, por nela determinar-se o número potencial máximo de grãos por panícula, e a planta mostra-se muito sensível a estresses ambientais (FORNASIERI FILHO & FORNASIERI, 1993). Essa fase inicia-se com a diferenciação da gema vegetativa em reprodutiva, dando origem ao primórdio da panícula, e termina no emborrachamento (MACHADO, 1994). Esse componente é influenciado por fatores genéticos e por condições externas vigentes durante a fase reprodutiva, mais precisamente de 32 a 5 dias que antecedem o florescimento (YOSHIDA, 1981). O número de espiguetas por panícula e a fertilidade das espiguetas são os componentes que mais influenciam na produção. Diversos autores afirmam que a maior necessidade de água para a cultura do arroz ocorre a partir da diferenciação do primórdio da panícula estendendo-se até após o florescimento.

A fertilidade das espiguetas é determinada desde a meiose do grão de pólen (divisão reducional) até o início do enchimento das espiguetas. É dependente da meiose do grão de pólen (microsporogênese), da antese (abertura das anteras), da polinização, da fertilização e do início da fase de maturação, ou seja, quando inicia a translocação de carboidratos, sendo influenciada pelas condições ambientais ocorrentes no desenvolvimento dos estádios citados, principalmente em torno de 10 dias antes e após o florescimento, assim como excessivas doses de adubos nitrogenados (MACHADO, 1994).

Estresse hídrico no estágio de meiose ou na antese resulta em aumento da esterilidade de flores, assim como na redução do número de primórdios da raquis que se desenvolvem (O'TOOLE & CHANG, 1979).

A fase de maturação, etapa final do ciclo de vida da planta de arroz, vai do florescimento à maturação dos grãos; tem uma duração de 30 a 35 dias, e subdivide-se em estágio de grão leitoso, ceroso e maduro (PINHEIRO, 1999).

O peso do grão é um caráter varietal bastante estável, que depende do tamanho da casca determinada durante as duas semanas que antecedem a antese (YOSHIDA, 1981), e do desenvolvimento da cariopse após o florescimento (MATSUSHIMA, 1970). Os fatores genéticos controlam o tamanho da casca, que por sua vez limita o tamanho da cariopse, isto é, o grão não pode crescer além do espaço determinado para ele (YOSHIDA, 1981). Deficiência hídrica durante as duas semanas que antecedem a antese também pode afetar a massa dos grãos, já que nesse período, ocorre a definição do tamanho da casca (YOSHIDA 1981).

Abaixo está o esquema representativo das fases e épocas em que são definidos os componentes da produção (Figura 1)

E	DF			F	
Fase Vegetativa	Fase Reprodutiva			Fase Maturação	
Período 1	P2	P3	P4	P5	
	-30 dias	-14 dias	-3 dias	+5 dias	+15 dias
nº panículas	nº de espiguetas/ panícula	Fertilidade das espiguetas (%)		Massa de 1000 grãos (g)	

Figura 1. Esquema representativo das fases e época em que são definidos os componentes da produção da cultura do arroz.

** Período, em dias, em relação ao florescimento.

E - Emergência da plântula; DF - Diferenciação floral; F – Florescimento.

4.4 Déficit hídrico e seus efeitos nos componentes vegetativos, componentes da produção e na absorção de nutrientes.

A planta de arroz é considerada como uma espécie semi-aquática e sua evolução para terras altas é relativamente recente na escala evolutiva, o que talvez confira a esta espécie menor tolerância à seca em relação a espécies adaptadas a essa condição como milho, sorgo, soja e milheto, dentre outras (PINHEIRO et al., 2000). O deslocamento do homem de áreas baixas de várzeas para locais mais elevados, o qual através da pressão natural de seleção exercida no ecossistema de terras altas, induziu a alterações e adaptações, especialmente no hábito de crescimento radicular da planta de arroz (O'TOOLE & CHANG, 1979).

Segundo Pinheiro et al. (2000), as cultivares nacionais melhoradas, de tipo de planta tradicional de sequeiro (grupo Japônica), apresentam maior tolerância à seca do que as cultivares melhoradas de tipo de planta moderna.

Quando a deficiência hídrica ocorre na fase vegetativa, a produtividade é reduzida principalmente devido à diminuição do número de panículas, enquanto que na fase reprodutiva a queda de produtividade é devida à redução do número de grãos e peso do grão (MATUSHIMA, 1968, YOSHIDA, 1972).

A intensidade da deficiência hídrica pode diminuir o perfilhamento, afetando o número de colmos por metro quadrado (FORNASIERI FILHO & FORNASIERI, 1993), pois leva a dormência às gemas axilares. Se a deficiência hídrica persiste até a transformação da gema vegetativa em reprodutiva, momento da passagem da fase vegetativa para fase reprodutiva, o número de panícula por área também é afetado (CRUSCIOL et al., 2003b).

Giudece et al. (1973) observaram que, sob condições de deficiência hídrica, as plantas de arroz apresentavam redução no número de colmos férteis, no número total de espiguetas, na fertilidade das espiguetas e no peso de grãos, porém não houve efeito no número de plantas por área.

Coelho et al. (1977), estudando níveis de água disponível no solo e duas cultivares IAC 1246 mais tolerante a déficit hídrico, e IR665-4-1, mais sensível ao déficit hídrico observaram que para cultivar IR665-4-1 no nível mais baixo de água não houve

produção, enquanto para cultivar IAC 1246 essa foi extremamente baixa, devido à elevada esterilidade das espiguetas. Entretanto, com aumento dos níveis de água, houve aumento de produção de grãos, com aumento do número de panículas por metro quadrado, número de espiguetas por panícula, fertilidade das espiguetas, peso e altura de plantas.

Stone et al. (1979) em experimento de campo durante dois anos com suspensão da irrigação por diferentes números de dias, observaram que em ano de boa distribuição pluvial, sobretudo duas semanas antes e duas semanas após a floração, não ocorreu queda de produção, entretanto em ano que as chuvas foram irregulares houve queda da produção, consequência do menor número de panículas por metro quadrado e menor peso de 1000 grãos. Segundo os autores, o número de espiguetas por panícula não foi influenciado pela baixa disponibilidade de água no solo.

Fageria (1980), estudando doses de fósforo e déficit hídrico na cultura do arroz de terras altas, observou que sob condições de deficiência hídrica as plantas apresentavam menor peso de 1000 grãos e aumento na esterilidade das espiguetas

A diminuição no peso dos grãos devido ao déficit hídrico ocorre pela redução da fotossíntese, causando assim a redução na translocação de carboidratos (KRAMER 1974). A maior parte do carboidrato do grão é produzido pela fotossíntese durante o período de maturação, ainda que alguns carboidratos acumulados nos colmos e bainhas, antes do florescimento, se transloquem para os grãos (YOSHIDA et al., 1968).

Em condições de casa de vegetação, Stone et al. (1984) observaram que a deficiência hídrica reduziu o número de espiguetas granadas por panícula, o peso dos grãos, a produção de grãos, a produção total de matéria seca, a altura das plantas, o índice de colheita e a eficiência do uso de água, e aumentou a percentagem de espiguetas chochas, a duração do ciclo e a produção de matéria seca das raízes.

Pinheiro et al. (1985) trabalhando com 49 cultivares de arroz com diferentes ciclos de desenvolvimento e sob duas condições de fornecimento de água, a primeira apenas com água proveniente de chuvas e a segunda com irrigação por aspersão, observaram que as plantas conduzidas com irrigação suplementar (aspersão) apresentavam maior número de panículas/m², maior fertilidade das espiguetas e maior massa de 100 grãos em relação às plantas cultivadas apenas com água da chuva, porém o número médio de espiguetas por panícula foi semelhante em ambos os sistemas, o que possivelmente se deve à

ocorrência tardia da deficiência hídrica após a determinação desse componente na maioria das cultivares do tratamento sem irrigação.

Sabe-se que o estágio de desenvolvimento da planta desempenha papel fundamental na sua resposta à seca. Quando esta ocorre na fase vegetativa os danos a produtividade são poucos, entretanto são altamente prejudiciais quando ocorre na fase reprodutiva (O'TOOLE & CHANG, 1979). Na cultura do arroz os períodos de 13 a 15 dias antes do florescimento e no florescimento são os períodos mais críticos, por estar se formando nesses estádios as estruturas reprodutivas e o grão de pólen.

Pereira et al. (1994) estudando os efeitos de diferentes teores de água no solo na cultura do arroz, observaram que o aumento da deficiência hídrica reduziu a área foliar, o comprimento e o número de panícula, o número de espiguetas por panícula, o peso de raízes, o massa seca da parte aérea, a produção de matéria seca total e a produtividade de grãos, e constataram que a influência negativa do regime hídrico sobre os componentes da produção obedeceu à seguinte ordem decrescente: número de panículas, número de espiguetas por panícula e massa de 1000 grãos.

Stone et al. (1996) observaram redução de 55 a 86% no número de grãos por panícula sob condições de déficit hídrico imposto na fase reprodutiva, assim como diminuição do número de panículas que é definido na fase vegetativa, devido ao fato do surgimento das panículas ter sido prejudicado pela deficiência hídrica.

Stone et al. (1998) estudando o efeito do estresse hídrico na fase reprodutiva nas cultivares de arroz Rio Parnaíba, do grupo tradicional, com perfilhos semi-abertos e folhas decumbentes, indicada para cultivos em regiões com risco de ocorrência de déficit hídrico, e Maravilha, grupo moderno com perfilhos semicompactos, folhas mais curtas e mais erectas, indicada para cultivo em regiões de baixa ocorrência de déficit hídrico ou sob irrigação por aspersão, observaram que independente da cultivar todos os componentes da produção foram afetados pelo estresse hídrico, sendo o número de grãos por panícula o mais afetado, pois o estresse foi imposto durante a fase reprodutiva, causando aumento da esterilidade das espiguetas, com conseqüente redução do número de grãos formados. Entretanto, a massa de 100 grãos foi o componente menos afetado pelo estresse hídrico, com redução de cerca de 10%, porque o estresse não se prolongou até o estágio de enchimento de grãos.

Arf et al. (2001) notaram que plantas de arroz sob condição de déficit hídrico apresentavam maior número de dias para o florescimento e colheita, menor altura, menor número de panículas, menor massa de 100 grãos e queda de produção em relação as plantas que não sofreram déficit hídrico.

Crusciol et al. (2003a) trabalhando com a cultivar Carajás, e Crusciol et al. (2003b) trabalhando com a cultivar IAC 201 em experimento de campo sob diferentes lâminas de água e precipitação pluvial natural observaram aumento no ciclo da cultura (número de dias para o florescimento e maturação), diminuição da matéria seca, da altura e da massa de 1000 grãos nas plantas que receberam apenas água das chuvas. Segundo os autores, o aumento do ciclo da cultura é devido ao aumento da duração da fase vegetativa, consequência do estresse hídrico ocorrido nessa fase, enquanto a altura da planta, em razão do menor alongamento celular devido à menor pressão de turgor, e a massa de 1000 grãos à ocorrência de veranicos durante a fase de maturação, principalmente na fase de translocação de carboidratos para a casca, que é de até quatorze dias após o florescimento.

A redução da altura da planta em função do déficit hídrico é devida à menor turgescência das células, a qual provoca redução da expansão celular e do fornecimento de substâncias reguladoras do crescimento, o que por sua vez provoca atraso no alongamento dos entrenós devido à menor taxa de alongamento do colmo (KRAMER, 1974), retardando a emissão das panículas, atrasando a floração e assim aumentando o ciclo da planta.

Plantas de arroz sob deficiência hídrica apresentaram aumento nos teores cálcio, magnésio e enxofre, enquanto os teores de fósforo e potássio se mantiveram inalterados (STONE, 1985). Segundo Fageria (1980), sob condições de deficiência hídrica, a adubação fosfatada não influencia a produtividade. Stone et al. (1996) e Stone et al. (1998) não observaram diferenças para os teores de potássio e nitrogênio em plantas de arroz sob condições de déficit hídrico em relação as plantas que não sofreram estresse. Entretanto, sob condições de estresse hídrico moderado, a adubação potássica aumentou a produtividade do arroz, mas a ausência de potássio não afetou significativamente a produtividade nas condições de elevada oferta hídrica.

Crusciol (2001) estudando sistema de cultivos, observaram que a produção de matéria seca e os valores N, P, K, Ca, Mg foram maiores no sistema irrigado do que em relação ao sistema de terras altas. Crusciol et al.(2003c) observaram que sob condições

de terras altas os teores de N, P e K na cultura do arroz não apresentavam diferenças em relação às plantas cultivadas sob irrigação, entretanto os teores de Ca e Mg diminuam sob condições de terras altas enquanto o de S aumentava. Crusciol et al. (2003d) não observaram diferença significativa para os teores de N, P, K, Ca e Mg nas plantas de arroz cultivadas sem irrigação suplementar em relação ao tratamento irrigado apenas o teor de S apresentou valor significativamente menor. Segundo os autores, apesar não haver diferenças significativas para N, P, K, Ca e Mg, esses foram sempre absorvidos em maiores quantidades no sistema irrigado.

4.5 Alterações bioquímicas em plantas submetidas ao estresse hídrico.

Entre os vários fatores limitantes da produção vegetal, o déficit hídrico ocupa posição de destaque, pois além de afetar as relações hídricas nas plantas, alterando-lhes o metabolismo, é fenômeno que ocorre em grandes extensões de áreas cultivadas (NOGUEIRA et al., 2001).

As plantas, quando expostas a diversos tipos de estresse ambiental, notadamente o hídrico, podem apresentar acúmulo de substâncias como prolina, poliaminas. O acúmulo desses compostos sob déficit hídrico tem sido associado com a tolerância das plantas a essa condição desfavorável, podendo representar um mecanismo regulador de perda de água mediante aumento da osmolaridade celular (FUMIS et al., 2002) e também como marcadores bioquímicos de alterações metabólicas geradas por diferentes tipos de estresse (Lima et al., 2003)

Esses compostos (solutos) gerados durante o período de estresse participam do ajustamento osmótico. O ajustamento osmótico diminui o potencial osmótico pelo aumento de solutos intracelulares, sendo reconhecido como um mecanismo adaptativo de muitas espécies ao estresse hídrico (HSIAO et al., 1993). Dentre os solutos orgânicos que se acumulam no citoplasma em decorrência ao estresse hídrico, destacam-se prolina (DINGHUHN et al., 1991; CHEN et al., 1993; KUZNETSOV et al., 1997; FUMIS et al., 2002) hexoses, sacarose e outros compostos nitrogenados (AZIZE et al., 1997), e íons como potássio.

Com o ajustamento osmótico, a pressão de turgor é mantida em nível relativamente alto, apesar da redução no potencial hídrico da folha (CUTLER et al., 1980a).

Para Hsiao et al. (1984), o ajuste osmótico pode diminuir o enrolamento das folhas de arroz, assim como retardar a morte da célula.

Em plantas de arroz sob condições de estresse hídrico, o ajustamento osmótico inicia-se com o potencial de água na folha na faixa de 0,4 a 0,5 MPa, enquanto o acúmulo de prolina inicia-se na faixa de 2,2 a 2,4 MPa, indicando que mecanismos diferentes controlam esses eventos (DINGHUHN et al., 1991).

A prolina é um aminoácido sintetizado a partir do glutamato e da arginina, sendo que os dois caminhos contribuem para síntese de prolina sob condições fisiológicas normais, entretanto, sob condições de estresse hídrico, o glutamato é o caminho preferencial (CHEN & KAO, 1993). Kir`yan & Shevyakova (1984) propuseram um esquema para biossíntese e degradação da prolina em plantas (Figura 2).

A prolina é acumulada no citoplasma (LEIGH et al., 1981) ocorrendo em folhas, colmos e raízes. A capacidade de acúmulo e a concentração de prolina decrescem constantemente com a idade da folha (SAWAZAKI et al., 1981 b).

Madruga et al. (1977) observaram um gradiente no teor de prolina em folhas de arroz submetidas a estresse hídrico, sendo os maiores valores encontrados na folhas mais novas. Segundo os autores, essa diferença está mais relacionada ao metabolismo da folha do que com seu teor de água. Lopes et al. (1991) observaram em plantas de feijão maior acúmulo de prolina no estágio de floração do que no vegetativo, e no cultivar tolerante maior teor em relação ao suscetível quando submetido à diminuição do potencial hídrico.

Alguns autores afirmam que a prolina teria as funções ligadas a processos de adaptação ao déficit hídrico (SINGH et al., 1973), porém outros sugerem ser a prolina indicador de estresse (BECKER & FOCK, 1986).

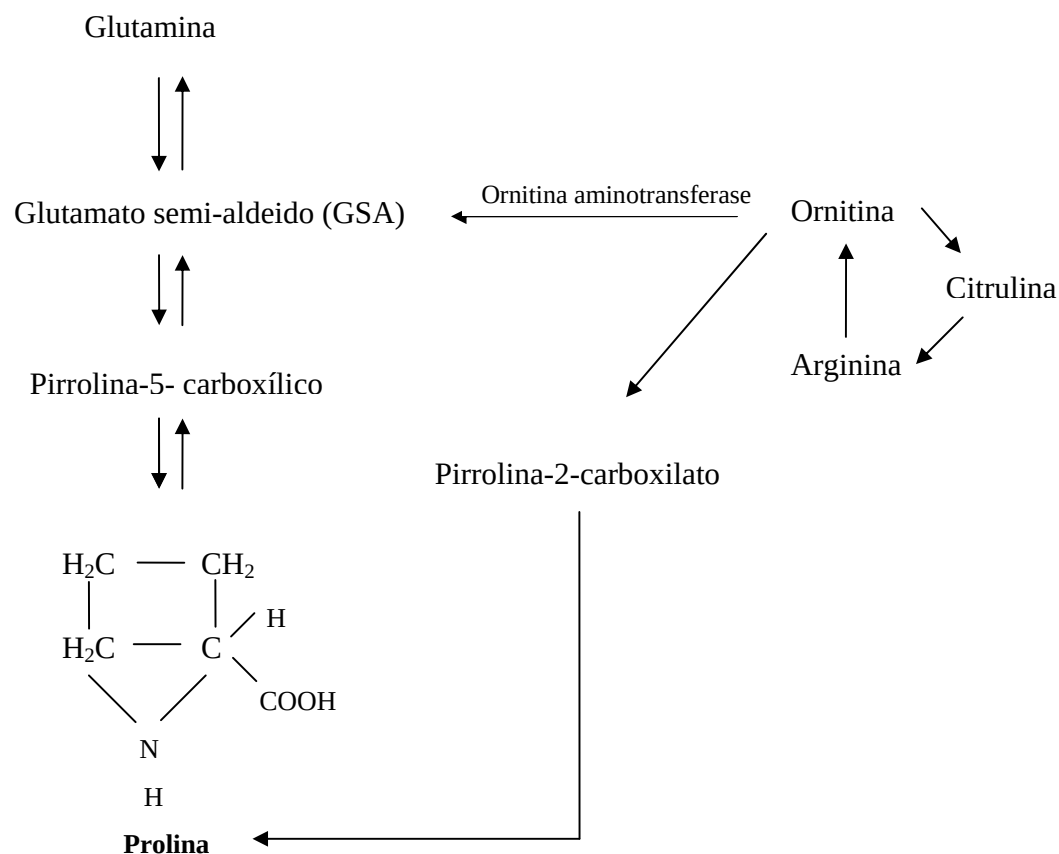


Figura 2. Esquema metabólico para biossíntese e degradação da prolina em plantas, proposto por Kir`yan & Shevyakova (1984).

A prolina teria a função de proteger as células dos processos de desnaturação sob condições de estresse hídrico e salino, devido à alta solubilidade em água (PALEG et al., 1984; SHEVYAKOVA, 1984) e ainda participar de um estoque de N e C que poderia ser utilizado depois do período de estresse (JAGER et al., 1977), servindo possivelmente como fonte de energia respiratória para o restabelecimento da planta após esse período.

A prolina possui alta solubilidade em água, apresentando uma parte hidrofílica e uma parte hidrofóbica, o que permite ligar-se com as superfícies residuais hidrofóbicas da proteína, não interferindo com as interações hidrofóbicas intramoleculares das

proteínas, evitando nesse caso, a sua desnaturação. A prolina agregada à proteína aumentaria a sua solubilidade e a protegeria da desnaturação sob condições de estresses (SHEVYAKOVA, 1984).

Embora o conteúdo de prolina aumente durante o período de estresse, esse pode ser insensível a estresse mediano ou moderado. Fumes et al. (2002) estudando os efeitos de diferentes tensões de água no solo e duração do período de estresse (30, 50, 70 e 90 dias) nos cultivares de trigo Anahauac e IAC 24, notaram aumento no conteúdo de prolina com o aumento da tensão de água no solo para ambas as cultivares, porém o conteúdo de prolina em função da duração de estresse foi diferente entre as cultivares. Para a cultivar Anahauac o maior conteúdo foi encontrado na fase de maturação (90 dias de estresses) diferindo estatisticamente dos demais períodos, enquanto para a cultivar IAC 24 não houve diferença entre os períodos estudados.

Dingkuhn et al., (1991) observaram diferenças entre cultivares do ecossistema de terras altas e ecossistema de várzea para o teor de prolina em função do déficit hídrico, sendo estes menores nos cultivares indicados para o ecossistema de terras altas. Os autores também observaram que algumas cultivares do ecossistema de terras altas apresentavam baixos teores de prolina mesmo sob condições de estresse hídrico.

Nogueira et al. (2001) observaram que em plantas de acerola as alterações na concentração de prolina só foram verificadas a partir do quinto dia de supressão hídrica, sendo registrado no décimo dia um aumento de 38,1 vezes maior que as plantas controle. Sawazaki et al. (1981b) na cultura do feijão, observaram aumento no teor de prolina após 11 dias sem irrigação, porém esse ocorreu em taxas diferentes em função dos cultivares estudados.

Lima et al. (2004) estudando os efeitos do estresse salino e teor de prolina nas cultivares de arroz Bojurú e Formosa, mais tolerantes à salinidade, e Agrisul, mais sensível, notaram que a cultivar Agrisul apresentavam maior teor de prolina, apesar de não haver evidências de maior acúmulo de prolina em espécies tolerantes que em espécies sensíveis. Entretanto Martinez et al. (1992), estudando duas variedades peruanas de batata durante 10 dias de estresse, constataram que a variedade mais tolerante havia acumulado mais que o dobro de prolina ($40 \text{ mg g}^{-1} \text{ M.S}$) até o décimo dia de estresse, quando comparada à mais sensível ($18 \text{ mg g}^{-1} \text{ M.S}$).

Diferenças no conteúdo de prolina em função de cultivares e período e duração do estresse foram observados em arroz (DINGKUHN et al., 1991; LIMA, et al., 2004), trigo (FUMIS, 1996) feijão (SAWAZAKI et al., 1981; LOPES & ARIETA-MAZA, 1991; ROSSI et al., 1997; GUIMARÃES, 2001) e acerola (NOGUEIRA et al., 2001).

Embora vários trabalhos tenham relacionado a função protetora da prolina na adaptação das células sob estresse osmótico, ainda existem dúvidas se o acúmulo desse composto nos tecidos das plantas proporciona vantagem adaptativa ou simplesmente é uma consequência acidental de outros estresses, induzindo mudanças no metabolismo (HARE et al., 1997). Para Sawazaki et al.(1981b) a capacidade de acumular prolina, observada durante o período de estresse hídrico, tem sido associada à tolerância das plantas a essa condição desfavorável. Segundo Heerden et al. (1996) o acúmulo de prolina durante o estresse hídrico pode ser um indicador potencial da tolerância à seca em cultivares de trigo.

A oxidação da prolina em folhas pode ter uma função reguladora, atuando como controle de síntese para manter a prolina livre em baixos níveis em tecidos túrgidos (STEWART, 1972). Entretanto, sob condições de déficit hídrico o aumento no teor de prolina pode ser atribuído ao aumento das atividades das enzimas envolvidas na síntese desse aminoácido, principalmente a ornitina aminotransferase, que catalisaria a transferência do grupo amino da ornitina para α -cetoglutarato envolvida na síntese deste aminoácido (KANDPAL et al.1982) ou na inibição da oxidação da prolina (KIYOSUE et al., 1996).

O estresse hídrico também é conhecido por causar danos oxidativos às plantas, levando ao aumento nos níveis de produção das espécies reativas de oxigênio (ROS). Essas espécies incluem radical superóxidos (O_2), radical hidróxidos (OH) e peróxidos de hidrogênio (H_2O_2), que são produzidos durante a atividade de transporte de elétron, assim como por um número de vias metabólicas, causando danos em biomolécula, tais como lipídios das membranas, proteínas, pigmentos dos cloroplastos, enzimas, ácidos nucléico e outros (VERMA et al., 2003).

Peróxido de hidrogênio é um constituinte do metabolismo oxidativo que pode reagir com radicais superóxidos e formar radical oxigênio livre e radicais hidroxilas, na presença de traços Fe ou Cu (BOWLER et al., 1992).

Os radicais hidróxidos produzidos iniciam reações próprias de propagação conduzindo à peroxidação dos lipídeos da membrana e destruição de proteína (HALLIWELL, 1987).

As espécies reativas de oxigênio são primeiramente produzidas nos cloroplastos e mitocôndrias atuando como compostos tóxicos alterando o metabolismo e induzindo à tolerância ao estresse oxidativo (LEVINE et al., 1994).

O sistema de defesa da planta aos danos oxidativos envolve enzimas como a catalase EC (1.11.1.6), peroxidases (1.11.1.7), superóxido desmutase (SOD, EC 1.15.1.1) e constituintes não enzimáticos como o α -tocoferol, ascorbate e glutathione redutase que retiram, neutralizam ou eliminam as espécies reativas de oxigênio (SHAH et al., 2001).

Os efeitos deletérios causados por radicais livres e pela peroxidação dos lipídeos podem ser reduzidos ou prevenidos pelo metabolismo oxidativo envolvendo enzimas antioxidantes como as peroxidases (CHANG et al., 1998). Assim, aumento na atividade da enzima peroxidase pode ser considerado uma ação protetora.

O grupo das peroxidases inclui enzimas capazes de catalisar a transferência do hidrogênio de um doador para o H_2O_2 , sendo que em plantas esse grupo de enzimas constitui uma proteção antioxidante (ROSSI et al., 1997). A atividade da peroxidase pode aumentar em plantas submetidas a diversos tipos de estresse (SIEGEL, 1993).

As peroxidases são proteínas que contêm heme e utilizam o H_2O_2 na oxidação de vários substratos orgânicos e inorgânicos (ASADA, 1994). As peroxidases podem localizar-se no citossol, vacúolo, parede celular, espaço extracelular e cloroplasto (VERMA et al.2003).

Verma et al. (2003) estudaram o efeito do chumbo na cultura do arroz sob a atividade de enzimas antioxidantes, observaram que a elevação nos níveis de chumbo na solução nutritiva causou aumento na atividade dessas enzimas, sugerindo provavelmente nova síntese de enzimas protéicas. Segundos os autores, há mudanças na atividade das enzimas em relação ao órgão, estágio de crescimento e cultivar.

Chandru et al. (2003) observaram aumento da atividade de enzimas antioxidantes em folhas de arroz sob condições de estresse, assim como mudanças na atividade dessas enzimas em diferentes estádios de crescimento.

4.6 Silício no solo e na planta

4.6.1 Silício no solo

Os solos das regiões temperadas apresentam teores de silício calculado como SiO_2 , que excede aos dos sesquióxidos de Al e Fe, o contrário acontecendo nos solos das regiões tropicais, estando presentes em minerais primários (ex: Feldspato e Quartzo) e secundários (ex: Caulinita e Montmorilonita), com resistência muito diferente ao intemperismo (MALAVOLTA, 1980). O óxido de silício (SiO_2) é o mineral mais abundante nos solos, constituindo a base da estrutura da maioria dos argilominerais. Todavia em razão do avançado grau de intemperização em que se encontram os solos tropicais, o silício é encontrado basicamente na forma de opala e quartzo ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) sendo esta última não disponível às plantas (BARBOSA FILHO et al., 2001).

Regiões chuvosas e com intensa intemperização apresentam baixos teores de silício no solo (TISDALE et al., 1993). Os óxidos de ferro e alumínio são os principais responsáveis pela adsorção do silício em solução (MENGEL & KIRKBY, 1987). Na solução do solo o ácido monossilícico comporta-se como um ácido fraco desprovido de cargas (MCKEAGUE & CLINE, 1963; e RAIJ & CAMARGO, 1973).

Savant et al. (1997a) atribuíram a queda da produtividade do arroz em várias regiões do mundo a uma possível diminuição do teor de silício no solo. Savant et al. (1997b) relacionaram três fatores que podem estar envolvidos nesse fenômeno: a) muitos solos de áreas produtoras de arroz de regiões tropicais e sub-tropicais apresentam graus variados de dessilificação; b) a cinética de dissolução do silício no solo é muito baixa; c) o silício da solução do solo é adsorvido por sesquióxidos que estão presentes em muitos solos tropicais.

A utilização intensiva dos solos, principalmente com culturas acumuladoras de silício, pode torná-los paulatinamente deficientes no elemento, pois a exportação do silício não é compensada via de regra com fertilizações silicatadas (LIMA FILHO et al., 1999).

O silício pode ser fornecido ao solo através da utilização da casca do arroz, prática bastante difundida na Ásia, ou através de materiais que contenham silício, como as escórias.

Escórias são resíduos da indústria do aço e ferro que apresentam em sua composição constituinte neutralizante (ALCARDE, 1992), especialmente Ca e Mg (PIAU, 1991), Si (WINSLOW, 1992) .

As melhorias nas características químicas do solo pela utilização de materiais silicatados como as escórias decorrem da ação neutralizante do SiO_3^{2-} e consequentemente, da elevação do pH e dos teores de Ca e Mg, CTC e V% e da diminuição da concentração de H + Al (PRADO & FERNANDES, 2000, 2003; PRADO et al., 2002).

Carvalho-Pupato et al. (2003) estudando o efeito da escória de alto forno no crescimento radicular e na produtividade do arroz de terras altas, observaram aumento do comprimento e superfície radicular em função das melhorias dos atributos químicos do solo como aumento do pH e dos teores de Ca e Mg do solo. Melo et al. (2003) utilizando silicato de cálcio como fonte de silício em estudo com capins do gênero *Brachiaria*, obtiveram aumento dos teores de silício no solo, porém o valor do pH não foi alterado devido ao balanceamento de cálcio e magnésio. Mauad et al. (2003b) obtiveram em um Latossolo Vermelho distróferico aumento do teor de silício no solo e na planta de arroz, em razão da aplicação de silicato de cálcio. Resultado semelhante foi observado por Alvarez (2003) avaliando o efeito da adubação com silicato de cálcio na linha de semeadura da cultura do arroz em um Latossolo Vermelho distróferrico tipo argiloso na região de Selvíria – MS.

Raij & Camargo (1973) encontraram valores variando de 1 a 43 mg dm^{-3} de Si em solos do Estado de São Paulo utilizando cloreto de cálcio como extrator, sendo os maiores valores presentes nos Podzólico argiloso e os menores nos Latossolo fase arenosa. Hossain et al. (2001) observaram resposta mais significativa da cultura do arroz a adubação silicatada em solos arenosos em comparação aos solos argilosos.

Korndörfer et al. (1999b) estudaram em casa de vegetação o efeito de diferentes doses de silicato de cálcio em diferentes tipos de solo sobre o arroz de terras altas (IAC 165), concluíram que o nível de suficiência de silício no solo para atingir 90% da produção máxima nessa condição foi de 9,8 mg dm^{-3} utilizando o ácido acético como extrator . Segundo os autores, a utilização de silicato pode melhorar os atributos químicos do solo, tais como, pH, saturação por base e os teores de Ca trocável.

Para Snyder (1991) solos com teores de silício menores que 10 mg dm^{-3} devem receber adubação silicatada, enquanto os solos com teores iguais ou maiores que

15 mg dm⁻³ não necessitariam de adubação silicatada. Korndörfer et al. (1999c) conduziram 28 experimentos de campo no período de 1992 a 1996 com a cultura do arroz, e sugeriram os níveis de silício no solo como baixo, menor que 6 mg dm⁻³, médio entre 6 a 24 mg dm⁻³, e alto acima de 24 mg dm⁻³.

4.6.2 Silício na Planta

As plantas absorvem o silício da solução do solo na forma de ácido silícico H₄SiO₄ (TISDALE et al., 1993). A absorção de silício pelas plantas de arroz parece ser um processo ativo, enquanto que para outras espécies como trigo, girassol e soja, esse mecanismo parece ser passivo (VORN, 1980). Segundo Mengel & Kirkby (1987), a absorção de silício é feita de forma passiva, com o elemento acompanhando o fluxo transpiratório, enquanto para Takahashi (1995), a absorção é feita de forma ativa, pois a absorção de silício não é inibida quando o fornecimento de água é interrompido temporariamente, sendo a absorção influenciada por inibidores da respiração.

A não identificação de uma única molécula orgânica que contenha ou exija silício ou ligações conhecidas na natureza de Si-O-C ou Si-C torna difícil a comprovação de essencialidade desse elemento para as plantas (EXLEY, 1998).

Segundo Deren et al. (1994) as plantas diferem bastante quanto à capacidade de absorver silício, assim, genótipos de arroz diferem no teor de silício, respondendo de modo diferente à aplicação do elemento.

Segundo Winslow (1992) genótipos de arroz do grupo Japônica apresentam concentração de silício de 50 a 100% mais alta que genótipos do grupo Índica, e cultivares tradicionais apresentam maior eficiência na absorção desse elemento. Barbosa Filho et al. (1998) encontraram diferenças significativas na porcentagem de silício na palha do arroz das cultivares Caiapó e Carajás e na linhagem CNA 7706.

Na planta (palha), os teores de silício são classificados como baixo, menor que 17g kg⁻¹, médio entre 17 a 34g kg⁻¹ e alto acima de 34g kg⁻¹ (KORNDÖRFER et al. 1999c).

O transporte do silício é feito pelo xilema e sua distribuição depende das taxas de transpiração dos diferentes órgãos da planta. O elemento é imóvel na planta e é depositado nas lâminas foliares, bainhas foliares, colmos, cascas e raízes (YOSHIDA et al., 1962), sendo que na lâmina foliar o acúmulo é maior que na bainha foliar (TANAKA & PARK 1966). Entretanto, para Winslow (1992) a casca do arroz é o órgão que mais acumula silício na planta, seguido pela folha bandeira e panícula.

Yoshida et al. (1962) e Agarie et al. (1998) observaram que a maior parte do silício absorvido pela planta é depositada na folha, nos tecidos da epiderme logo abaixo da cutícula, mais precisamente nas paredes celulares mais externas. Segundo Agarie et al. (1998a), o silício estaria envolvido na biossíntese dos componentes da parede celular, devido às folhas das plantas de arroz tratadas com silício apresentarem níveis mais altos de polissacarídeos do que as folhas das plantas que não foram tratadas com silício.

Para Yoshida et al. (1962) o silício acumulado nas lâminas foliares provavelmente forma uma dupla camada de sílica-celulose, conferindo resistência à penetração de hifas, diminuição da permeabilidade ao vapor de água limitando a perda de água através da cutícula. O silício depositado na epiderme das folhas de arroz está diretamente relacionado à resistência das plantas às doenças fúngicas, cujo mecanismo de resistência mais aceito é de natureza mecânica (BARBOSA FILHO et al., 2001).

Balastra et al. (1989) observaram que as plantas de arroz crescidas em solução nutritiva contendo silício apresentavam picos de silício maior na epiderme das lâminas foliares e nas células buliformes da parte superior da folha. Ainda segundo os autores, os picos de silício foram distintos em todos os pontos analisados na folha, embora o silício tenha sido maior em algumas células, entretanto nas plantas cultivadas em meio sem silício esses foram bem menores.

Savant et al. (1997b) afirmam que após o silício ser absorvido pelas plantas como ácido monossilícico e a água ser perdida pela transpiração, o silício fica depositado no tecido da epiderme das folhas das plantas de arroz.

O uso de silício tem promovido melhora na arquitetura da planta e aumento na fotossíntese (DEREN et al., 1994), resultado de uma menor abertura do ângulo foliar, deixando as folhas mais eretas, diminuindo o auto-sombreamento, sobretudo em condições de alta densidade populacional e altas doses de nitrogênio (YOSHIDA et al., 1969;

BALASTRA et al., 1989). Também aumenta a altura das plantas, consequência de maior comprimento da lâmina foliar (YOSHIDA et al., 1969; TAKAHASHI, 1995; FARIA, 2000), porém com pouca influência no acúmulo de matéria seca (TANAKA & PARK, 1966; LIANG et al., 1994; CARVALHO, 2000).

Mauad et al. (2003a) estudaram os efeitos da adubação nitrogenada e silicatada na cultivar de arroz IAC 201, não observaram efeito do silício no número e na fertilidade dos colmos, no número de panículas, no número de espiguetas total e granada, e na fertilidade das espiguetas e na altura da planta, mas apenas aumento da massa de 100 grãos e efeito no número de espiguetas chochas, que diminuíram na maior dose de nitrogênio com o incremento da adubação silicatada o que, segundo os autores, pode estar relacionado à melhoria da arquitetura da planta.

Camarim (2003) estudou os efeitos da adubação silicatada na cultivar de arroz Primavera obteve apenas aumento da massa de 1000 grãos, não ocorrendo resposta dos demais componente vegetativos e de produtividade.

Hossain et al. (2001) utilizando diferentes fontes de material silicatado na cultura do arroz, observaram aumento no número de panículas, no número de espiguetas, na fertilidade das espiguetas, massa de 1000 grãos e na produtividade.

Takatsuka et al. (2001) relacionaram a baixa porcentagem de espiguetas granadas aos baixos teores de silício na planta. Segundo Ma (2004), o número de espiguetas granadas é o componente da produção mais influenciado pelo silício, tanto em plantas de arroz quanto em cevada.

O silício pode aumentar o número e o tamanho dos aerênquimas nas plantas de arroz, estruturas responsáveis pela condução do oxigênio da parte aérea para as raízes, aumentando o poder oxidativo, diminuindo a toxidez de ferro e manganês na planta (HORIGUCHI 1988; BARBOSA FILHO, 1987; VERMAS & MINHAS 1989).

Carvalho (2000) não encontrou diferença estatística nos teores de N, P, K, Ca, Mg e S, em função das diferentes fontes e doses de silício na cultura do arroz IAC 202, em condições de campo.

Wallace (1989) em experimentos com aveia, arroz e tomate, concluiu que o nitrogênio diminuiu a concentração de silício nas plantas de arroz e aveia porém nenhuma diferença foi observada para o tomate, e que N-amônio é mais prejudicial que o N-

nítrico para a absorção de silício, em função de acidificar o solo e diminuir a disponibilidade de silício (WALLACE et al., 1976).

Plantas onde a absorção de cátions é igual a de ânions, a absorção de silício é relativamente pequena. Quando a absorção de cátions é maior que a de ânions, a solubilidade do silício é diminuída, entretanto, quando a absorção de ânions é maior que a de cátions, a solubilidade do silício é aumentada (WALLACE, 1992).

Savant et al. (1997b) atribuíram à adubação silicatada melhor utilização do nitrogênio, especialmente quando altas doses desse elemento são utilizadas, e aumento na disponibilidade de fósforo para as plantas.

4.6.3 Silício e Estresses.

Apesar de não fazer parte do grupo de elementos essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas, o silício tem proporcionado diversos efeitos benéficos para as plantas, em especial sob condições de estresse biótico ou abiótico (MA 2004).

Diversos efeitos têm sido relacionados à adubação silicatada em planta de arroz que podem aumentar a tolerância das mesmas sob condições adversas, tais como: redução da transpiração cuticular (YOSHIDA et al., 1959; Horiguchi, 1988, AGARIE et al., 1998b; MA et al., 2001), aumento da eficiência da utilização de água (GAO et al., 2004), aumento do poder oxidativo das raízes (Horiguchi, 1988), diminui a incidência de doenças (DATNOFF et al., 1991; KONDÖRFER et al., 1999; SANTOS et al., 2003), redução da toxidez por sódio (YEO et al., 1999). A redução da transpiração pode chegar a 30% nas plantas tratadas com silício (YOSHIDA et al., 1959; Horiguchi 1988; e AGARIE et al. 1998) Segundo Agarie et al. (1998) a camada cuticular tem um importante papel na regulação estomatal, devido à manutenção da umidade nas células da epiderme junto às células guarda do aparelho estomático.

Um importante fator para o desenvolvimento das espiguetas, é manter a condição de umidade dentro da casca (SEO & OHTA, 1982). O conteúdo de silício na casca do grão de arroz pode ser maior que 7% e teria a função de manter a umidade, reduzindo os

efeitos do estresse hídrico, pois assim como nas folhas, o silício forma uma dupla camada entre a epiderme e parede celular (MA, 2004).

Gao et al. (2004) observaram que plantas de milho sob condições de estresse hídrico induzido por PEG 6000 (polietileno glicol) e adubadas com silício apresentavam maior eficiência do uso de água, menor transpiração e maior resistência estomática. Segundo os autores, a hipótese que explicaria esse fato seria a redução da transpiração, devido ao aumento da sensibilidade estomática e da resistência cuticular, porém o mecanismo que regula a resposta estomatal permanece não entendido e pouco estudado.

Kondorfer et al. (2002) avaliaram quatro doses de silício na forma de silicato de cálcio em dois solos de cerrado de diferentes texturas sobre a produção de grão de arroz e a tolerância ao déficit hídrico, imposto através de diferentes níveis de água no solo (60, 70 e 80% C.C.). Segundo os autores, o silício promoveu aumento na produção de grão e na tolerância à falta de água, sendo os efeitos mais pronunciados nos menores níveis de água.

Em estudo com capins do gênero *Brachiaria* e doses de silício sob diferentes níveis de água no solo (60 e 80 % C.C.), Melo et al. (2003) observaram que a aplicação de silício aumentou os teores do elemento nas plantas, mas não modificou a tolerância dos capins ao déficit hídrico e não afetou a produção de matéria seca.

Plantas de pepino infectado com *Pythum ssp.* cultivadas em solução nutritiva contendo 100 ppm de silício, apresentaram aumento na atividade das enzimas chitinase, peroxidase e polifenóis oxidase, sendo mais intensa nas duas últimas. Esses resultados parecem sugerir que o silício está envolvido no metabolismo das plantas expostas a estresse biótico ou abiótico (CHERIF et al. 1994).

O silício aumentou os níveis de enzimas antioxidantes, a capacidade fotossintética e o conteúdo de clorofila em gramados sob condições de baixa umidade. O maior nível de enzimas antioxidantes em plantas tratadas com silício parece criar condições de tolerância a este tipo de estresse (SCHMIDT et al. 1999).

O aumento no crescimento de certas espécies de gramas quando adubadas com silício é devido ao aumento da elasticidade do tecido e ao maior volume de água no simplasto (WANG et al., 1998). Entretanto, Trenhom et al. (1999) observaram que gramas tratadas com silício apresentavam menor coloração, menor densidade de perfilhamento e menor resistência ao pisoteio do que as plantas tratadas com potássio.

Liang (1999) observou que plantas de arroz crescidas em solução nutritiva contendo silício apresentavam atividade de enzimas antioxidantes 24% maior que as plantas crescidas em meio sem silício, sob condições de estresse salino. Segundo os autores, o silício mantém a integridade da membrana, diminuindo sua permeabilidade.

Segundo Wang & Galletta (1998), o silício aumenta o conteúdo de glicolipídeos e fosfolipídeos, o que estaria relacionado ao incremento do conteúdo de clorofila e a maior estabilidade e funcionamento da membrana plasmática. Segundo Liang et al. (1996), o silício aumentaria a taxa fotossíntese em função de alterações na arquitetura da plantas e diminuiria a permeabilidade da membrana plasmática em plantas sob condições de estresse.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Localização dos experimentos

Foram instalados e conduzidos dois experimentos, em casa de vegetação pertencente ao Departamento de Produção Vegetal da Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Botucatu.

5.1.1 EXPERIMENTO 1. Desenvolvimento de plantas de arroz sob condições de déficit hídrico e adubação silicatada.

5.1.1.1 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados em esquema fatorial 2 x 2 x 2 com quatro repetições. Os tratamentos empregados constituíram – se de duas cultivares (Caiapó e Maravilha), duas tensões de água (-0,025 MPa e -0,050 MPa) e dois níveis de adubação silicatada (0 e 350 kg ha⁻¹de Si).

5.1.1.2 Descrição do tipo de solo

As amostras de solo utilizado no experimento foram provenientes de um Latossolo Vermelho Distroférrico (EMBRAPA, 1999), de textura média, coletado na camada de 0 - 0,20 m, na unidade “Patrulha” da Faculdade de Ciências Agronômicas - Campus de Botucatu. A análise química do solo foi realizada segundo a metodologia proposta por Raij et al. (2001), cujos resultados estão contidos na Tabela 1, exceto para silício que foi determinado segundo Korndorfer et al. (2004).

Tabela 1 – Atributos químicos da amostra de solo na camada de 0 - 0,20 m.

Ph	MO	Si	P _{resina}	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	H+Al	Al ⁺⁺⁺	V
(CaCl ₂)	(g dm ⁻³)	---- (mg dm ⁻³)----		-----		mmol _c dm ⁻³ -----			%
4,0	8	3,2	3,0	0,6	11	2	72	9	16

5.1.1.3 Condução do primeiro experimento

Cada unidade experimental foi constituída por caixa plástica com dimensões internas de 40x40x25cm, com 38,5 kg de solo, constando de 1 linha de semeadura de 0,40m de comprimento.

A calagem foi realizada 30 dias antes da semeadura, de modo a elevar a saturação por base valor a 60% (Raij et al., 1996). Utilizou-se calcário dolomítico com PRNT de 91 %, sendo que cada vaso recebeu 78,9 g de calcário, o equivalente a 4,1 t ha⁻¹. Utilizou-se a fonte ácido silícico da Vertex como fonte de silício, com as seguintes características químicas: teor de silício (Si) 46,13 % (98,8% SiO₂), resíduo por fluoretação (como SO₄) 1,2%, Arsênio 0,0001%, Cobre 0,001% Chumbo 0,0005% e Zinco 0,001%.

A adubação de semeadura constou de 50 mg N kg⁻¹ de solo sendo utilizado a uréia (45% de N) como fonte de nitrogênio; 150 mg P kg⁻¹ de solo e 150 mg K kg⁻¹ de solo, 1 mg B kg⁻¹ de solo e 5 mg Zn kg⁻¹ de solo utilizando-se superfosfato simples (18% de P₂O₅), cloreto de potássio (60% de K₂O); ácido bórico (PM 61,83) e cloreto de zinco (PM

136,28). O silício foi incorporado ao solo 2 dias antes da semeadura nas dose de 12,17 g do produto por caixa (unidade experimental). Aos 30 dias após a emergência foi realizada adubação de cobertura com nitrogênio e potássio na dose de 30 mg N kg⁻¹ de solo e de 30 mg K kg⁻¹ de solo utilizando uréia e cloreto de potássio, respectivamente.

A semeadura foi realizada no dia 17/12/02, utilizando 50 sementes em 0,40 m por unidade experimental. Aos cinco (5) dias após a semeadura, quando 50% das plântulas de cada unidade experimental apresentavam o coleoriza acima do nível do solo, considerou-se a data de emergência (22/12/02). Realizou-se um desbaste aos nove dias após a emergência (DAE), de modo que cada unidade experimental apresentasse 30 plantas.

Para o monitoramento da tensão de água do solo utilizou-se micro tensiômetros instalados a 0,15 m de profundidade em cada unidade experimental. Em cada irrigação foram aplicadas lâminas de água de 1,32 e 1,63 litros sempre que a tensão de água no solo atingia valores de -0,025 MPa e -0,050 MPa, respectivamente. As diferenças nos tratamentos de tensão de água no solo tiveram início 17 dias após a emergência.

5.1.1.4. Variáveis analisadas.

5.1.1.4.1 Variáveis bioquímicas

Amostras da 1° folha completamente expandida do ápice para base das plantas de arroz de cada tratamento foram coletadas nas fases vegetativa e reprodutiva para determinação das variáveis bioquímicas. As folhas foram picadas, pesadas e embrulhada em papel manteiga e acondicionadas em nitrogênio líquido e em seguida armazenado em freezer para posteriores determinações.

5.1.1.4.1.1 Determinação do teor de prolina

Foi utilizado o método descrito por Torello & Rice (1986), com pequenas modificações. Amostras de 0,3 g de peso fresco do tecido vegetal da 1° folha completamente expandida do ápice para base das plantas de arroz, foram homogeneizadas em solução de 10 mL de ácido sulfosalicílico a 3% e, em seguida, submetidas à centrifugação a 5000 rpm durante vinte minutos. Foi retirada alíquota de 2 mL do sobrenadante e colocada em tubo de ensaio, adicionando-se 2 mL de ninhidrina ácida (BATES et al., 1973) e 2 mL de

ácido acético glacial. Em seguida as amostras foram colocadas em banho-maria em ebulição por 1 hora e em seguida resfriado em banho de gelo. Após o resfriamento, a leitura foi realizada a 520 nm em fotolorimetria. O valor da absorbância foi comparado com curva-padrão de prolina e os resultados obtidos expressos em micromol de prolina por g de material fresco.

5.1.1.4.1.2 Atividade da enzima peroxidase (POD) (EC 1.11.1.7)

Amostras de 0,3 g de peso do fresco de tecido vegetal de folhas completamente expandidas, de cada tratamento, foram trituradas em 5 mL de solução tampão fosfato 0,2M pH 6,7 e centrifugado a 10.000 rpm por 10 minutos a 4°C obtendo-se dessa maneira o extrato bruto, o qual foi utilizado como fonte da enzima POD, segundo método proposto por Lima (1994). A atividade específica da peroxidase foi expressa em miligrama de proteína por grama de peso fresco.

5.1.1.4.2 Altura da planta (cm):

Altura da planta foi determinada, medindo-se a distância entre o colo da planta e a extremidade superior da panícula no momento da colheita. Sendo representada pela média das cinco plantas do vaso.

5.1.1.4.3 Número de colmos por metro quadrado

Contagem do número de colmos existente em cada unidade experimental, e calculado para metro quadrado no momento da colheita.

5.1.1.4.4 Porcentagem de colmos férteis

Determinado no momento da colheita, em cada unidade experimental, através da relação: número de panícula por unidade experimental pelo número de colmos x 100.

5.1.1.4.5 Número de panículas

Contagem do número de panículas contidas em cada unidade experimental, e calculado por metro quadrado no momento da colheita.

5.1.1.4.6 Número total de espiguetas por panícula

Contagem do número de espiguetas de 10 panículas por unidade experimental, coletadas no momento da avaliação do número de panícula por metro quadrado.

5.1.1.4.7 Número de espiguetas granadas e chochas por panícula

Determinada em 10 panículas coletadas ao acaso. As panículas foram trilhadas manualmente e as espiguetas separadas através do fluxo de ar.

5.1.1.4.8 Fertilidade das espiguetas

Determinada para cada unidade experimental a partir da relação: número de espiguetas granadas por panículas pelo número total de espiguetas por panícula x 100.

5.1.1.4.9 Massa de 1000 grãos

Determinada através da coleta ao acaso e da pesagem de oito amostras de 1000 grãos (13% base úmida), segundo Brasil (1992).

5.1.1.4.10 Produtividade de grãos

Determinada através da utilização de todas as panículas contidas em cada unidade experimental. As panículas foram separadas manualmente e o material foi limpo, separando palha e os grãos chochos através do fluxo de ar. Em seguida, determinou-se o peso dos grãos colhidos e foi calculada a produtividade de grãos e os dados transformados por metro quadrado a 13% de umidade.

5.1.1.4.11 Análise foliar

Foram coletadas 50 folhas bandeira ao acaso de cada unidade experimental no período do florescimento, quando 50% das panículas estavam visíveis (Raij et al. 1996). O material coletado foi seco em estufa a 60°C até atingir peso constante, seguido de moagem. Da matéria seca das folhas foram determinados os macronutrientes, segundo metodologia descrita por Malavolta et al. (1997).

5.1.1.4.12 Determinação do silício no tecido vegetal

Para análise de silício foi utilizada a parte aérea da planta de arroz (colmo + folhas), que foi coletada no final do experimento. O material foi seco em estufa a 60°C até atingir peso constante, moído e acondicionado em embalagens plásticas. Utilizou-se a metodologia descrita por Korndörfer et al. (2004). Amostras de 0,1 g da parte aérea foram colocadas em tubos plásticos, seguido do acréscimo de 2 mL de H₂O₂ p.a (30%) e 3 mL de NaOH (1:1) para digestão. Os tubos foram agitados e colocados em banho-maria a 90°C por uma hora. Durante esse período os tubos foram agitados, para evitar o extravasamento do conteúdo devido à intensa oxidação gerada pela NaOH. Em seguida os tubos foram levados para autoclave por um período de 1 hora a 123°C e 1,5 atm de pressão. Após retirar os tubos da autoclave adicionou 45 mL de água destilada e transferiu o conteúdo para um recipiente de plástico (copo plástico), deixando em repouso até o dia seguinte.

Uma alíquota de 1 mL da matéria digerida foi retirada e colocada em copos plásticos. Em seguida acrescentaram-se 19 mL de água destilada, 1 mL de HCl (1:1) e 2 mL de molibdato de amônio, seguido de uma leve agitação. O Si presente no material transforma-se em H₄SiO₄ que desenvolve a cor amarela na presença do agente complexante, que é o molibdato de amônio em meio ácido.

Depois de 5 a 10 minutos, adicionaram-se 2 mL de ácido oxálico, procedendo-se novamente uma leve agitação. A leitura foi feita em espectrofotômetro no comprimento de onda de 410 nm, após dois minutos.

5.2 Experimento 2. Componentes da produção e marcha de absorção e acúmulo de silício em função da aplicação de calcário e silicato de cálcio.

5.2.1 Delineamento experimental e tratamentos empregados

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 2x 2 x 7 com quatro repetições totalizando 112 unidades experimentais.

Os tratamentos empregados constituíram-se de duas cultivares de arroz (Caiapó e Maravilha), da aplicação de silício (0 e 373 kg ha⁻¹ de Si) e épocas de coleta, (22, 50, 61, 85, 95 102 e 131 dias após a emergência (DAE) para cultivar Caiapó e aos 22, 55,

77, 89, 100 107 e 148 DAE para cultivar Maravilha), próximos aos estádios de início do perfilhamento, perfilhamento máximo, diferenciação do primórdio da panícula, emborrachamento, antese, grão leitoso e maturação fisiológica.

5.2.2 Descrição do tipo de solo.

As amostras de solo utilizado no experimento foram provenientes de um Latossolo Vermelho Distroférrico (EMBRAPA, 1999), coletado na camada de 0 - 0,20 m, na unidade “Patrulha” da Faculdade de Ciências Agronômicas - Campus de Botucatu. A análise química do solo foi realizada segundo a metodologia proposta por Raij et al. (2001), cujos resultados estão contidos na Tabela 2, exceto para silício, que foi determinado segundo Korndorfer et al. (2004)

Tabela 2 . - Atributos químicos da amostra de solo na camada de 0 - 0,20 m

pH	MO	Si	P _{resina}	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	H+Al	Al ⁺⁺⁺	V
(CaCl ₂)	(g dm ⁻³)	---(mg dm ⁻³)---		-----		mmol _c dm ⁻³	-----		%
4,3	29,1	3,4	2,5	1,4	13,6	0,73	63	12	20

5.2.3 Instalação e condução do experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação. Cada unidade experimental foi constituída por vasos plásticos com capacidade para 10 L contendo 9,6 kg de solo. Os vasos eram movimentados aleatoriamente dentro da casa de vegetação ao menos 2 vezes por semana.

A calagem foi realizada 10 dias antes da semeadura, de modo a elevar a saturação por bases a 60% (Raij et al., 1996) utilizando carbonato de cálcio para os tratamentos sem silício e silicato de cálcio e magnésio para o tratamento com silício. Utilizou-se calcário dolomítico com PRNT de 93 %, CaO 39% e MgO 13% sendo que cada vaso recebeu 13,62 g de calcário, o equivalente a 3,40 t ha⁻¹. O silicato de cálcio e magnésio apresentava PRNT de 91, CaO 42% e MgO 12% sendo que cada vaso recebeu 13,90 g de silicato, o equivalente a 3,48 t ha⁻¹. Na Tabela 3 encontra-se a composição química do silicato utilizado.

A semeadura foi realizada no dia 14/01/04, utilizando 15 sementes viáveis por vaso. Aos sete (7) dias após a semeadura, quando 50% das plântulas de cada unidade experimental apresentavam o coleórida acima do nível do solo, considerou-se a data de emergência (21/01/04). Realizou-se um desbaste aos sete dias após a emergência (DAE), de modo que cada unidade experimental ficasse com 3 plantas em cada unidade experimental, exceção as plantas da primeira coleta que ficaram com 10 plantas, de modo a ter material vegetal suficiente para as análises propostas.

O calcário e o silicato foram incorporados ao solo 10 dias antes da semeadura. A adubação de semeadura constou de 50 mg N kg⁻¹ de solo, 150 mg P kg⁻¹ de solo e 100 mg K kg⁻¹ solo e 1 g de FTE Br-12, utilizando-se uréia (45% de N), superfosfato simples (18% de P₂O₅), cloreto de potássio (60% de K₂O) como fonte nitrogênio, fósforo, potássio e micronutrientes. Aos 30 dias após a emergência foi realizada adubação de cobertura com nitrogênio e potássio na dose de 50 mg N kg⁻¹ de solo e 50 mg K kg⁻¹ de solo.

Para determinação do acúmulo de silício na parte aérea das plantas, os materiais foram separados em folha + bainha e colmo, e acondicionados em sacos de papel e colocados em estufa até atingir a 60°C. Na última coleta realizou-se a determinação dos componentes da produção.

Tabela 3. Composição química do silicato de cálcio e magnésio

CaO	MgO	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	Mo	Zn
----- % -----								----- µg g ⁻¹ -----	
42	12	23	0,42	0,19	0,37	11	1,8	0,40	0,13

Fonte: Universidade Federal de Viçosa (MG)

5.3 Cultivares

5.3.1 Caiapó

O cultivar Caiapó lançado no ano de 1992 é proveniente do Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão – EMBRAPA, resultado do cruzamento (IRAT 13 X Beira Campo) X (CNA x 104-B18-Py-2B X Pérola). Pertence ao grupo tradicional, com maior tolerância a deficit hídrico, apresenta porte médio (110-130 cm), ciclo médio (128 dias), 95-100 dias da emergência ao florescimento, grãos tipo longo, moderadamente suscetível à brusone (*Pyricularia oryzae* Cav.) e ao acamamento (EMBRAPA 2001; BRESEGHELLO et al., 1998).

5.3.2 Maravilha

O cultivar Maravilha lançado no ano de 1996, é proveniente do Centro Nacional de pesquisa de Arroz e Feijão – EMBRAPA, resultado do cruzamento (TO X 1010-49-1 X IRAT 121 X COLOMBIA 1 X M 312 A). Pertence ao grupo moderno, apresenta porte baixo (80–100 cm), ciclo médio (125-132 dias), 95-100 dias da emergência ao florescimento, grãos tipo longo-fino (agulhinha), resistência à brusone (*Pyricularia oryzae* Cav.) (EMBRAPA 2001; BRESEGHELLO et al., 1998).

5.4 Variáveis analisadas.

5.4.1 Número de colmos por planta

Contagem do número de colmos existente em cada unidade experimental e calculado por planta no momento da colheita.

5.4.2 Porcentagem de colmos férteis: Realizado como descrito no experimento I

5.4.3 Número de panículas por planta

Contagem do número de panículas contidas em cada unidade experimental e calculado por planta no momento da colheita.

5.4.4 Número total de espiguetas por panícula: Realizado como descrito no experimento I

5.4.5 Número de espiguetas granadas e chochas por panícula: Realizado como descrito no experimento I

5.4.6 Fertilidade das espiguetas: Realizado como descrito no experimento I

5.4.7 Massa de 1000 grãos: Realizado como descrito no experimento I

5.4.8 Produtividade de grãos: Realizado como descrito no experimento I e os dados transformado para grama por planta a 13% de umidade..

5.4.9 Determinação do silício no tecido vegetal. Realizado como descrito no experimento I

5.5 Análise estatística

Os resultados obtidos no Experimento 1 foram submetidos à análise de variância. As médias dos tratamentos foram comparadas pelo Teste de DMS a 5% de probabilidade.

Os resultados obtidos no Experimento 2, foram submetidos à análise de variância. As médias dos tratamentos foram comparadas pelo Teste de DMS a 5% de probabilidade.

Com os resultados de matéria seca e de silício durante o ciclo dos cultivares de arroz Caiapó e Maravilha realizou-se o ajuste de um modelo de acúmulo de massa matéria seca e de silício, conforme a equação:

$$Y = A/(1 + \text{EXP}(-(X - X_0)/B)),$$

em que: Y é a massa de matéria seca (g planta⁻¹) ou a quantidade de silício acumulado da parte aérea da planta de arroz em mg planta⁻¹; X, dias após emergência.

Os parâmetros A , X_0 e B foram estimados pelo programa SigmaPlot. As equações foram obtidas para descrever a variação, no tempo, da massa de matéria seca e da quantidade acumulada de silício na parte aérea das plantas de arroz até a época de colheita.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Experimento 1: Desenvolvimento de plantas de arroz sob condições de déficit hídrico e adubação silicatada.

6.1.1 Características das plantas

Os resultados do número de colmos, colmos férteis (%), número de panícula por metro quadrado, número de espiguetas: totais, granadas e chochas e fertilidade das espiguetas (%) estão apresentados na Tabela 4. Houve efeito significativo de cultivares para número de colmos e número de panícula por metro quadrado, para o número de espiguetas chochas e fertilidade das espiguetas. Para tensão de água no solo só não houve efeito significativo para o número de colmos férteis, enquanto que para a dose de silício houve efeito significativo para o número de espiguetas chochas.

O número de colmos/m² (Tabela 4) não é um componente da produção, porém ele indica a capacidade de perfilhamento da cultivar, sendo influenciado por fatores como densidade e profundidade de semeadura e pela capacidade genética da cultivar.

Tabela 4. Número de colmos, colmos férteis (%), número de panícula por metro quadrado, número de espiguetas: totais, granadas e chochas e fertilidades das espiguetas (%) em função de cultivares, tensão de água e doses de silício.

Tratamentos ⁽¹⁾	Colmos n° m ⁻²	Colmos Férteis %	Panícula n° m ⁻²	Espiguetas			Fertilidade das espiguetas %
				Total	Granadas	Chochas	
Cultivares				-----	n°-----		
Caiapó	510 b	88 a	452	105 a	64 a	41	54
Maravilha	650 a	86 a	557	107 a	62 a	45	46
Tensão (MPa)							
-0,025	667 a	91 a	604	137 a	109	28	70
-0,050	492 b	82 a	404	74 b	17	58	21
Doses de Silício (kg ha ⁻¹)							
0	567 a	86 a	487 a	105 a	64 a	41	50 a
350	591 a	88 a	522 a	108 a	62 a	45	49 a
Valores de F ⁽²⁾							
Bloco	0,49 ns	0,34 ns	0,62 ns	0,74 ns	1,64 ns	0,097 ns	1,05 ns
Cultivar (C)	27,18**	0,27 ns	16,33**	0,16 ns	1,52 ns	10,83**	59,92**
Tensão (T)	43,13**	3,70 ns	58,97**	115,09**	2876,4**	469,3**	3491 **
Silício (S)	0,84 ns	0,25 ns	1,83 ns	0,26 ns	1,03 ns	12,06**	3,07 ns
C x T	2,53 ns	0,67 ns	5,73*	3,19 ns	32,87**	0,13 ns	29,70**
C x S	0,10 ns	0,62 ns	0,31 ns	1,86 ns	1,70 ns	18,46**	2,89 ns
T x S	0,006 ns	0,71 ns	0,84 ns	0,16 ns	3,04 ns	17,68**	4,56*
C x T x S	0,040 ns	0,042 ns	0,19 ns	0,20 ns	0,021 ns	2,42 ns	0,52 ns
CV	12,78	13,94	14,60	15,63	7,69	8,93	5,55

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste DMS a 5%.

⁽²⁾ **, * e ns significativos a 1% e 5% - ns: não significativo.

A cultivar Maravilha apresentou maior número de colmos/m² em relação à Caiapó (Tabela 4). Esse resultado está relacionado a característica genética das

cultivares. Cultivares do grupo moderno como a Maravilha passaram por melhoramento genético visando alta produtividade, selecionando características para tal, como melhora na arquitetura da planta e maior capacidade de perfilhamento (BRESEGHELLO et al., 1998; EMBRAPA, 2001).

A planta de arroz é composta por um colmo principal e um número variável de colmos primários e secundários denominados perfilhos (PINHEIRO, 1999) que surgem das gemas axilares na base do colmo principal durante a fase vegetativa. O aumento da tensão de água no solo diminuiu o número de colmos por metro quadrado (Tabela 4), o que está relacionado à menor disponibilidade de água para as plantas, diminuindo assim a diferenciação das gemas da base do colmo. Segundo Fornasieri Filho & Fornasieri, (1993) a deficiência hídrica pode diminuir o perfilhamento, afetando o número de colmos, pois causa dormência das gemas axilares. Giudece et al. (1973) observaram que, sob condições de deficiência hídrica as plantas de arroz apresentavam redução no número de colmos férteis.

Não houve efeito da adubação silicatada no número de colmos. Esta variável é dependente de fatores como densidade de semeadura e poder germinativo, por fatores genéticos como a capacidade de perfilhamento, e por fatores nutricionais. Sabe-se dos efeitos do silício no aumento a tolerância a pragas e doenças e na redução da transpiração, porém nenhum efeito é relatado quanto aos efeitos do silício nos fatores acima mencionados. Esse resultado está de acordo com Mauad et al. (2003), que trabalhando com a cultivar arroz de terras altas IAC 201, e Alvarez (2003) com a cultivar de arroz Primavera, não encontraram resposta significativa da adubação silicatada para o número de colmos por metro quadrado.

A fertilidade dos colmos expressa o número de colmos que produziram panícula. Não houve efeito significativo dos tratamentos para esta variável.

Para o número de panículas/m² houve efeito da interação cultivar x tensão de água no solo. Analisando os resultados de tensão de água no solo dentro de cultivar (Tabela 5), verifica-se que o aumento da tensão reduziu o número de panículas por metro quadrado, independente da cultivar. Assim, sob condições de déficit hídrico, ocorre menor transporte de soluto para as partes em crescimento e desenvolvimento das plantas, o que pode ter contribuído para o menor número de panículas na menor disponibilidade hídrica. A ocorrência de déficit hídrico durante a diferenciação da gema vegetativa em reprodutiva diminui o número de panícula por área (CRUSCIOL et al., 2003b). Segundo Stone et al.

(1996) o déficit hídrico em plantas de arroz diminui o número de panícula por metro quadrado devido à diferenciação da panícula ser prejudicada. Esse resultado está de acordo com os encontrados por Pinheiro et al. (1985), Pereira et al. (1994), Stone et al. (1996) e Crusciol et al. (2003a).

Tabela 5 Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente ao número de panícula por metro quadrado.

Cultivares	Tensão de água no solo	
	-0,025 MPa	-0,050 MPa
	----- número de panícula/m ² -----	
Caiapó	520 b A	383 a B
Maravilha	688 a A	426 a B

Letras minúsculas comparam cultivares e letras maiúsculas comparam tensão de água.

Quanto ao desdobramento de cultivares dentro de tensão de água no solo, observa-se efeito da cultivar Maravilha na menor tensão de água no solo (Tabela 5). O maior número de panículas encontrado na Maravilha está relacionado ao maior número de colmos produzido por esta cultivar (Tabela 4), decorrente da maior capacidade de perfilhamento que as cultivares do grupo moderno apresentam (EMBRAPA, 2001). Não houve diferença significativa entre as cultivares sob condições de maior tensão de água, porém ambas reduziram o número de panículas sob condição de estresse hídrico. Stone et al. (1998) trabalhando com cultivares do grupo tradicional (Rio Parnaíba) e moderno (Maravilha) observaram que, independente da cultivar, todos os componentes da produção foram afetados pelo estresse hídrico.

Não houve efeito da adubação silicatada para o número de panícula/m². O número de panículas é influenciado por fatores como a densidade de semeadura, o poder germinativo da semente e a capacidade de perfilhamento da cultivar, onde pouco se conhece ou mesmo sabe-se do efeito do silício. Segundo Ma et al (1989), o silício tem pouco efeito na fase vegetativa, onde este componente é definido. Esses resultados corroboram com os encontrados por Mauad et al (2003), Alvarez (2003), Carvalho (2000) e Deren et al (1994).

O número total de espiguetas é o segundo componente da produção. Esse componente começa a ser definido com a diferenciação da gema vegetativa em reprodutiva, processo denominado de iniciação do primórdio floral (FORNASIERI FILHO & FORNASIERI, 1993; MACHADO, 1994; PINHEIRO, 1999). Esse componente é influenciado por fatores genéticos e por condições externas vigentes durante a fase reprodutiva, mais precisamente de 32 a 5 dias que antecedem o florescimento (YOSHIDA, 1981).

Observa-se na Tabela 4 apenas efeito da tensão de água no solo para o número total de espiguetas. O aumento da tensão de água reduziu o número total de espiguetas em aproximadamente 46%. A redução do número total de espiguetas é devida à diminuição no número de ramificações de primeira e segunda ordem da raquis que está sendo formando neste estágio de desenvolvimento, diminuindo desta forma os pontos de surgimento das espiguetas. Segundo O'Tolle & Chang (1979) a diminuição no número total de espiguetas sob condições de déficit hídrico é devida à redução no número de primórdios das raquis que se desenvolvem.

Apesar das cultivares utilizadas neste estudo serem de grupos diferentes (Caiapó - tradicional e Maravilha - moderno), ambas não diferiram quanto ao número total de espiguetas (Tabela 4).

Para o número de espiguetas granadas houve interação entre cultivar x tensão de água no solo, não havendo efeito de doses de silício (Tabela 4). Analisando o desdobramento de tensão de água no solo dentro de cultivares (Tabela 6), observa-se redução do número de espiguetas granadas com o aumento da tensão de água para ambas as cultivares. A redução no número de espiguetas granadas seguiu a mesma tendência do número total de espiguetas. Esse resultado está de acordo com os encontrados por Stone et al. (1984) que também observaram diminuição do número de espiguetas granadas sob condições de menor disponibilidade hídrica.

Tabela 6 Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente ao número de espiguetas granadas/panícula.

Cultivares	Tensão de água no solo	
	-0,025 MPa	-0,050 MPa
	----- número de espiguetas granadas/panícula -----	
Caiapó	131 a A	78 a B
Maravilha	144 a A	70 a B

Letras minúsculas comparam cultivares e letras maiúsculas comparam tensão de água.

Desdobrando cultivares dentro de tensão de água no solo, nota-se que sob maior disponibilidade hídrica (-0,025 MPa) não houve diferença significativa entre as cultivares, há uma tendência de maior número de espiguetas granadas na cultivar Maravilha. Sob condições de déficit hídrico (-0,050 MPa), ambas as cultivares apresentaram redução no número de espiguetas granadas/panícula. Stone et al. (1998) trabalhando com as cultivares Rio Parnaíba (grupo tradicional) e Maravilha (grupo moderno) sob condições de estresse hídrico, observaram que independente da cultivar todos os componentes da produção foram afetados pelo estresse hídrico.

Houve diferença significativa para o número de espiguetas chochas por panícula entre as cultivares (Tabela 4) e interação para doses de silício x cultivares assim como para tensão de água x doses de silício.

Analizando o desdobramento de doses de silício dentro de cultivares (Tabela 7), nota-se que a adubação silicatada não influenciou o número de espiguetas chochas por panícula para cultivar Caiapó, enquanto na cultivar Maravilha houve aumento desta variável. Esses resultados contrariam os obtidos por Houssain et al. (2001) que constataram redução no número de espiguetas chochas com o fornecimento de silício para as plantas de arroz. Segundo os autores, a redução no número de espiguetas chochas é devida ao aumento no teor de silício na cascas do grão de arroz.

Desdobrando cultivar dentro de doses de silício, observa-se que não houve diferenças entre as cultivares na dose zero de silício, entretanto a cultivar Maravilha apresentou aumento do número de espiguetas chochas na dose de 350 kg ha⁻¹ de silício diferindo da cultivar Caiapó (Tabela 7). Isto pode estar relacionado ao grupo morfológico ao

qual os genótipos pertencem. Segundo Winslow (1992), cultivares tradicionais apresentam maior eficiência na absorção de silício. Barbosa Filho et al. (1998) encontraram diferenças significativas na porcentagem de silício na palha do arroz das cultivares Caiapó e Carajás e na linhagem CNA 7706.

Tabela 7 Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente ao número de espiguetas chochas/panícula.

Cultivares	Doses de Silício (Si)	
	0 kg ha ⁻¹	350 kg ha ⁻¹
	----- número de espiguetas chochas/panícula -----	
Caiapó	41 a A	40 b A
Maravilha	40 a B	50 a A

Letras minúsculas comparam cultivares e letras maiúsculas comparam doses de silício.

Houve interação entre as variáveis tensão de água x doses de silício para o número de espiguetas chochas (Tabela 4). Analisando o desdobramento de tensão de água dentro de doses de silício (Tabela 8), observa-se que o aumento da tensão de água no solo de -0,025 MPa para -0,050 MPa incrementou o número e espiguetas chochas em ambas as doses. Estresse hídrico no estágio de meiose ou na antese resulta em aumento da esterilidade de flores (O'TOOLE & CHANG, 1979; YOSHIDA, 1981; FORNASIERI & FORNASIERI, 1993; MACHADO, 1994; PINHEIRO, 1999). A fase reprodutiva é extremamente sensível ao déficit hídrico, quer seja no momento da diferenciação do primórdio floral ou na meiose do grão de pólen, tornando-o inviável devido à desidratação. Aumento no número de espiguetas chochas em função do aumento da tensão de água no solo foram observados por Coelho et al. (1977), Stone et al. (1984), Stone et al. (1998).

Desdobrando a interação silício dentro de tensão de água, nota-se que para ambas as doses de silício na menor tensão de água não houve efeito significativo, porém na maior tensão de água o aumento na dose de silício diminuiu o número de espiguetas chochas por panículas. Esses resultados corroboram com os encontrados por Horiguchi (1988), Agarie et al. (1998b); Ma et al. (2001) e Gao et al. (2004), nos quais segundo os autores o silício atua na tolerância aos estresses abióticos.

Tabela 8 Desdobramento das interações (T x S) da análise de variância referente ao número de espiguetas chochas/panícula.

Doses de Silício (Si) (kg ha ⁻¹)	Tensão de água no solo	
	-0,025 MPa	-0,050 MPa
	----- número de espiguetas chochas/panícula -----	
0	29 a B	63 a A
350	28 a B	52 b A

Letras minúsculas comparam tensão de água e letras maiúsculas comparam doses de silício.

Para fertilidade das espiguetas houve efeito das interações cultivar x tensão e tensão x doses de silício. Desdobrando tensão dentro de cultivares (Tabela 9) observa-se que tanto para a cultivar Caiapó quanto para a Maravilha o aumento da tensão de água reduziu a fertilidade das espiguetas. Esse resultado era esperado uma vez que a fertilidade das espiguetas expressa a relação das espiguetas granadas em relação ao número total de espiguetas. Como pode ser observado na Tabela 4, o aumento da tensão de água reduziu o número total de espiguetas por panícula, porém reduziu, em maior intensidade o número de espiguetas granadas, o que refletiu em menor porcentagem de espiguetas férteis.

Analisando o desdobramento de cultivares dentro de tensão de água (Tabela 9), observa-se que não houve efeito de cultivares quando houve maior oferta de água (-0,025 MPa). Esse resultado é explicado pelo fato desta tensão ser a indicada por Stone et al. (1986) como a adequada para o cultivo do arroz de terras altas. A cultivar Caiapó apresentou maior fertilidade das espiguetas na maior tensão de água no solo, o que está relacionado ao fato desta cultivar ser do grupo tradicional, com características de maior tolerância às condições de estresse hídrico, enquanto a cultivar Maravilha é indicada para o cultivo de terras altas em regiões de distribuição pluvial mais regular ou para cultivo irrigado por aspersão.

Tabela 9. Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente a fertilidade da espiguetas.

Cultivares	Tensão de água no solo	
	-0,025 MPa	-0,050 MPa
	----- % -----	
Caiapó	80 a A	27 a B
Maravilha	78 a A	14 b B

Letras minúsculas comparam cultivares e letras maiúsculas comparam tensão de água.

Desdobrando a interação tensão de água dentro de doses de silício nota-se que o aumento da tensão de água reduziu a fertilidade das espiguetas, tanto na dose zero como na dose de 350 kg ha⁻¹ de silício (Tabela 10). Assim, como para a interação C x T, o aumento da tensão de água diminuiu o número de espiguetas granadas, contribuindo desta forma para a redução da fertilidade das espiguetas. Redução na fertilidade das espiguetas sob condições de déficit hídrico também foram relatadas por Giudece et al. (1973), Coelho et al. (1977), Stone et al (1984) e Stone et al. (1998).

Tabela 10. Desdobramento das interações (T x S) da análise de variância referente a fertilidade da espiguetas.

Doses de Silício (Si) (kg ha ⁻¹)	Tensão de água no solo	
	-0,025 MPa	-0,050 Mpa
	----- % -----	
0	78 a A	19 b B
350	79 a A	22 a B

Letras minúsculas comparam doses de silício e letras maiúsculas comparam tensão de água.

Analisando o desdobramento de doses de silício dentro de tensão de água, observa-se que houve efeito de doses de silício apenas na tensão de -0,050 MPa, ocorrendo aumento da fertilidade das espiguetas. Esse resultado era de se esperar, pois a adubação silicatada reduziu o número de espiguetas chochas.

Os resultados de altura da planta (cm), massa de 1000 grãos (g) e produtividade (g m⁻²) estão apresentados na Tabela 11.

Para altura de plantas observa-se na Tabela 11 efeito da interação C x T. Não houve efeito das doses de silício para esta variável, estando esse resultado de acordo com Mauad (2003), porém contrariam os encontrados por Yoshida et al.(1969), Takahashi (1995) e Faria, (2000) no quais o silício aumentou a altura da planta.

Tabela 11. Altura de planta (cm), massa de 1000 grãos (g) e produtividade de grãos (g m^{-2}) em função de cultivares tensão de água e doses de silício.

Tratamento ⁽¹⁾	Altura da Planta	Massa de 1000 grãos	Produtividade de grãos
	cm	g	g m^{-2}
Cultivares			
Caiapó	86,25	22	735
Maravilha	78,01	18	760
Tensão (MPa)			
-0,025	100,74	20	1.360
-0,050	63,52	20	138
Silício (kg há^{-1})			
0	81,14 a	20	736 a
350	83,12 a	21	762 a
Valor de F ⁽²⁾			
Bloco	0,25 ns	1,26 ns	0,27 ns
Cultivar (C)	27,00**	536,39 **	2,05 ns
Tensão (T)	569,97**	0,27 ns	3439,15 **
Silício (S)	1,62 ns	44,61**	1,51 ns
C x T	9,46**	131,10**	29,75 **
C x S	0,52 ns	27,91**	0,47 ns
T x S	0,11 ns	13,27**	1,75 ns
C x T x S	0,84 ns	32,77 ns	1,89 ns
CV (%)	5,37	2,00	7,87

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste DMS a 5%.

⁽²⁾ **, * e ns significativo a 1% e 5% ns - não significativo

Desdobrando tensão dentro de cultivar (Tabela 12), nota-se que o aumento da tensão de água reduziu a altura das plantas para ambas as cultivares. Essa redução provavelmente é devida à menor expansão celular e à diminuição da turgescência das células sob condições de déficit hídrico (KRAMER, 1974). Resultados semelhantes foram observados por Stone et al. (1984), Crusciol et al. (2003 a) e Crusciol et al. (2003b) com cultivares de arroz.

Tabela 12. Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente à altura de planta.

Cultivares	Tensão de água no solo	
	-0,025 MPa	-0,050 MPa
	----- cm -----	
Caiapó	107 a A	65 a B
Maravilha	94 b A	61 a B

Letras minúsculas comparam cultivares e letras maiúsculas comparam tensão de água.

Desdobrando cultivares dentro de tensão (Quadro 12), observa-se que a cultivar Caiapó apresentou maior altura que a cultivar Maravilha na menor tensão de água no solo. Isso se deve às características genéticas de cada material, sendo a Caiapó mais alta que a Maravilha (BRESEGHELLO et al., 1998; EMBRAPA, 2001), entretanto na maior tensão de água (-0,050) não houve diferença entre as cultivares, porém esses valores estão abaixo dos descritos por Breseghello et al., (1998) e Embrapa (2001). Para que um material vegetal expresse seu fenotipo, é necessário que as condições ambientais nas quais ele foi desenvolvido sejam as mais semelhantes possíveis. Assim, com a deficiência hídrica imposta durante o crescimento e desenvolvimento vegetal, esses não puderam expressar suas características, ocorrendo menor crescimento em extensão, consequência do menor comprimento dos entrenós, resultado da diminuição da turgescência, assim como de substâncias orgânicas relacionados ao crescimento (KRAMER, 1974).

Para a massa de 1000 grãos houve efeito significativo das interações. Nota-se que a elevação da tensão de água diminuiu a massa de 1000 grão em ambas as cultivares (Tabela 13). Esse efeito está relacionado ao menor transporte de carboidratos para

os grãos, estando esses resultados de acordo com os apresentados por Stone et al. (1984), Arf et al. (2001), Crusciol et al. (2003 a) e Crusciol et al. (2003b).

Tabela 13. Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente à massa de 1000 grãos.

Cultivares	Tensão de água no solo	
	-0,025 MPa	-0,050 MPa
	----- g -----	
Caiapó	22 a A	21 a B
Maravilha	19 b B	18 b A

Letras minúsculas comparam cultivares e letras maiúsculas comparam tensão de água.

Quando analisa-se o desdobramento de cultivares dentro de tensão (Tabela 13) nota-se diferenças estatísticas entre as cultivares, com maior valor para a cultivar Caiapó em ambas as tensões. Isto está relacionado ao tipo de grão dos cultivares, onde o Caiapó possui grãos longos e o Maravilha grão longo-finos.

A Tabela 14 apresenta o desdobramento da interação cultivar x doses de silício. Analisando o desdobramento de doses de silício dentro de cultivar, observa-se que a dose de 350 kg ha⁻¹ aumentou de forma significativa a massa de 1000 grãos apenas para a Caiapó. As plantas diferem quanto à sua capacidade em absorver silício, desta forma os genótipos de arroz diferem no teor de silício, respondendo de modo diferente à aplicação do elemento (DEREN et al.,1994).

Desdobrando cultivares dentro de doses de silício (Tabela 14), nota-se que para a cultivar Caiapó, tanto na presença como na ausência de adubação silicatada, os valores da massa de 1000 grãos foram sempre maiores, o que pode estar relacionado às diferenças genéticas entre as cultivares. Segundo Winslow (1992), a casca dos grãos é o órgão que mais acumula silício, fato este que faz com que países como Japão, China, entre outros utilizem esse subproduto da cadeia produtiva do arroz com fonte de silício.

Tabela 14. Desdobramento das interações (C x S) da análise de variância referente à massa de 1000 grãos.

Cultivares	Doses de Silício (Si)	
	0 kg ha ⁻¹	350 kg ha ⁻¹
	----- g -----	
Caiapó	21 a B	23 a A
Maravilha	18 b A	18 b A

Letras minúsculas comparam cultivares e letras maiúsculas comparam tensão de água.

Desdobrando tensão de água no solo dentro de doses de silício (Tabela 15), nota-se que o aumento da tensão na dose zero reduziu a massa de grão, entretanto, com o fornecimento de silício houve aumento na massa de grãos. Analisando o desdobramento de doses de silício dentro de tensão, observa-se que o fornecimento de silício aumentou a massa de grão em ambas as tensões, sendo este mais pronunciado na maior tensão de água.

Tabela 15. Desdobramento das interações (T x S) da análise de variância referente à massa de 1000 grãos.

Doses de Silício (Si) (kg ha ⁻¹)	Tensão de água no solo	
	-0,025 MPa	-0,050 MPa
	----- g -----	
0	20 b A	19 b B
350	21 a B	22 a A

Letras minúsculas comparam doses de silício e letras maiúsculas comparam tensão de água.

Analisando o desdobramento de tensão dentro de cultivares (Tabela 16), nota-se que na maior tensão de água (-0,050 MPa) houve redução significativa na produtividade em ambas as cultivares. Isto se deve às alterações decorrentes do estresse hídrico nos componentes da produção (Tabela 4). Segundo Stone et al. (1986), tensões acima de -0,025 MPa para a cultura do arroz de terras altas causam perda de produtividade, sendo

esta maior quanto for maior o nível de tensão. Esse resultado está de acordo com Pereira et al. (1994), Stone et al. (1996), Stone et al. (1998), Arf et al. (2001), Crusciol et al. (2003a) Crusciol et al. (2003b).

Tabela 16. Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente à produtividade.

Cultivares	Tensão de água no solo	
	-0,025 MPa	-0,050 MPa
	----- g m ⁻² -----	
Caiapó	1.288 b A	180 a B
Maravilha	1.432 a A	96 b B

Letras minúsculas comparam cultivares e letras maiúsculas comparam tensão de água.

Desdobrando cultivar dentro de tensão, observa-se que a cultivar Maravilha foi a mais produtiva na menor tensão de água, enquanto a cultivar Caiapó foi mais produtiva sob condições de déficit hídrico. Esses resultados são explicados pelos grupos aos quais pertencem os materiais genéticos. A cultivar Maravilha é do grupo moderno, recomendada para cultivo sob irrigação por aspersão ou em regiões com menores riscos de deficiência hídrica, assim quando cultivada dentro da faixa de tensão recomendada pode expressar seu potencial genético, porém, sob condições de déficit hídrico a queda é mais pronunciada, devido à menor tolerância a essa condição do que a cultivar Caiapó, mais adequada para o cultivo em condições climáticas com maiores problemas de disponibilidade hídrica (Bresgello et al. 1998).

6.1.2 Produção de matéria seca e teor de macronutriente na folha e silício na planta.

Na Tabela 17, estão apresentados os resultados da produção da matéria seca (kg ha⁻¹) e os teores de macronutrientes e silício (kg ha⁻¹). Para a produção de matéria seca, nota-se (Tabela17) efeito de cultivares e tensão de água. Não houve efeito de silício nem das interações.

Tabela 17. Produção de matéria seca, teor de macronutrientes na folha bandeira e silício na planta em função de cultivares, tensão de água no solo e doses de silício.

Tratamentos ⁽¹⁾	Matéria seca g m ⁻²	Teor de Nutrientes						
		N	P	K	Ca	Mg	S	Si
		----- g kg ⁻¹ -----						
Cultivares								
Caiapó	1.520 b	30,43 a	2,02 a	17,56 a	4,01 a	2,50 a	2,14 a	4,91
Maravilha	1.640 a	30,50 a	2,02 a	17,62 a	4,05 a	2,51 a	2,08 a	4,18
Tensão H ₂ O (MPa)								
-0,025	1.960 a	31,68 a	2,17 a	19,12 a	4,20 a	2,73 a	2,26 a	4,58
-0,050	1.210 b	29,25 b	1,87 b	16,06 b	3,86 b	2,28 b	1,96 b	5,12
Silício (kg ha ⁻¹)								
0	1.560 a	30,62 a	2,02 a	17,62 a	4,00 a	2,50 a	2,04 a	2,70
350	1.600 a	30,31 a	2,02 a	17,56 a	4,06 a	2,51 a	2,18 a	6,95
Valore de F ⁽²⁾								
Bloco	1,23 ns	0,19 ns	1,31 ns	1,03	0,91 ns	3,54 ns	0,92 ns	0,85 ns
Cultivar (C)	5,38*	0,05ns	0,01 ns	0,07 ns	0,16 ns	0,05 ns	0,41 ns	0,66 ns
Tensão (T)	246,55**	7,41 **	15,8**	17,42*	19,82 **	33,17**	9,37**	11,64**
Silício (S)	0,80 ns	0,12 ns	0,01 ns	0,07 ns	0,54 ns	0,06 ns	1,97 ns	699,54**
C x T	2,06 ns	0,04 ns	0,02 ns	0,06 ns	0,07 ns	0,04 ns	0,15 ns	40,97**
C x S	0,05 ns	0,05 ns	0,07 ns	0,08 ns	0,07 ns	0,05 ns	0,26 ns	70,84**
T x S	0,64 ns	0,23 ns	0,15 ns	0,07 ns	0,05 ns	0,31 ns	0,15 ns	22,30**
C x T x S	4,46 ns	0,24 ns	0,01 ns	0,01 ns	0,06 ns	0,06 ns	0,59 ns	2,46 ns
CV (%)	8,50	10,72	11,79	11,79	5,41	8,93	13,12	9,29

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste DMS a 5%.

⁽²⁾ **, * e ns significativo a 1% e 5% - não significativo.

A cultivar Maravilha apresentou maior produção de matéria seca do que a cultivar Caiapó (Tabela 17). Cultivares do grupo moderno apresentam maior perfilhamento em relação a cultivares do grupo tradicional como a Caiapó, o que pode ser observado no Tabela 4. Assim a maior produção de matéria seca obtida pela cultivar

Maravilha está relacionada a maior número de colmos (perfilhamanto) . A maior tensão de água no solo (Tabela 17), ou seja, menor disponibilidade de água para as plantas, reduziu a produção de matéria seca.

A água está envolvida em vários processos na planta, dentre eles o crescimento celular, através da turgescência celular. Dessa forma, a diminuição da disponibilidade de água para as plantas, devido ao aumento da tensão de água no solo, reduziu a sua absorção e conseqüentemente todos os processos envolvidos com ela, entre eles o crescimento e desenvolvimento da planta, como pode ser observado nas Tabelas 4 e 11, com menor perfilhamento e altura da planta respectivamente, refletindo desta forma no acúmulo de matéria seca. Esse resultado está de acordo com Stone et al. (1986), na qual tensão acima de -0,025 MPa ocasiona perdas nos componentes da produção das plantas de arroz. Diminuição da produção de matéria seca em função da menor disponibilidade de água foi relatada por Stone et al. (1984), Pereira et al. (1994), Crusciol et al. (2003a) e Crusciol et al. (2003b).

Não houve efeito da dose de silício no acúmulo de matéria seca. Isso se deve ao fato do silício estar relacionado à função estrutural e não a processos de crescimento como multiplicação celular. Esse resultado está de acordo com Tanaka & Park (1966), Liang et al. (1994), Carvalho (2000) e Mauad et al. (2003b).

Para os teores de macronutrientes houve efeito significativo apenas de tensão de água no solo (Tabela 17). O aumento da tensão de água no solo reduziu os teores de todos os macronutrientes, porém, mesmo assim todos ficaram dentro da faixa adequada, que é de 27 a 35; 1,8 a 3,0; 13 a 30; 2,5 a 10; 1,5 a 5,0 e 1,4 a 3,0 g kg⁻¹ para N, P, K, Ca, Mg e S respectivamente, segundo Raij et al. (1996).

O contato íons raiz ocorre de forma diferente para os nutrientes sendo N, Ca, Mg e S por fluxo de massa, enquanto P e K por difusão (MARSCHENER, 1995). Independente da forma como ocorre o contato íons raiz, esse tem que estar em solução para que ocorra absorção. Desta forma, a diminuição dos teores de N, Ca, Mg e S que são fornecidos por fluxo é devido à redução do conteúdo de água do solo. Para P e K a diminuição nos teores sob aumento da tensão é explicada pelo fato da redução da umidade do solo diminuir a espessura do filme de água, aumentando a tortuosidade e com isso dificultando a difusão (Stone et al., 1985). Apesar da redução dos teores dos macronutrientes sob aumento da

tensão de água, os teores estiveram dentro da faixa recomendada. Esses resultados corroboram os de Stone et al. (1985), Crusciol (2001), Crusciol et al. (2003b) e Crusciol et al. (2004).

Para o teor de silício na parte aérea houve efeito de tensão, silício e da interação C x T, C x S e T x S (Tabela 17).

Desdobrando de tensão dentro de cultivar (Tabela 18) nota-se que o aumento da tensão de água no solo incrementou de forma significativa o teor de silício nas cultivares, o que provavelmente esteja relacionado ao efeito de concentração, ou seja, embora a produção de matéria seca tenha reduzido com o aumento da tensão (Tabela 17) a absorção de silício não tenha sido influenciado na mesma intensidade. Segundo Takahashi (1995) a absorção de silício não é inibida quando o fornecimento de água é interrompido temporariamente, mas sim por inibidores da respiração. Desdobrando cultivar dentro de silício, observa-se que a cultivar Maravilha obteve maior teor que a cultivar Caiapó sob a menor tensão. Entretanto, a cultivar Caiapó diferiu estatisticamente da cultivar Maravilha sob maior tensão de água. Isto pode estar relacionado ao fato da cultivar Maravilha ser desenvolvida para o sistema de cultivo irrigado por aspersão, enquanto a cultivar Caiapó, para condições sequeiro.

Quadro 18. Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente à teor de silício.

Cultivares	Tensão de água no solo	
	-0,025 MPa	-0,050 MPa
	----- g kg ⁻¹ -----	
Caiapó	2,14 b B	7,68 a A
Maravilha	3,35 a B	6,21 b A

Letras minúsculas comparam cultivares e letras maiúsculas comparam tensão de água.

O desdobramento das interações C x S para teor de silício na parte aérea é apresentado na Tabela 19. Desdobrando doses de silício dentro de cultivar (Tabela 19), nota-se que a adubação silicatada, aumentou de forma significativa os teores de silício em ambas as cultivares. Aumento nos teores de silício no tecido vegetal em função da adubação silicatada é bastante encontrado na literatura, sobre tudo em condições tropicais, uma vez que

nossos solos são pobres nesse elemento, devido ao avançado grau de intemperismo (MALAVOLTA, 1980; BARBOSA FILHO et al., 2001), e via de regra o silício extraído pelas culturas não é repostado na forma de adubação, como ocorrem para os demais nutrientes.

Tabela 19. Desdobramento das interações (C x S) da análise de variância referente a teor de silício.

Cultivares	Doses de silício (Si)	
	0 kg ha ⁻¹	350 kg ha ⁻¹
	----- g kg ⁻¹ -----	
Caiapó	2,07 b B	7,98 a A
Maravilha	3,79 a B	6,45 b A

Letras minúsculas comparam cultivares e letras maiúsculas comparam de doses de silício.

Desdobrando cultivar dentro de doses de silício (Tabela 19), observa-se comportamento diferencial das cultivares em função da adubação silicatada. Sob condições de não fornecimento de silício, ou seja, apenas o presente no solo, a cultivar Maravilha apresentou o maior teor, entretanto sob condições de adubação silicatada o maior teor foi obtido na cultivar Caiapó. Isto provavelmente esteja relacionado às características genéticas que controlam a herança para eficiência de utilização de nutrientes.

Os resultados das interações significativas de T x S estão apresentados no Tabela 20. Analisando o desdobramento de tensão de água no solo dentro de doses de silício nota-se efeito apenas em 350 kg ha⁻¹ de silício, que proporcionou o maior valor. Segundo Takahashi (1995), a absorção de silício é feita de forma ativa, pois a absorção de silício não foi inibida quando o fornecimento de água foi interrompido temporariamente. Assim, o aumento no teor de silício sob maior tensão e adubação silicatada pode estar relacionado ao efeito de concentração, uma vez, que sob tensão de -0,050 MPa, houve menor acúmulo de matéria seca (Tabela 17). Para os macronutrientes o aumento da tensão de água no solo diminuiu os teores, porém esses ficaram dentro da faixa ideal segundo Raij et al. (1996) (Tabela 17).

Quadro 20. Desdobramento das interações (S x T) da análise de variância referente a teor de silício.

Doses de silício (Si) (kg ha ⁻¹)	Tensão de água no solo	
	-0,025 MPa	-0,050 MPa
	----- g kg ⁻¹ -----	
0	2,85 b A	2,64 b A
350	6,30 a B	7,60 a A

Letras minúsculas comparam doses de silício e letras maiúsculas comparam tensão de água

Analisando o desdobramento de doses de silício dentro de tensão de água nota-se efeito significativo em ambas as tensões. A adubação silicatada incrementou de forma significativa os teores de silício, independente da tensão empregada, sendo esse mais pronunciado na maior tensão. O aumento no teor de silício é devido aos solos tropicais, em especial os arenosos, serem pobres em silício, resultado do processo de intemperismos. Outro fator que justifica o aumento no teor de silício é que via de regra, o silício exportado pelas culturas não é repostado via adubação (LIMA FILHO et al., 1999), uma vez que os adubos não contêm silício e, quando contêm, estes estão em baixíssima concentração, não contribuindo de forma efetiva para suprir a demanda das plantas, sobre tudo gramíneas.

6.1.3. Parâmetros Bioquímicos

Os resultados do teor de prolina na fase vegetativa e reprodutiva estão apresentados no Tabela 21.

Tabela 21. Teor de prolina na fase vegetativa e reprodutiva em função de cultivares da tensão de água no solo e doses de silício.

Tratamentos ⁽¹⁾	Teor Prolina	
	Fase Vegetativa	Fase Reprodutiva
	----- $\mu\text{mol g}^{-1}$ -----	
Cultivares		
Caiapó	2,53	0,44
Maravilha	0,77	0,61
Tensão (MPa)		
-0,025	0,32	0,40
-0,050	2,97	0,65
Silício (kg ha^{-1})		
0	1,80	0,68
350	1,50	0,37
	Valor de F ⁽²⁾	
Bloco	0,31ns	0,48 ns
Cultivar (C)	245,29**	7,04 *
Tensão (T)	552,80**	16,58 **
Silício (S)	7,22*	23,73 **
C x T	233,46**	10,45 **
C x S	2,11 ns	4,74 *
T x S	8,50 *	13,72 *
C x T x S	0,064 ns	7,92 ns
CV(%)	19,28	33,51

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste DMS a 5%.

⁽²⁾ **, * e ns significativo a 1% e 5% - não significativo.

Analisando o desdobramento de tensão de água dentro de cultivares, nota-se efeito em ambas as cultivares, onde o aumento da tensão de água no solo incrementou de maneira significativa o teor da prolina (Tabela 22). A prolina é um aminoácido sintetizado sob condições de estresse. Segundo Stone et al. (1986), a tensão ideal para cultivar arroz é de -0,025MPa, ocorrendo perdas de produção acima desta tensão devido à deficiência hídrica. Assim, o aumento da tensão de água no solo induziu as plantas ao estresse e, conseqüentemente, pode ter elevado a produção de prolina.

Tabela 22. Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente à atividade de prolina na fase vegetativa.

Cultivares	Tensão de água no solo	
	-0,025 MPa	-0,050 MPa
	----- $\mu\text{mol g}^{-1}$ -----	
Caiapó	0,35 a B	4,72 a A
Maravilha	0,30 a B	1,23 b A

Letras minúsculas comparam cultivares e letras maiúsculas comparam tensão de água.

Alguns autores sugerem ser a prolina indicador de estresse (BECKER & FOCK, 1986). Esse aminoácido teria a função de proteger as células dos processos de desnaturação sob condições de estresse hídrico e salino devido à alta solubilidade em água (PALEG et al., 1984; SHEVYAKOVA, 1984), e ainda participar de um estoque de N e C que poderiam ser utilizados depois do período de estresse (JAGER et al., 1977). Nota-se que sob baixa tensão de água no solo -0,025 MPa (Tabela 22), os teores de prolina estiveram baixos. Isso se deve provavelmente à prolina oxidase que atuaria no controle, mantendo a prolina livre em níveis baixos em tecidos túrgidos (STEWART, 1972). Aumento nos teores de prolina em função de déficit hídrico foi observado em arroz (MADRUGA et al., 1977; CHEN & KAO, 1993, DINGKUHN et al., 1991, LIMA et al., 2004), trigo (FUMIS et al., 2001) e feijão (SAWAZAKI et al., 1981; ROSSI et al., 1997; GUIMARÃES, 2001)

Analisando o desdobramento de cultivar dentro de tensão de água, observa-se efeito apenas em -0,050 MPa, na qual a cultivar Caiapó apresentou a maior teor da prolina (Tabela 22). A cultivar Caiapó pertence ao grupo tradicional, recomendada para o

sistema de sequeiro por apresentar maior tolerância a períodos de seca, enquanto a cultivar Maravilha é indicada para o cultivo em terras altas sob irrigação. Assim o maior teor de prolina na cultivar Caiapó indicaria maior tolerância à seca. Embora vários trabalhos relacionem à função protetora da prolina na adaptação das células sob estresse osmótico, ainda existem dúvidas se o acúmulo desse composto nos tecidos das plantas proporciona vantagem adaptativa ou simplesmente é uma consequência do estresse, induzindo mudanças no metabolismo (HARE et al., 1997). Esses resultados contrariam os encontrados por Dingkuhn et al. (1991) que, trabalhando com cultivares de arroz dos ecossistemas de terras altas e várzeas sob condição de déficit hídrico, observaram maior acúmulo de prolina nas cultivares do ecossistema de várzea.

Analizando o desdobramento tensão de água no solo dentro de doses de silício nota-se efeito para as doses de silício (Tabela 23). A tensão de -0,050 MPa diferiu significativamente da tensão -0,025 MPa. Esses resultados estão de acordo com os encontrados na literatura, onde o aumento da tensão de água incrementou o teor de prolina nas plantas (MADRUGA ET AL., 1977; SAWAZAKI ET AL., 1981, CHEN & KAO, 1993, DINGKUHN ET AL., 1991, ROSSI ET AL., 1997; GUIMARÃES, 2001 E LIMA ET AL., 2004).

Tabela 23. Desdobramento das interações (T x S) da análise de variância referente ao teor de prolina na fase vegetativa.

Doses de Silício (kg ha ⁻¹)	Tensão de água no solo	
	-0,025 MPa	-0,050 MPa
	----- μmol g ⁻¹ -----	
0	0,32 a B	3,29 a A
350	0,34 a B	2,66 b A

Letras minúsculas comparam doses de silício e letras maiúsculas comparam tensão de água.

A adubação silicatada reduziu o teor de prolina (Tabela 23), indicando que o silício provavelmente estaria reduzindo o nível de estresse, já que esse aminoácido tem sido considerado como marcador bioquímico de estresse (HARE et al. 1997).

Diversos são os autores que apontam o silício como agente anti estresses, quer seja na redução da transpiração cuticular (Yoshida et al., 1959; Horiguchi, 1988; Agarie et al., 1998b; Ma et al., 2001) ou no aumento da eficiência da utilização de água (Gao et al., 2004). Assim, a adubação silicatada pode ter diminuído a perda de água, e o teor de prolina apresentou-se menor sob esta condição, já que é descrito como regulador osmótico. Sob condições adequadas de umidade no solo para cultivo o arroz de terras altas -0,025 MPa (Stone et al., 1986) não se observa efeito significativo da adubação silicatada, nos teores da prolina (Tabela 23), tornando o silício mais efetivo sob condições de estresse (Ma, 2004).

Para o efeito do teor de prolina na fase reprodutiva, nota-se efeito da interações C x T, C x S e T x S (Tabela 21).

Analisando o desdobramento de tensão de água dentro de cultivares teor de prolina (Tabela 24) nota-se efeito apenas para cultivar Maravilha na tensão de -0,050 MPa. O aumento da tensão de água induziu aumento no teor de prolina, apenas para a cultivar Maravilha. Diferenças no conteúdo de prolina em função de cultivares, período e duração do estresse foram observados em plantas de arroz Dingkuhn et al. (1991) e Lima et al. (2004), assim como em trigo (FUMIS et al., 2001), feijão (SAWAZAKI et al., 1981; LOPES & ARIETA-MAZA, 1991; ROSSI et al., 1997; GUIMARÃES, 2001) e em acerola (NOGUEIRA et al., 2001), o que segundo os autores, poderia estar relacionado à cultivar e a idade da folha. Esses resultados estão de acordo com a literatura, onde o aumento da tensão de água no solo incrementou o teor de prolina nas plantas (1993, ROSSI et al., 1997; GUIMARÃES, 2001).

Tabela 24. Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente ao teor de prolina na fase reprodutiva.

Cultivares	Tensão de água no solo	
	-0,025 MPa	-0,050 MPa
	----- $\mu\text{mol g}^{-1}$ -----	
Caiapó	0,42 a A	0,47 b A
Maravilha	0,42 a B	0,84 a A

Letras minúsculas comparam cultivares e letras maiúsculas comparam tensão de água.

Desdobrando cultivares dentro de tensão de água no solo (Quadro 24) observa-se efeito apenas em -0,050 MPa, na qual a cultivar Maravilha apresentou o maior teor de prolina. O aumento da tensão de água induziu aumento no teor da prolina apenas para a cultivar Maravilha. Esse fato pode estar relacionado ao desenvolvimento das cultivares. A cultivar Maravilha apresenta maior massa vegetativa, como é característico das cultivares do grupo moderno, em relação ao grupo tradicional como a Caiapó, o que pode ser observado pela maior produção de matéria seca (Tabela 17). Isso provavelmente pode ter causado maior nível de estresse em função da menor disponibilidade hídrica. Nota-se que na fase reprodutiva não houve efeito da tensão de água no teor de prolina para cultivar Caiapó (Tabela 24), o mesmo não ocorrendo na fase vegetativa (Tabela 22). Isso pode estar relacionado às fases de desenvolvimento da cultura.

Segundo Madruga et al. (1977), folhas de arroz mais novas apresentam maior teor de prolina. Diferentes autores relatam diferenças nos teores de prolina em função de cultivares e estágio de desenvolvimento e duração de estresse (SAWAZAKI et al., 1981; DINGKUHN et al., 1991; LOPES & ARIETA-MAZA, 1991; ROSSI et al., 1997; FUMIS et al., 2001; GUIMARÃES, 2001; NOGUEIRA et al., 2001; LIMA et al., 2004). Analisando o desdobramento de doses de silício dentro de cultivar, observa-se efeito apenas para cultivar Maravilha na dose zero, onde a ausência da adubação silicatada promoveu aumento do teor de prolina na fase reprodutiva (Tabela 25). O silício é um elemento relacionado à ação protetora contra efeitos bióticos e abióticos (Ma, 2004). Assim, na ausência de adubação silicatada houve maior acúmulo de prolina, o que segundo alguns autores pode ser um indicativo de estresse ou de menor tolerância ao estresse (BECKER & FOCK, 1986; DINGKUHN et al., 1991; LIMA et al., 2004).

Tabela 25. Desdobramento das interações (C x S) da análise de variância referente ao teor de prolina na fase reprodutiva.

Cultivares	Doses de Silício (Si)	
	0 kg ha ⁻¹	350 kg ha ⁻¹
	----- $\mu\text{mol g}^{-1}$ -----	
Caiapó	0,53 a A	0,36 a A
Maravilla	0,83 b A	0,39 a B

Letras minúsculas comparam cultivares e letras maiúsculas comparam doses de silício.

Quanto ao desdobramento de cultivares dentro de doses de silício observa-se efeito apenas na ausência de adubação silicatada para cultivar Maravilha, que é do grupo moderno, indicada para cultivo sob irrigação por aspersão, o que significa menor tolerância a estresse hídrico se comparado à cultivar Caiapó (sequeiro).

O desdobramento das interações T x S está na Tabela 26. Analisando o desdobramento de tensão de água no solo dentro de doses de silício, nota-se efeito apenas no tratamento sem silício, onde a maior tensão proporcionou aumento do teor de prolina. Desdobrando doses de silício dentro de tensão nota-se efeito apenas da tensão de -0,050MPa, onde sem adubação silicatada o teor de prolina foi maior.

Tabela 26. Desdobramento das interações (T x S) da análise de variância referente ao teor de prolina na fase reprodutiva.

Doses de Silício (Si) (kg ha ⁻¹)	Tensão de água no solo	
	-0,025 MPa	-0,050 MPa
	----- $\mu\text{mol g}^{-1}$ -----	
0	0,438 a B	0,927 a A
350	0,365 a A	0,388 b A

Letras minúsculas comparam doses de silício e letras maiúsculas comparam tensão de água no solo.

Na Tabela 27 estão os resultados da atividade de peroxidase na fase vegetativa e reprodutiva das plantas de arroz.

Tabela 27. Atividade de peroxidase na fase vegetativa e reprodutiva em função da tensão em função de cultivares tensão de água e doses de silício.

Tratamentos ⁽¹⁾	Atividade de Peroxidase	
	Fase Vegetativa	Fase Reprodutiva
--- μmol de H_2O_2 decomposto/min mg de proteína ---		
Cultivares		
Caiapó	0,073 b	0,075
Maravilha	0,097 a	0,081
Tensão (MPa)		
-0,025	0,078	0,063
-0,050	0,092	0,093
Silício (kg ha^{-1})		
0	0,078	0,070
350	0,092	0,087
Valor de F ⁽²⁾		
Bloco	1,13 ns	2,48 ns
Cultivar (C)	5,51*	1,65 ns
Tensão (T)	1,18 ns	38,24**
Silício (S)	1,75 ns	12,12**
C x T	0,02 ns	0,38 ns
C x S	0,15 ns	28,53**
T x S	8,71**	33,67**
C x T x S	3,45 ns	2,53 ns
CV(%)	34,84	17,70

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste DMS a 5%.

⁽²⁾ **, * e ns significativo a 1% e 5% - não significativo.

Para atividade da peroxidase na fase vegetativa houve efeito de cultivar e da interação Tx S.

A cultivar Maravilha apresentou maior atividade de peroxidase que a cultivar Caiapó (Tabela 27). O estresse hídrico é conhecido também por causar danos oxidativos às plantas, levando ao aumento nos níveis de produção das espécies reativas de oxigênio (VERMA et al., 2003). Assim a maior atividade da peroxidase na cultivar Maravilha está relacionada às características genéticas da planta, pouco exploradas. Entretanto, vale ressaltar que esse material apresenta baixa resistência a déficit hídrico, o que pode levar a um aumento na peroxidase como forma de proteção a esse tipo de estresse.

Na Tabela 28 está contido o desdobramento da interação significativa tensão de água no solo e dose de silício na fase vegetativa.

Analisando o desdobramento de tensão de água dentro de dose de silício nota-se efeito apenas na dose zero, na qual a tensão de -0,050MPa proporcionou a maior atividade. Uma forma de defesa da planta é ativar enzimas antioxidantes como a peroxidase, sendo um dos mecanismos de defesa aos efeitos deletérios do metabolismo oxidativo (LIMA et al., 2003). Observa-se que quando o silício foi fornecido não houve diferença para atividade da peroxidase na fase vegetativa (Tabela 28), apresentando leve tendência de menor atividade, o que poderia indicar inibição dessa enzima na presença de silício nessa fase.

Tabela 28. Desdobramento das interações (T x S) da análise de variância referente à atividade de peroxidase na fase vegetativa.

Doses de silício (Si) kg ha ⁻¹	Tensão de água no solo	
	-0,025 MPa	-0,050 MPa
	----- $\mu\text{mol de H}_2\text{O}_2$ decomposto/min mg de proteína -----	
0	0,056 b B	0,101 a A
350	0,101 a A	0,084 a A

Letras minúsculas comparam doses de silício e letras maiúsculas comparam tensão de água no solo.

Aumento na atividade de enzimas antioxidantes em plantas de arroz sob condições de estresse foi observado por Verna et al. (2003) e Chandru et al. (2003) como

mecanismo de defesa ao estresse. Segundo os autores essas enzimas quebrariam as espécies reativas de oxigênio em água e oxigênio molecular, evitando a peroxidação dos lipídeos.

Desdobrando doses de silício dentro de tensão de água nota-se efeito apenas na tensão de -0,025 MPa, na qual a adubação com silício aumentou a atividade da peroxidase.

Na fase reprodutiva houve efeito de tensão, de doses de silício e das interações C x S e T x S para atividade da peroxidase (Tabela 27)

Desdobrando tensão de água no solo dentro de cultivar na fase reprodutiva (Tabela 29), nota-se efeito significativo em ambas as cultivares com maior atividade da peroxidase na maior tensão de água. Esse aumento pode estar relacionado ao mecanismo de defesa à ação de enzimas oxidativas. Esses resultados corroboram com Lima et al. (2003), Verna et al. (2003) e Chandru et al. (2003).

Tabela 29. Desdobramento das interações (C x T) da análise de variância referente à atividade de peroxidase na fase reprodutiva.

Cultivares	Tensão de água no solo	
	-0,025 MPa	-0,050 MPa
	----- $\mu\text{mol de H}_2\text{O}_2$ decomposto/min mg de proteína -----	
Caiapó	0,062 a B	0,089 b A
Maravilha	0,065 a B	0,098 a A

Letras minúsculas comparam cultivares e letras maiúsculas comparam tensão de água no solo.

Analisando o desdobramento de cultivar dentro de tensão de água no solo observa-se apenas efeito em -0,050 MPa, na qual a cultivar Maravilha apresentou maior atividade de peroxidase que a cultivar Caiapó. A cultivar Maravilha tem menor tolerância à deficiência hídrica do que a cultivar Caiapó. O aumento da tensão de água no solo, acima da recomendada (-0,025MPa), cria uma condição de estresse hídrico, fazendo com que a cultivar Maravilha sinta mais o estresse do que a cultivar Caiapó. Isto faz com que a atividade de enzimas antioxidantes seja maior sob condições de déficit hídrico, assim como em cultivares menos tolerantes à seca, como forma de defesa ao metabolismo oxidativo.

Na Tabela 30 está contido o desdobramento da interação T x S para atividade de peroxidase na fase reprodutiva.

Analisando o desdobramento de tensão de água no solo dentro de doses de silício, nota-se efeito apenas na dose de 350 kg de silício na tensão de -0,050 MPa, na qual a adubação silicatada incrementou a atividade da peroxidase. Diversos autores afirmam que o silício está envolvido no aumento da tolerância a estresse biótico e abiótico. Assim, sob condições de estresse hídrico as plantas adubadas com silício tiveram aumento da atividade da peroxidase que é uma enzima relacionada ao mecanismo de defesa da planta. As peroxidases previnem a oxidação dos lipídeos (VERMAS et al., 2003). De forma similar, o silício atuaria na estabilidade da membrana, diminuindo sua permeabilidade em condições de estresse (LIANG et al., 1996), e aumentando o conteúdo de fosfolípidos e glicolípidos (WANG et al., 1998), o que contribuiria para o efeito protetor na planta, resultando em aumento da atividade da peroxidases. Liang (1999) encontrou aumento de 24% na atividade de enzimas peroxidase em planta de arroz sob condição de estresse, na presença de silício.

Tabela 30. Desdobramento das interações (T x S) da análise de variância referente à atividade da peroxidase na fase reprodutiva.

Doses de silício (Si) kg ha ⁻¹	Tensão de água no solo	
	-0,025 MPa	-0,050 MPa
	----- $\mu\text{mol de H}_2\text{O}_2$ decomposto/min mg de proteína -----	
0	0,069 a A	0,071 b A
350	0,057 a B	0,116 a A

Letras minúsculas comparam doses de silício e letras maiúsculas comparam tensão de água no solo.

6.2 Experimento II: Componentes da produção, acúmulo e marcha de absorção de silício na parte aérea.

Os resultados do número de colmos, colmos férteis (%), número de panícula/planta, número de espiguetas: totais, granadas e chochas, e fertilidades das espiguetas (%) estão contidos na Tabela 31. Houve efeito significativo de cultivares para todas variáveis

analisadas exceto para fertilidade das espiguetas. Não houve efeito de corretivos nas variáveis analisadas.

A cultivar Maravilha apresentou maior número de colmos, diferindo estatisticamente da cultivar Caiapó, o que está relacionado às características genéticas desses materiais (Tabela 31). Cultivares do grupo moderno, como a Maravilha, apresentam maior capacidade de perfilhamento em relação às cultivares do grupo tradicional.

Tabela 31 - Número de colmos, colmos férteis (%), número de panículas por metro quadrado, número de espiguetas: totais, granadas e chochas e fertilidades das espiguetas (%) em função de cultivares e corretivos do solo.

Tratamento	Colmos ⁽¹⁾	Colmos	Panícula	Espiguetas panícula			Fertilidades
	planta ⁻¹	férteis	planta ⁻¹	Total	Granadas	Chochas	das espiguetas
	nº	%	nº	-----	nº-----		%
Cultivares (C)							
Caiapó	10 b	98 a	9 b	110	50	60 b	50 a
Maravilha	14 a	93 b	12 a	132	67	65 a	51 a
Corretivos (Co)							
Calcário	12 a	96 a	11 a	122	60	62 a	49 a
Silicato Cálcio	11 a	95 a	10 a	118	58	60 a	49 a
Valor de F ⁽²⁾							
Cultivares	44,26 **	7,61 *	28,97 **	180,3 **	250,4 **	199,1**	1,14 ns
Corretivos	1,31 ns	0,50 ns	0,68 ns	2,14 ns	2,47 ns	2,45 ns	2,55 ns
C x Co	1,36 ns	1,79 ns	0,60 ns	27,8**	19,28**	0,05 ns	2,30ns
CV.	9,46	3,31	11,10	9,24	8,43	10,25	7,8

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste DMS a 5%.

⁽²⁾ **, * e ns significativo a 1% e 5% - não significativo.

A cultivar Caiapó apresentou maior porcentagem de colmos férteis que a cultivar Maravilha (Tabela 31). Isto, provavelmente, está relacionado ao fato dos perfilhos mais tardios das cultivares de maior perfilhamento interceptarem menores

quantidades de luz devido à sua posição na planta, produzindo dessa maneira menor quantidade de carboidrato o que provavelmente não é suficiente para que ocorra a diferenciação da gema vegetativa em reprodutiva, uma vez que a planta necessita manter seus processos de crescimento do colmo e expansão das folhas.

Segundo Fornasieri Filho & Fornasieri (1993) ocorre simultaneamente, na planta, a alongação do colmo e a diferenciação e desenvolvimento da panícula, estabelecendo-se a competição por assimilados produzidos neste estágio entre os dois órgãos. Cerca de 60% dos assimilados são utilizados na alongação dos entrenós superiores e o restante é direcionado ao crescimento das folhas e panículas jovens.

A cultivar Maravilha apresentou maior número de panícula que a cultivar Caiapó (Tabela 31), o que está relacionado às características genéticas de cada material. Assim, materiais do grupo moderno como a Maravilha, perfilham mais que as cultivares do grupo tradicional, estando esse resultado de acordo com Embrapa (2001), que relata que cultivares do grupo moderno apresentam maior perfilhamento que as cultivares do grupo tradicional. Não houve diferença entre os corretivos para essa variável, mesmo sendo um dos corretivos o silicato de cálcio, que tem em sua composição silício, o que provavelmente esteja relacionado a ausência de estresse durante o desenvolvimento da cultura. Esse resultado está de acordo com Deren et al. (1994), Mauad et al. (2003) e Alvarez (2003) que não encontraram aumento no número de colmo quando o silício foi fornecido às plantas.

Para o número de espiguetas total e granadas (Tabela 31) houve efeito para cultivares e da interação cultivar x corretivo

Analisando o desdobramento para o número de espiguetas total nota-se resposta diferente entre as cultivares (Tabela 32). A cultivar Caiapó do grupo tradicional apresentou maior número de espiguetas quando se utilizou silicato de cálcio como corretivo do solo, enquanto, a cultivar a Maravilha obteve o maior número de espiguetas quando se utilizou calcário. Isto provavelmente pode estar relacionado às características das plantas, uma vez que plantas do grupo tradicional como a Caiapó apresentam menor resposta à adubação nitrogenada, enquanto a cultivar Maravilha apresenta alta resposta o que pode estar influenciando nesta variável. Segundo Wallace et al. (1976) e Wallace (1989) existe antagonismo entre N e Si. Assim, no processo de melhoramento genético visando maior resposta à adubação nitrogenada, a cultivar do grupo moderno, Maravilha, pode ter reduzido

sua capacidade e a eficiência de absorção de silício, enquanto plantas do grupo tradicional com a Caiapó, mantiveram essas características.

Segundo Winslow (1992), cultivares tradicionais apresentam maior eficiência na absorção desse elemento. Barbosa Filho et al. (1998) encontraram diferenças significativas na porcentagem de silício na palha do arroz das cultivares Caiapó e Carajás e na linhagem CNA 7706.

Tabela 32. Desdobramento das interações cultivar (C) x Corretivo (Co) da análise de variância referente ao número total de espiguetas.

Cultivares	Corretivos de solo	
	Calcário	Silicato de cálcio
	----- Número total de espiguetas -----	
Caiapó	103 b B	110 b A
Maravilha	140 a A	126 a B

Letras minúsculas comparam cultivares e letras maiúsculas comparam corretivos do solo.

Desdobrando cultivares dentro de corretivo, nota-se maior número de espiguetas total para a cultivar Maravilha em ambos os corretivos, uma vez que esse material foi desenvolvido para alta produtividade.

Para o número de espiguetas granadas/panículas houve efeito da interação cultivares e corretivos (Tabela 33). Analisando o desdobramento da interação corretivo dentro de cultivares, nota-se efeito apenas para o silicato na cultivar Maravilha, que apresentou menor número de espiguetas granadas (Tabela 33). Esses resultados contrariam os encontrados por Ma et al. (1989) e Barbosa Filho et al. (1998), que constataram aumento no número total de espiguetas com a utilização de materiais contendo silício. Carvalho (2000), Mauad et al., (2003) e Camarin (2003) não encontraram efeito significativo para essa variável em função da aplicação de materiais silicatados.

Tabela 33. Desdobramento das interações (C x Co) da análise de variância referente ao número de espiguetas granadas/panícula.

Cultivares	Corretivos do solo	
	Calcário	Silicato de cálcio
	----- Número de espiguetas granadas/panícula -----	
Caiapó	49 b A	52 b A
Maravilha	70 a A	64 a B

L

etras minúsculas comparam cultivares e letras maiúsculas comparam corretivos do solo.

Desdobrando cultivares dentro de corretivos observa-se maior número de espiguetas granadas na cultivar Maravilha em ambos os corretivos utilizados (Tabela 33), o que está relacionado às características de produção desse material.

O maior número de espiguetas chochas ocorreu na cultivar Maravilha (Tabela 31), o que provavelmente está relacionada a maior produção de espiguetas, pois a planta não consegue suprir com carboidrato todas as espiguetas produzidas.

Observa-se na Tabela 31 que apesar do maior número de espiguetas chochas ocorrido na cultivar Maravilha, essa não diferiu da Caiapó quanto à fertilidade das espiguetas. Isto se deve ao fato da cultivar Maravilha ter produzido maior número de espiguetas granadas que a cultivar Caiapó.

Na Tabela 34 estão apresentados os resultados da massa de 1000 grãos e a produtividade de grãos em função das cultivares e tipos de corretivos do solo. Houve efeito significativo da interação cultivares x corretivo para massa de 1000 grãos e produtividade de grãos.

Tabela 34. Massa de 1000 grãos (g) e produtividade de grãos em função de cultivares e corretivos do solo.

Tratamento ⁽¹⁾	Massa de 1000 grãos	Produtividade de grãos
	g	g planta ⁻¹
Cultivares (C)		
Caiapó	28,6	46
Maravilha	21,0	50
Corretivos (Co)		
Calcário	24,7	48
Silicato de Cálcio	24,8	47
	Valor de F ⁽²⁾	
Cultivares	546 **	32,01 **
Corretivos	0,15 ns	0,18 ns
C x Co	0,71 *	65,31 **
CV (%)	2,60	3,16

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste DMS a 5%.

⁽²⁾ **, * e ns significativo a 1% e 5% - não significativo.

Na Tabela 35 está o desdobramento da interação cultivares x corretivos do solo para massa de 1000 grãos. Desdobrando corretivo do solo dentro de cultivares, verifica-se que não houve diferença significativa entre os materiais utilizados. Esses resultados contrariam os encontrados por Deren et al. (1994), Korndörfer et al. (1999a), Houssain et al. (2001) e Mauad et al. (2003) que, utilizando fontes silicitadas encontraram aumento da massa de 1000 grãos, porém estão de acordo com Alvarez (2003), que não obteve aumento para essa variável.

Desdobrando cultivares dentro de corretivo (Tabela 35), nota-se efeito para a cultivar Caiapó para ambos os corretivos, o que pode estar relacionado ao tipo de grão das cultivares, onde a Caiapó possui grãos longos e a Maravilha, grãos longo-finos. A massa do grão é um caráter varietal estável, que depende do tamanho da casca, determinado durante duas semanas que antecedem a antese e do desenvolvimento da cariopse após o florescimento, portanto, depende da translocação de carboidratos nos primeiros sete dias, para preencher a casca no sentido de seu comprimento, e nos sete dias posteriores, na largura e espessura

(MACHADO, 1994). Esse componente é pouco influenciado por fatores de ordem climática e nutricional.

Tabela 35. Desdobramento das interações (C x Co) da análise de variância referente para massa de 1000 grãos.

Cultivares	Corretivos do solo	
	Calcário	Silicato de cálcio
	----- g -----	
Caiapó	29,1 a A	28,1 a A
Maravilha	20, 7 b A	21,4 b A

Letras minúsculas comparam cultivares e letras maiúsculas comparam corretivos do solo.

Verifica-se na Tabela 36 o desdobramento da interação significativa para produtividade grãos. Analisando o desdobramento de corretivo dentro de cultivares observa-se resposta diferencial para cultivares A cultivar Caiapó apresentou maior produtividade quando se utilizou silicato de cálcio, enquanto para cultivar Maravilha, a maior produtividade foi obtida com a utilização de calcário.

Desdobrando cultivares dentro de corretivo nota-se efeito apenas para calcário onde a cultivar Maravilha, apresentou a maior produtividade. A menor produtividade obtida com a utilização de silicato de cálcio é o reflexo da influência da utilização desse material no número total de espiguetas, número de espiguetas granadas, Tabelas 33 e 34, respectivamente.

Quadro 36. Desdobramento da interação (C x Co) significativas da análise de variância referente à produtividade.

Cultivares	Corretivos do solo	
	Calcário	Silicato de cálcio
	----- Produtividade de grãos (g planta ⁻¹)-----	
Caiapó	43 b B	49 a A
Maravilha	53 a A	47 a B

Letras minúsculas comparam cultivares e letras maiúsculas comparam corretivos do solo

6.2.1 Acúmulo de matéria seca e silício

O acúmulo de matéria seca na folha das cultivares Caiapó e Maravilha em função da aplicação de calcário e silicato está apresentado na Figura 3. Constatou-se que, independente do corretivo utilizado, a melhor curva que ajustou os dados foi a sigmóide (Figura 3).

O acúmulo de matéria seca na folha em ambas as cultivares foi baixo até o início do perfilhamento 22 dias após a emergência (DAE), ocorrendo intenso aumento até próximo aos 85 DAE. O incremento da matéria seca de ambas as cultivares a partir dos 22 DAE é devido, neste período, estar ocorrendo o perfilhamento e o aumento da área foliar caracterizado pela emissão e crescimento de novas folhas.

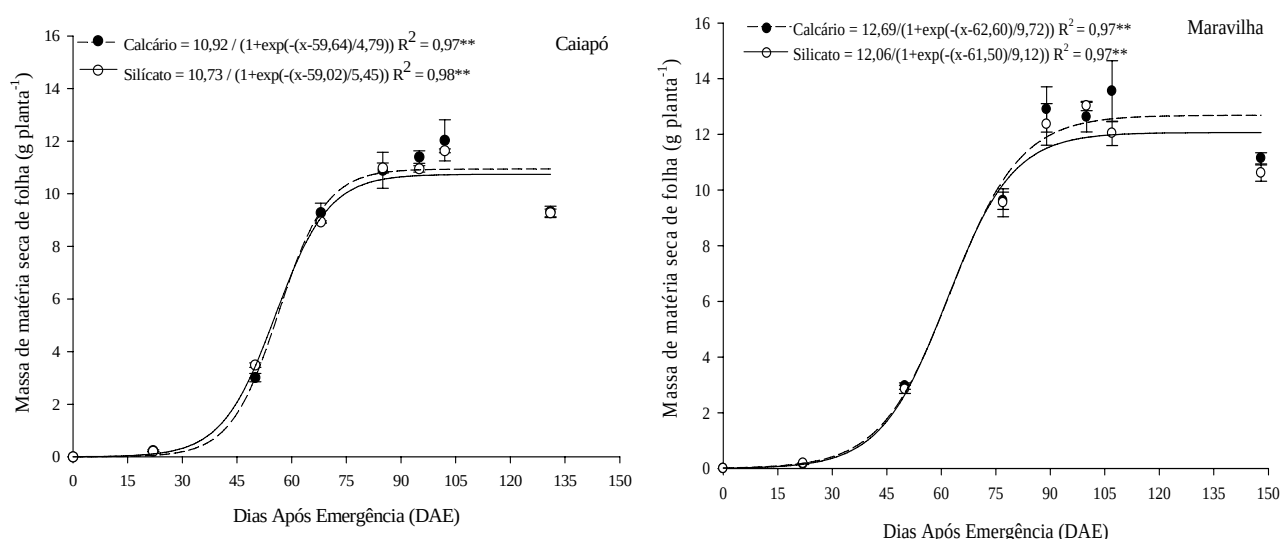


Figura 3: Acúmulo de massa de matéria seca na folha (g planta⁻¹) pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha..

Nota-se não houve diferença significativa para ambas as cultivares em nenhum das épocas de coleta (Figura 3)

Na Figura 4 está representado o acúmulo de silício na folha das cultivares Caiapó e Maravilha. Observa-se que tanto na presença quanto na ausência de silício as cultivares apresentaram comportamento diferentes. Para ambas as cultivares não houve diferença significativa na primeira coleta (22DAE), entretanto nota-se que a partir da segunda

coleta, houve diferença em todas as épocas para as duas cultivares com os maiores valores obtidos na presença da adubação silicatada.

A cultivar Maravilha apresentou expressivo acúmulo de silício do 30° até 75° (DAE) enquanto para cultivar Caiapó o acúmulo foi gradativo ao longo do desenvolvimento da planta, com tendência de estabilizar próximo aos 120 (DAE).

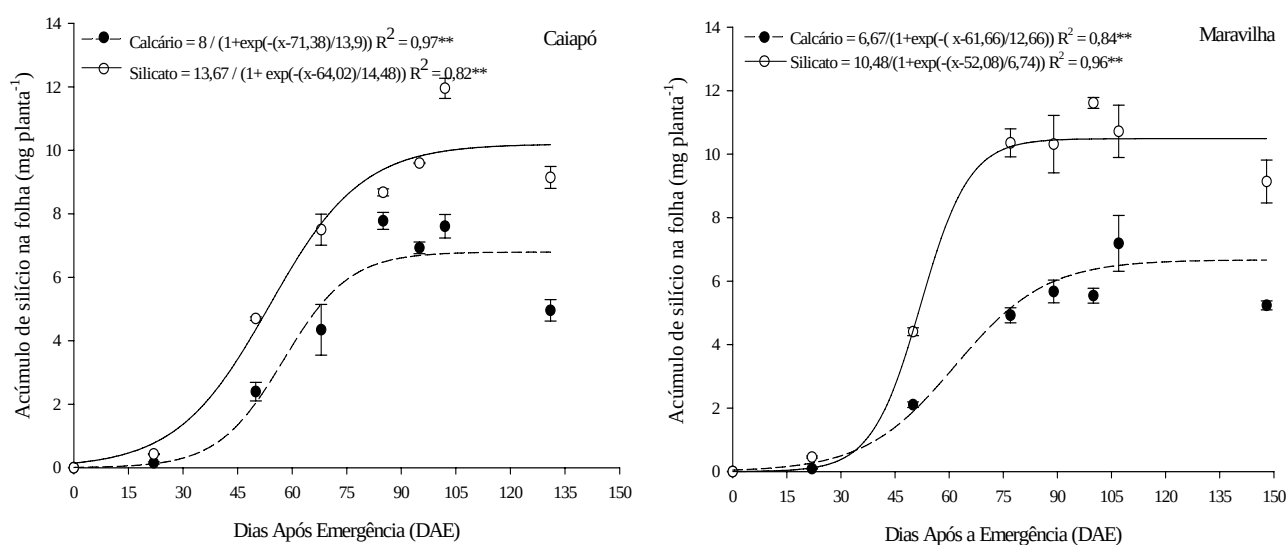


Figura 4. Acúmulo de silício na folha (mg planta^{-1}) pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha.

O acúmulo de matéria seca do colmo + bainha para ambas as cultivares é apresentado na Figura 5. Assim como para o acúmulo na folha (Figura 4), a curva que melhor ajustou os dados de produção de matéria seca de colmo foi a sigmóide.

O acúmulo de matéria seca no colmo + bainha foi lento até o início do perfilhamento, ou seja, 22 DAE, ocorrendo incremento do acúmulo a partir deste ponto até os 95 e 100 DAE para as cultivares Caiapó e Maravilha, respectivamente (Figura 4), quando as plantas entram na fase de maturação. Isso se deve ao fato de iniciar o perfilhamento e a alongação do colmo, fazendo que esse acumule matéria seca, para dar suporte estrutural à panícula.

Nota-se que o acúmulo de matéria seca do colmo + bainha na cultivar Caiapó, quando tratada com silicato, difere dos valores encontrados para nas plantas tratadas com calcário sendo este mais pronunciado a partir dos 102 DAE (Figura 5), quando ocorre uma tendência de maior acúmulo nas plantas tratadas com silicato, o que se mantém até o

final. Para a cultivar Maravilha observa-se diferença significativa apenas para os valores obtidos na coleta de 107 DAE, entretanto essa diferença não foi observado na última coleta.

Para ambas as cultivares o acúmulo de matéria seca de colmo + bainha foi superior ao de folha (Figura 5), notadamente a partir da primeira coleta 22 DAE até o final do ciclo.

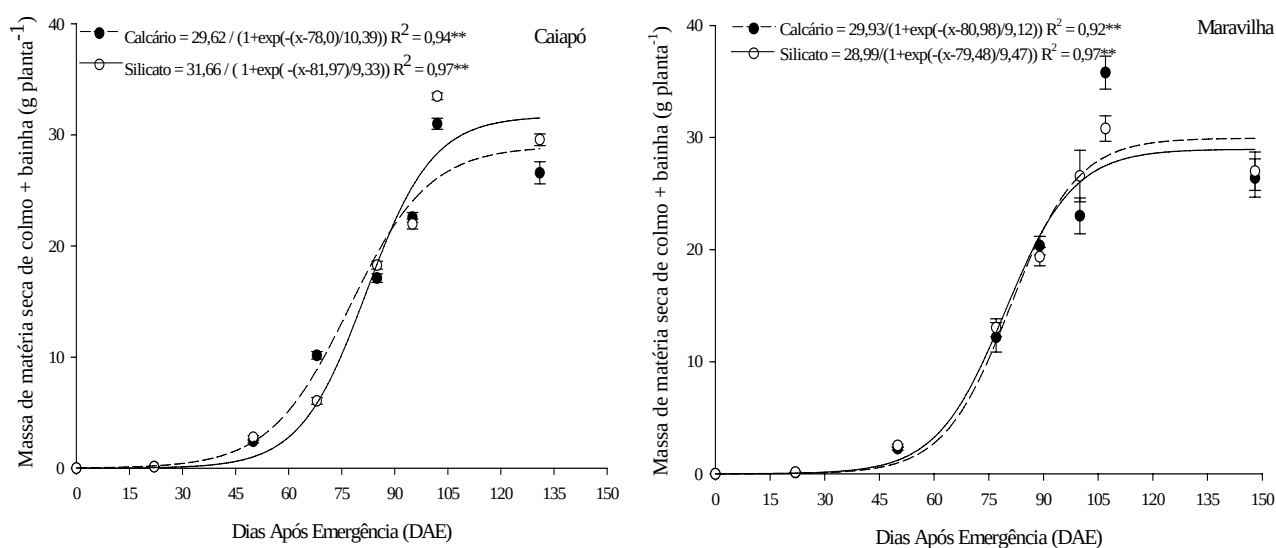


Figura 5. Acúmulo de massa de matéria seca de colmo + bainha (g planta^{-1}) pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha.

O acúmulo de silício no colmo + bainha (Figura 6) ocorreu de forma diferente entre as cultivares (Figura 4). Na cultivar Caiapó esse acúmulo foi mais gradual ao longo do desenvolvimento da planta, enquanto na Maravilha esse aumento foi mais expressivo do início do perfilhamento até próximo à antese (105 DAE). Observa-se que a cultivar Maravilha (Figura 6) apresentou diferenças quanto ao acúmulo de silício em função do corretivo utilizado no período de 50 a 89 DAE perfilhamento máximo e emborrachamento respectivamente, enquanto a cultivar Caiapó, apresentou maiores valores de acúmulo de silício na presença do silicato, maiores até do que a cultivar Maravilha desde perfilhamento máximo (50 DAE) até a maturação fisiológico, exceção apenas a fase de emborrachamento (85 DAE). Observa-se que após a antese 95 e 100 DAE para Caiapó os valores de silício continuaram a aumentar, enquanto para a cultivar Maravilha, esse tendeu a estabilizar.

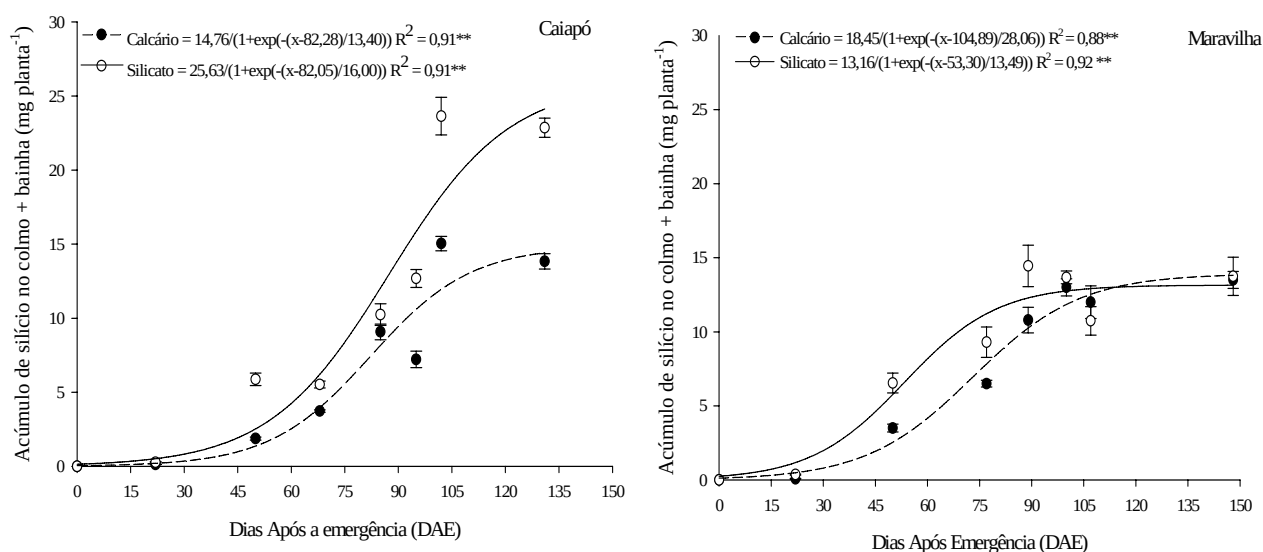


Figura 6. Acúmulo de silício no colmo + bainha (mg planta^{-1}) pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha.

Para o acúmulo de matéria seca de panícula, a curva que melhor ajustou os dados da cultivar Caiapó foi uma exponencial de segundo grau, enquanto para cultivar Maravilha a melhor curva foi a sigmóide (Figura 7).

A cultivar Caiapó apresentou maior acúmulo de matéria seca na presença de silicato em relação ao calcário na fase de grão leitoso, ou seja, aos 102 DAE, porém na fase da maturação fisiológica não observou-se diferença entre os tratamentos (Figura 7). Para cultivar Maravilha não houve diferença para o acúmulo de matéria seca da panícula em nenhuma das fases de coleta. Observa-se na Figura 7 que para ambas as cultivares os valores de acúmulo de matéria seca na panícula foram crescentes a partir do seu surgimento, sendo este mais pronunciado na cultivar Caiapó quando a fonte do corretivo foi o silicato.

Nota-se que na coleta no momento da antese, 95 e 100 DAE para cultivar Caiapó e Maravilha, respectivamente, os valores estiveram bem próximos. Entretanto, na coleta da fase de grão leitoso, 102 e 107 DAE, os valores obtidos com a cultivar Caiapó foram maiores, mantendo-se até o final. Isto provavelmente está relacionado às características genéticas do tipo de grão, como observado para massa de 1000 grãos (Tabela 35).

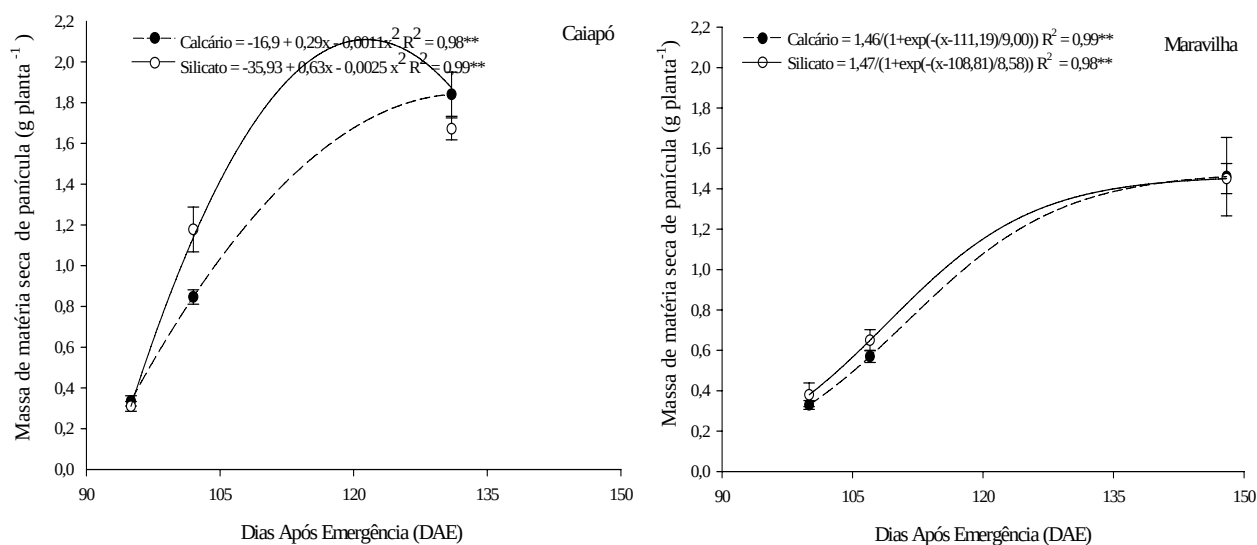


Figura 7. Acúmulo de massa de matéria seca na panícula (g planta^{-1}) pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha.

Na Figura 8 estão contidos os dados de acúmulo de silício na panícula, que foi melhor representado, para ambas as cultivares, por uma curva sigmóide. Na presença do silicato os valores obtidos foram maiores do que com calcário, em ambas as cultivares.

A cultivar Maravilha apresentou comportamento diferente para acúmulo de silício na panícula (Figura 8) do que o observado para matéria seca de panícula (Figura 7). Na presença de silicato, o aumento no acúmulo de silício na cultivar Maravilha foi mais expressivo do que o observado com o calcário, porém não houve diferença na última coleta, entretanto, para a cultivar Caiapó esse aumento foi mais gradativo tanto na ausência quanto na presença de silicato, porém os valores foram sempre maiores na presença do silicato em todas as coletas (Figura 8).

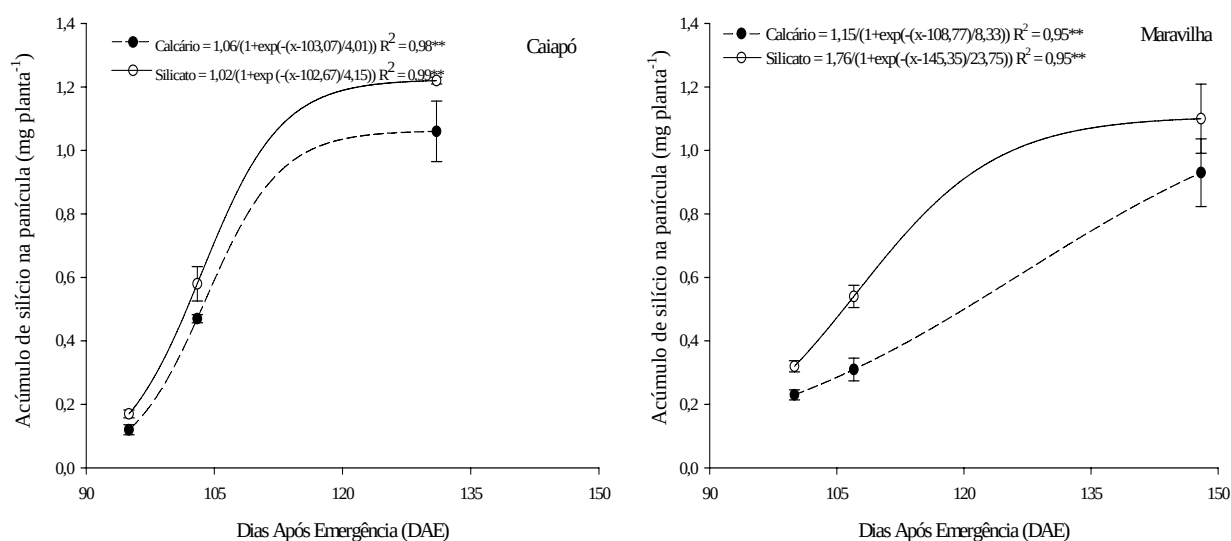


Figura 8. Acúmulo de silício na panícula (mg planta^{-1}) pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha.

A cultivar Caiapó apresentou maior acúmulo total de matéria seca na presença de silicato (Figura 9). A mesma tendência foi observada para o acúmulo de matéria seca de colmo + bainha (Figura 5).

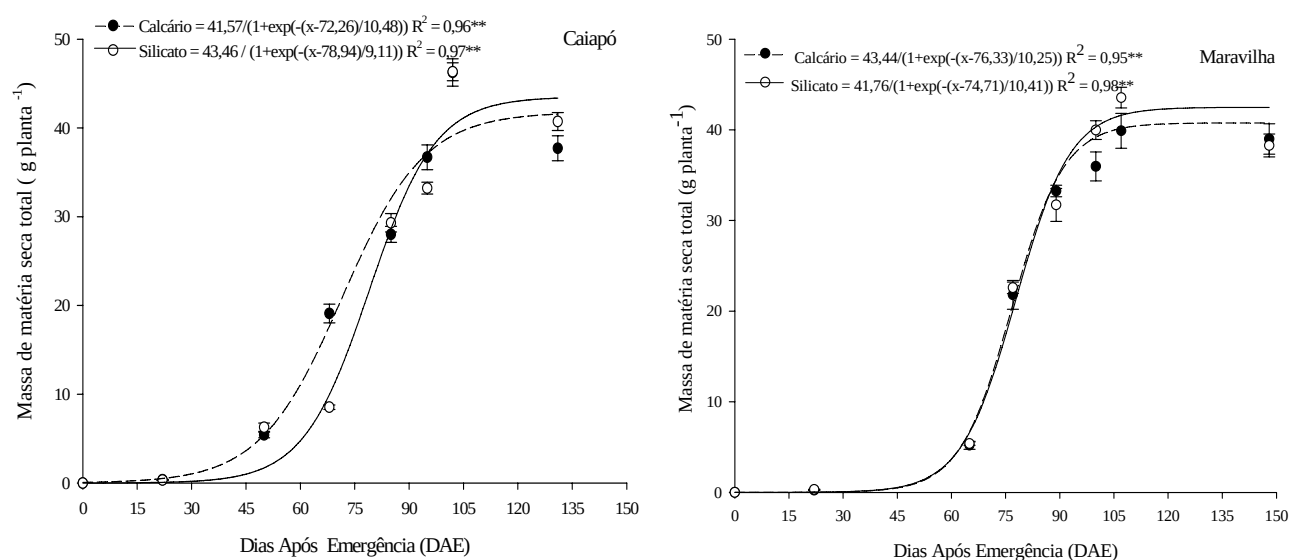


Figura 9. Acúmulo de massa matéria seca total (folha + colmo+bainha + panícula) (g planta^{-1}) pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha.

Para a cultivar Maravilha não foi observada a mesma tendência encontrada para a cultivar Caiapó, embora maiores valores foram observados no tratamento

com silicato nas coletas na época da antese e de grão leitoso aos 100 e 107 DAE respectivamente, na maturação fisiológica não houve diferença entre os tratamentos. Segundo Tanaka & Park (1966), Liang et al. (1994), Carvalho (2000) e Mauad et al. (2003b), o silício não influencia o acúmulo de matéria seca em plantas de arroz, enquanto para YOSHIDA et al. (1969), TAKAHASHI,(1995) e FARIA (2000) o silício aumenta o acúmulo de matéria seca.

O acúmulo total de silício manteve-se praticamente igual até os 22 DAE para a cultivar Caiapó (Figura 10), ocorrendo aumento a partir desse ponto no tratamento com silício. Para a cultivar Maravilha as diferenças de acúmulo, em função dos corretivos, também começaram a ocorrer logo após o início do perfilhamento (22 DAE), porém na maturação fisiológica não houve diferença entre os tratamentos. Para ambas as cultivares os maiores valores ocorreram na fase reprodutiva. Segundo Ma et al. (1986) a maior parte do silício é absorvido na fase reprodutiva.

Os valores encontrados para a cultivar Caiapó para acúmulo de silício nos diferentes órgãos analisados foram maiores do que aqueles encontrados na Maravilha, o que resultou no maior acúmulo total.

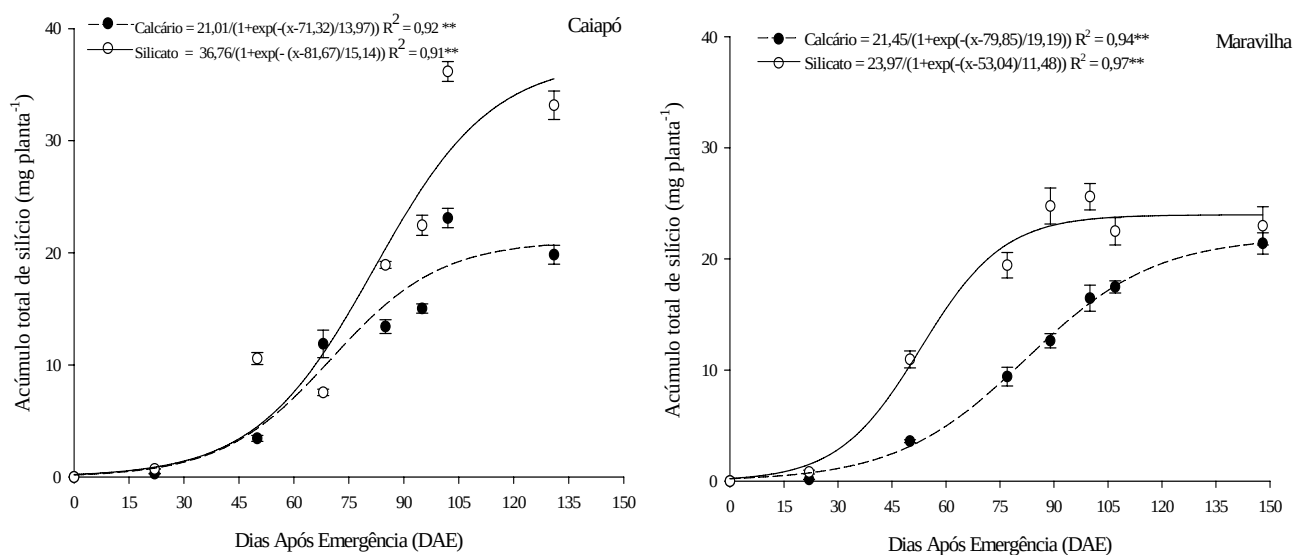


Figura 10. Acúmulo total de silício (mg planta^{-1}) pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha.

A Figura 11 apresenta o acúmulo de silício pelos diferentes órgãos aéreos das cultivares de arroz. Observa-se comportamento semelhante entre as cultivares na

ausência de silicato, ocorrendo acúmulo de silício na seguinte ordem decrescente: colmo + bainha > folha > panícula.

O acúmulo de silício nas folhas da cultivar Caiapó foi maior do que no colmo + bainha entre a diferenciação floral (65 DAE) e o emborrachamento (77 DAE), enquanto na cultivar Maravilha não se observou esta tendência, porém os valores do colmo + bainha foram sempre maiores que os observados na folha. Em ambas as cultivares os maiores acúmulos de silício ocorreram na fase reprodutiva. Isto provavelmente está relacionado à função estrutural do silício, dando sustentação para o colmo + bainha suportar o peso da panícula.

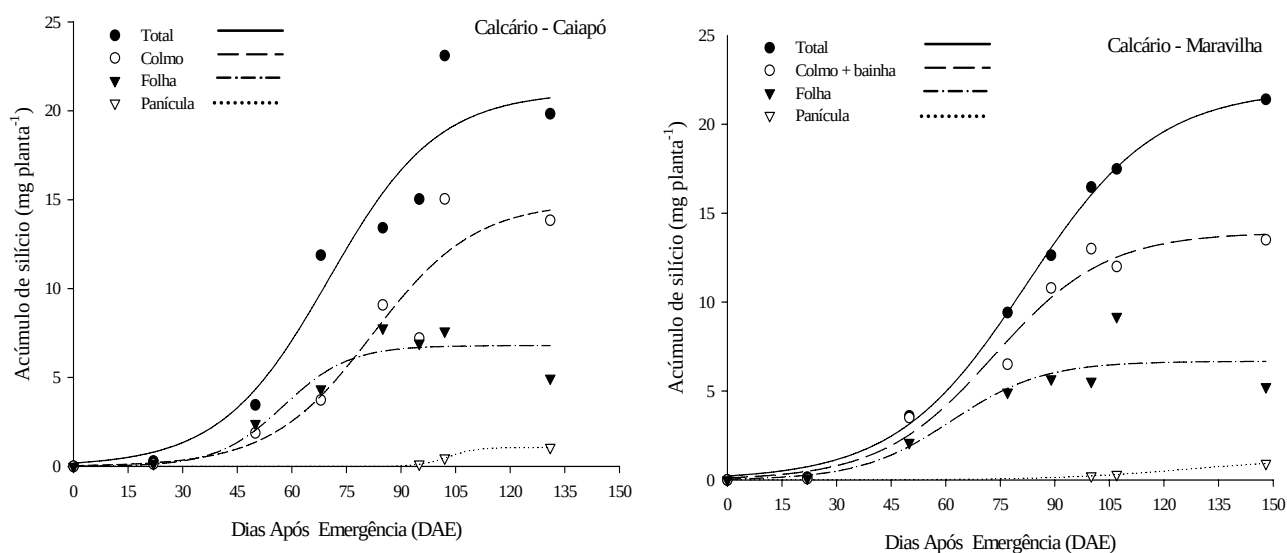


Figura 11. Acúmulo de silício (mg planta^{-1}) total, no colmo + bainha, na folha e na panícula pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha utilizando calcário.

Na Figura 12 estão os dados de acúmulo de silício pelos diferentes órgãos aéreos das cultivares de arroz quando da utilização do silicato como corretivo da acidez do solo. Observa-se comportamento semelhante ao encontrado com calcário (Figura 9), exceção ao acúmulo na folha da cultivar Maravilha, que apresentou a mesma tendência observada para a cultivar Caiapó quando utilizado silicato de cálcio.

A cultivar Caiapó em solo corrigido com silicato apresentou valores totais maiores de acúmulo de silício, assim como valores no colmo + folha superiores ao encontrados para Maravilha (Figura 12).

O acúmulo total de silício foi mais gradual na cultivar Caiapó, acompanhando o desenvolvimento da cultura, enquanto na cultivar Maravilha, parece ter se concentrado até 75 DAE e depois estabilizado, na cultivar Caiapó ele foi crescente até o final. Essa diferença pode estar relacionada às características genéticas que controlam a herança para eficiência de absorção e utilização de nutrientes, podendo essa ser mais eficiente para um determinado nutriente em uma determinado cultivar, enquanto em outra cultivar essa mesma capacidade esteja relacionada a outro nutriente. Cabe lembrar que as cultivares modernas respondem mais à adubação nitrogenada do que as cultivares do grupo tradicional, que, se cultivadas em doses elevadas de nitrogênio podem acamar (Arf, 2001)..

Diferença quanto à absorção de silício em genótipos de arroz foram relatadas por Winslow (1992), e Barbosa Filho et al. (1998).

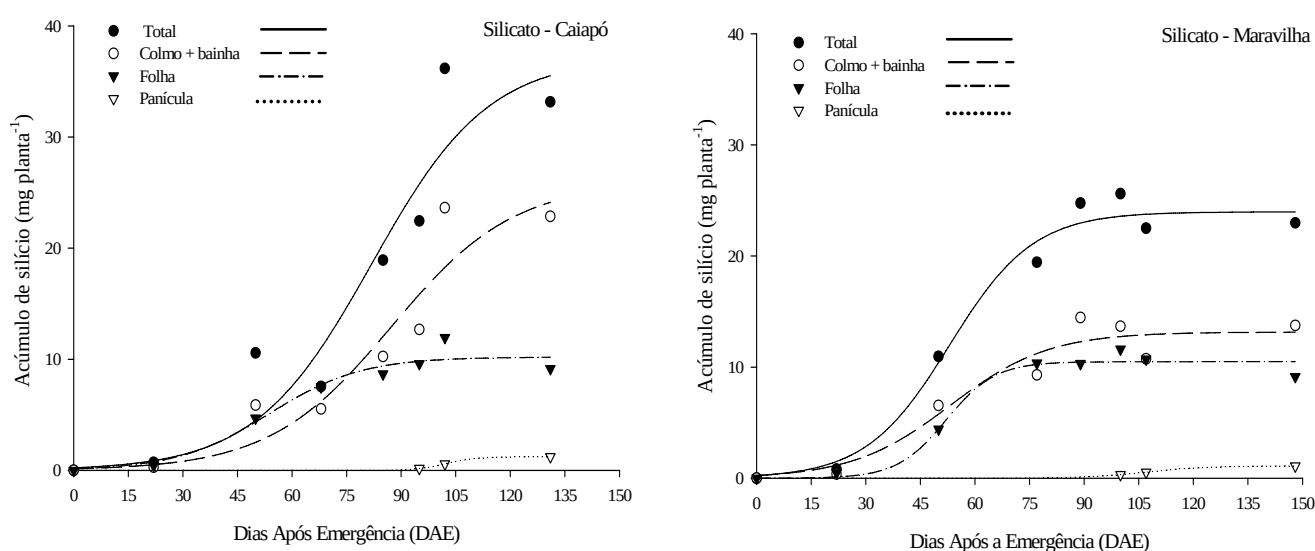


Figura 12. Acúmulo de silício (mg planta⁻¹) total, no colmo + bainha, na folha e na panícula pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha utilizando silicato.

7 CONCLUSÕES

O estresse hídrico reduziu o número de panícula por metro quadrado, o número total de espiguetas por panícula, a fertilidade das espiguetas e, conseqüentemente, a produtividade de grãos.

Sob condições de estresse hídrico a adubação silicatada, reduz o teor de prolina na fase vegetativa e reprodutiva e aumenta a atividade da peroxidase na fase reprodutiva, podendo ser um indicativo a tolerância a esse estresse.

As cultivares de arroz acumulam silício em quantidades diferentes.

A marcha de absorção e acúmulo de silício é gradativa na cultivar Caiapó, desde o perfilhamento até a maturação, enquanto na Maravilha o acúmulo total ocorre em menor tempo desde o perfilhamento até o emborrachamento.

Com a aplicação de silicato a Caiapó acumulou mais silício do que a cultivar Maravilha, principalmente no colmo + bainha.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS¹

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. Science**.v.1, p.96-103, 1998

ALCARDE, J.C. Corretivo de acidez do solo: características e interpretações. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, 1992. 26p. (Boletim Técnico 6)

ALVAREZ, C.C.A. **Produção do arroz em função da adubação com silício e nitrogênio no sistema de sequeiro e irrigado por aspersão**. Botucatu 2003, 70p. Dissertação (Mestrado em Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

¹ Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT – NBR-6023 – Informação e Documentação – Referências - Elaboração atualizada. Rio de Janeiro, 2002.

ANUÁRIO DA AGRICULTURA BRASILEIRA. São Paulo. Instituto FNP, 2006. 181 a 190.

ARF, O.; RODRIGUES, R.A.F.; SÁ, M.E.de.; CRUSCIOL, C.A.C. Resposta de cultivares de arroz de sequeiro ao preparo do solo e à irrigação por aspersão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p 871-79, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE AGRIBUSINESS. Agribusiness brasileiro: a história. São Paulo, 2002. 225p.

ASADA, K. Production and action of active of active oxygen speceis in photosynthetic tissues. In: FOYER, C.H., MULLINEAUX, P. (eds). Cause of Photo-oxidative stress and amelioration of defense systems in plantas. CRC Press, Boca Raton, Florida, 1994. p.77-104.

AZIZI, A.; MARTIN-TANGUY, J.; LARHER, F. Plasticity of polyamine metabolism associated with higt osmotic stress in rape leaf disc and with ethylene treatment. **Plant Growth Regulation**, v.21, p.153-163, 1997.

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. **Canadian Journal Botanic**, v.67, p.2356-63, 1989.

BARBOSA FILHO, M.P. *Nutrição e adubação do arroz*. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. 127p.

BARBOSA FILHO, M.P., SNYDER, G.H., ELLIOTT, C.L., DATNOFF, L.E., PRABHU, A.S., SILVA, O.F.da., KORNDÖRFER, G.H. Resposta do arroz de sequeiro à aplicação de silício. In: FERTBIO 1998, Caxambu. *Anais...* Lavras: Universidade Federal de Lavras / Sociedade Brasileira de Ciência do Solo / Sociedade Brasileira de Microbiologia, 1998. p.57

BARBOSA FILHO, M.P.; SNYDER, G.H.; PRABHU, A.S.; DATNOFF, L.E.; KORNDÖRFER, G.H. Importância do silício para a cultura do arroz (uma revisão de literatura). **Informações Agronomicas**, n.89, p.1-8, 2000 (Encarte técnico).

BARBOSA FILHO, M.P.; SNYDER, G.H.; FAGERIA, N.K.; DATNOFF, L.E.; SILVA, O.F. Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.325-30, 2001.

BECKER, T.W.; FOCK, H.P. The activity of nitrate reductase and pool sizes of some amino acids and some sugars in water-stressed maize leaves. **Photosynthese Res.**, v.8, p.267-74, 1986.

BOWLER, C.M.; Van MONTAGUE, D.; INZE. Superoxide dismutase and stress tolerance. **Annual Review Plant Physiology Plant Molecular Biology**, v. 42, p.83-116, 1992.

BATES, L.S., WALDREN, R.P., TEARE, I.D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil**, v.39, p.205-7, 1973.

BRESEGHELLO, F., CASTRO, E. M., MORAIS, O. P. Cultivares de arroz. In: BRESEGHELLO, F. STONE, L. F. **Tecnologia para arroz de terras altas**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1998, p. 41-53.

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, 2000. 119p. Dissertação (Mestrado em Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista.

CARVALHO-PUPATTO, J.G.; BULL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C.; MAUAD, M.; SILVA, R.H. Efeito de escória de alto forno no crescimento radicular e na produtividade de arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, p 1323-1328, 2003.

COELHO, M.B.; BERNARDO, S.; BRANDÃO, S.S.; CONDÉ, A.R. Efeito da água disponível no solo e de níveis de nitrogênio sobre duas variedades de arroz. **Revista Ceres**, v.24, p. 461-483, 1977.

CONAB. Disponível em <<http://www.conab.gov>>. Acesso em: 10 maio de 2006.

CUTLER, J.M.; SHAHAN, K.W.; STEPONKUS, P.L. Alteration of the internal water relations of rice in response to drought hardening. **Crop Science**, v.20, p.308 – 310, 1980.

CHANDRU, H.K.; KIM,E.; YONGIN, K.; CHO, K.; HAN, O. Kinetics of wound-induced activation of antioxidative enzymes in *Oryza sativa*: differential activation at different growth stages. **Plant Science**, v.16, p.935-941, 2003.

CHANG, C.J.; KAO; C.H. H_2O_2 metabolism during senescence of rice leaves: changes in enzyme activities in light and darkness. **Plant Growth Regulation**, v.25, p.11-15, 1998.

CHEN, C.; KAO, C.H. Osmotic stress and water stress have opposite effects on putrescine and proline production in excised rice leaves. **Plant Growth Regulation**, v.13, p.197-202, 1993.

CHERIF, M.; ASSELIN, A.; BELANGER, R.R. Defense response induced by soluble silicon in cucumber roots infected by *Pythium* spp. **Phytopathology**, v.84, p.236-242, 1994.

CRUSCIOL, C.A.C. **Crescimento radicular, nutrição e produção de cultivares de arroz de terras altas em função da disponibilidade de hídrica e fósforo**. Botucatu 2001, 111p. Tese (Livre-Docência na disciplina de Agricultura I) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

CRUSCIOL, C.A.C.; ARF, O.; SORATTO, R.P.; RODRIGUES, R.A.F.; MACHADO, J.R. Produtividade do arroz de terras altas em função de lâminas de água e da adubação mineral. **Científica**, v.31, p.189-200, 2003a.

CRUSCIOL, C.A.C.; ARF, O.; SORATTO, R.P.; RODRIGUES, R.A.F.; MACHADO, J.R. Manejo de irrigação por aspersão com base no Kc e adubação mineral na cultura de arroz de terras altas. **Bragantia**, v.62, p.465-75, 2003b.

CRUSCIOL, C.A.C.; ARF, O.; SORATTO, R.P.; MACHADO, J.R. Influência de lâminas de água e adubação mineral na nutrição e produtividade de arroz de terra -altas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p. 647-654, 2003c.

CRUSCIOL, C.A.C.; ARF, O.; SORATTO, R.P.; ANDREOTTI, M.; RODRIGUES, R.A.F. Absorção, exportação eficiência de utilização de nutrientes pela cultura do arroz de terras altas em função da lâmina de água aplicadas por asperção. **Acta Scientiarum**, v.25, p.97 - 102, 2003d.

DATNOFF, L.E., DEREN, C.W., SNYDER, G.H., JONES, D.B. Effect of calcium silicate on blast and brown spot intensities and yield of rice. **Plant Disease**, v.75, p.729-32, 1991.

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 Science**, v.34, p.733-37, 1994.

DINGKUN, M.; CRUZ, R.T.; O'TOOLE, J.C.; TURNER, N.C.; DOERFFLING, K. Responses of seven diverse rice cultivars to water deficits. III Accumulation of abscisic acid and proline in relation to leaf water-potential and osmotic adjustment. **Field Crops Research**, v. 27, p. 103-117, 1991.

EMBRAPA. Centro nacional de pesquisa de solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília: 1999, 421p.

EMBRAPA CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ E FEIJÃO. Arroz de terras altas. Santo Antonio de Goiás, [2001]. Foolder.

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of National Academic of Science of the United States of America. USA**, v.91, p.11-7, 1994.

EXLEY, C. Silicon in life: a bioinorganic solution to bioorganic essentiality. **Journal Inorganic Biochemistry**, v.69, p.139-44, 1998.

FAGERIA, N.K . Deficiência hídrica em arroz de sequeiro em arroz de cerrado e resposta ao fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.15, p 259-265, 1980.

FAGERIA, N.K.; BARBOSA FILHO, M.P.; STONE, L.F.; GUIMARÃES, C.M. Nutrição de fósforo na produção de arroz de terras altas. In: YAMADA, T., ABADÍA, S.R.S. Fósforo na agricultura brasileira. Potafos - Piracicaba, 2004, p.405-418, 2004.

FARIA, R.G.d. **Influência do silicato de cálcio na tolerância do arroz de sequeiro ao déficit hídrico do solo**. Lavras 2000, 47p. Dissertação (Mestrado – Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras.

FERRAZ, E.C. Ecofisiologia do arroz. In: Castro, P.C.R., FERREIRA, S.O, YAMADA, T. (Eds). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: POTAFOS, 1987. p. 185-202.

FERREIRA, C.M.; VILLAR, P.M.del. Aspecto da produção e do mercado do arroz. **Informe Agropecuário**. Belo Horizonte, v.25, n.222. p.11-18, 2004.

FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J.L. **Manual da cultura do arroz**. Jaboticabal: FUNEP, 1993. 221p.

FUMIS, T.F. **Variação nos teores de prolina e poliaminas em cultivares de trigo (*Triticum aestivum* L.) submetidos a déficits hídricos**. Botucatu, 1996, 121p. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas – Botânica) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, 1996.

FUMIS, T.F.; PEDRAS, J.F. Variação nos níveis de prolina, diamina e poliaminas em cultivares de trigo submetidas a déficits hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p 449-459, 2002.

GAO, X.; ZOU, C.; WANG, L.; ZHANG, F. Silicon improves water use efficiency in Maize plants. **Journal of Plant Nutrition**, v.27, n.8, p.1457-1470, 2004.

GIUDECE, R.M. del.; BRANDÃO, S.S.; GALVÃO, J.D.; GOMES, F.R. Irrigação do arroz por aspersão: profundidade de rega e limites de água disponível. **Experientiae**, v.18, p.103-23, 1974

GUIMARÃES, V.F. **Efeito do estress induzido por polietileno glicol (PEG 6000) em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L)**. Botucatu, 2001, 105p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 2001.

HALLIWELL, B. Oxidative damage, lipid peroxidation and antioxidant protection in chloroplasts. **Chemestry Physic Lipds**, v. 44, p.327-340, 1987.

HARE, P.D.; CRESS, W.A. Metabolic implications of stress induced praline accumulation in plants. **Plant Growth Regulation**, v.21, p.79-102, 1997.

HEERDEN, P.D.R.; VILLIERS, O. T. Evalutaion of praline accumulation as an indicator of drought tolerance in spring wheat cultivars. **South African Journal Plant and Soil**, v.13, p.17-21, 1996.

HOSSAIN, K.A.; HORIUCHI, T.; MIYAGAWA, S. Effects of silicate materials on growth and grain yield of rice plants grown in clay loam and sandy loam soils. **Journal of Plant Nutrition**, v.24, p.1-13, 2001.

HORIGUCHI, T. Mechanism of manganese toxicity and tolerance of plants. IV. Effects of silicon on alleviation of manganese toxicity of rice plants. **Soil Science Plant Nutrition**, v.34, p.65-73, 1988.

HSIAO, T.C.; O'TOOLE, J.C.; YAMBAO, E.B.; TURNER, N.C. Influence of osmotic adjustment on leaf rolling and tissue death in rice (*Oryza sativa* L.). **Plant Physiology**, v.75, p. 338-341, 1984.

JAGER, H.J.; MEYER, H.R. Effect stress on growth and proline metabolism of *Phaseolus vulgaris* L. **Oecologia**, v.30 p.83-86, 1977.

KANDPAL, R.P.; RAO, N.A. Water stress induced alterations in the properties of ornithine aminotransferase from ragi (*Eleusine coracana*) leaves. **Biochemistry International**, v.5, p. 297-302, 1982.

KIR'YAN, I.G., SHEVYAKOVA, N.I. Pathways of accumulation of free proline in NaCL-resistant cell line of *Nicotiana glauca*. **Soviet Plant Physiology**, v.31, p.551-624, 1984.

KIYOSUE, T.; YOSHIBA, Y.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; SHINOZAKI, K. A nuclear gene encoding mitochondrial proline dehydrogenase; an enzyme involved in proline metabolism, is upregulated by proline but down regulated by dehydration in *Arabidopsis*. **Plant Cell**, v.8, p.1323-1335, 1996

KORNDÖRFER, G.H.; DATNOFF, L.E.; CORRÊA, G.F. Influence of silicon on grain discoloration and upland rice growth of savana soils. **Journal of Plant Nutrition**, v. 22, p.93-102, 1999a

KORNDÖRFER, G.H., ARANTES, V.A., CORRÊA, G.F., SNYDER, G.H. Efeito do silicato de cálcio no teor de silício e na produção de grãos de arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciencias do Solo**, v.23 p.635-41, 1999b

KORNDÖRFER, G.H., SNYDER, G.H., ULLOA, M., PERDOMO, R., 4 POWELL, C., DEREN, C., DATNOFF, L.E. Soil and Plant silicon calibration for rice production. editora, p. 14-5, 1999c. (Manuscript prepared for the Rice Council Meeting, Belle Glade)

KONDORFER, G.H.; FARIA, R.J.; DATNOFF, L.F.; PEREIRA, L.E. Influencia do silicato de cálcio na tolerância do arroz de sequeiro ao déficit hídrico no solo. In: FERTBIO 2002. Rio de Janeiro 2002. **Anais...** Rio de Janeiro: CPGA-CS/UFRRJ, 2002. 1 CD-ROOM

KORNDORFER, G.H.; PEREIRA, H.S., NOLLA, A. Análise de silício: solo, planta e fertilizantes. Universidade Federal de Uberlândia Boletim técnico nº 2, Uberlândia, 34p, 2004.

KUZNETSOV, V.V.; SHEVYAKOVA, N.I. Stress responses of tabacco clles to high temperature and salinity. Proline accumulation and phosphorylation of polpeptides. **Physiologia Plantarum**, v.100, p.320-326, 1997.

KRAMER, P.J. Tensión hídrica y crecimiento de las plantas. In: KRAMER, P.J. Relaciones hídricas de suelos y plantas una síntesis moderna. EDUTEX - México, 1974, p.393-443.

LEIGH, R.A.; AHMAD, N.; JONES, R.G.W. Assessment of glicine betaine and praline compartmentation, by analysis of isolated beet vacuoles. **Planta**, v.153, p.34-41, 1981.

LEVINE, A.; TENHAKEN, R.; DIXON, R.; LAMB, C. H_2O_2 from the oxidative burst orchestrates the plant hypersensitive disease resistance response. **Cell**, v.79, p.583-589, 1994.

LIMA FILHO, O.F.de., LIMA, M.T.G.de., TSAI, S.M. O silício na agricultura. Inf. Agron., n.87, p.1-7, 1999. (Encarte Técnico)

LIMA, G.P.P. **Efeito do cálcio sobre o teor de poliaminas e atividades da peroxidase e redutase de nitrato em calos de arroz (*Oryza sativa* L. cv. IAC 4440).** Botucatu, 1994, 85p. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, 1994.

LIMA, M.D.S.; LOPES, N.F.; BACARIN, M.A.; MENDES, C.R. Efeito do estresse salino sobre a concentração de pigmentos e prolina em folhas de arroz. **Bragantia**, v.63, p.335-340, 2004.

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. **Communication Soil Science Plant Anal**, v.25, p.2285-97, 1994.

LIANG, Y.; SHEN, Q.; SHEN, Z.; MA, T. Effects of silicon on salinity tolerance of two barley cultivars. **Journal of Plant Nutrition**, v.19, p.173-183, 1996.

LIANG, Y. Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. **Plant and Soil**, v.209, p.217-224, 1999.

LOPES, N.F.; ARRIETA-MAZA, E.E. Atividade da redutase do nitrato e acúmulo de prolina livre em plantas de *Phaseolus vulgaris* L. em função de níveis de água e doses de nitrogênio. In: Congresso Brasileiro de Fisiologia vegetal 3, 1991, Viçosa. Resumo... Viçosa Universidade Federal de Viçosa, 1991.p.15

MA, J.F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a benefic element for crop plants. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDORFER, G.H. Silicon in agriculture. Amsterdam: Elsevier, 2001. v.8 p.17-39.

MA, J.F. Role of silicon in enhancing the resistanc of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Science Plant Nutrition**, v.50, p.11-18, 2004.

MACHADO, J.R. **Desenvolvimento da planta e produtividade de grãos de populações de arroz (Oryza sativa l.) irrigado por inundação em função de épocas de cultivo.** Botucatu, 1994. 237p. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

MADRUGA, L.A.N.; RENA, A.B. Variação no teor de prolina livre em folhas destacadas de cinco cultivares d arroz (Oryza sativa L) submetidas a desidratação. **Revista Ceres**, v.24 p.217-225, 1977.

MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição de plantas. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1980. 251p.

MARTINEZ, C.A.; MORENO, U. Expresiones fisiologicas de resistecia a la sequia en dos variedades de papa sometidas a estres hidrico. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.4, p.33-38, 1992.

MATSUSHIMA, S. Water and physiology of indica rice. **Japan Journal Crop Science** 102:9, 1968. Special tissue.

MATSUSHIMA, S. Crop science in rice: theory of yield determination and its application. Tokyo: Fuji, 1970. 379p.

MAUAD, M.; CURSICOL, C.A.C.; GRASSI FILHO, H.; CORRÊA, J.C. Nitrogen and silicon fertilization of upland rice. **Scientia Agrícola**, v.60, n.4, p. 761-765, 2003a.

MAUAD, M.; GRASSI FILHO, H.; CURSICOL, 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. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v.27, p.867-873, 2003b.

MELO, S.P.; KONDORFER, G.H.; KONDORFER, C.M., LANA, R.M.Q.; SANTANA, D.G. Silicon accumulation and water deficit tolerance in brachiaria grasses. **Scientia Agrícola**, v.60, n.4, p. 755-759, 2003.

MENGEL, K.E., KIRKBY, G.A. Further elements of importance. In: Principles of plant. Institute International Potasa. 4th Edition, 1987, p.573-588

MOREIRA, M.F., KLUGE. Arroz. In: CASTRO, P.R.C., KLUGE, R.A. (Eds.). **Ecofisiologia de cultivos anuais**. São Paulo: Nobel, 1999. p.91-108.

McKEAGUE, J.A.; CLINE, M.G. Silica in soil solution. II The adsorption of monosilic acid by soil by other substances. **Canadian Journal Soil Science**, v. 43, n.1, p.83-95, 1963.

NEPOMUCENO, A.L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J.R.B.; OYA, T. Tolerância à seca em plantas: Mecanismos fisiológicos e moleculares. Disponível em <<http://www.>>. Acesso em: ago2004

NOGUEIRA, R.J.M.C.; MORAES, J.A.P.V.; BURITY, H.A.; NETO, E.B. Alterações na resistência à difusão de vapor das folhas e relação hídricas em aceroleiras submetidas a déficit de água. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.13, p.66-74, 2001.

O'TOOLE, J.C.; CHANG, T.T. Drought resistance in cereals-rice a case study. In (Eds): MUSSELL H., STAPLES, R.S. Stress physiology of crop plants. New York, Wiley Interscience 1979. p.373-406.

PEDROSA, B.A. Condições climáticas para cultivar arroz: temperatura. **Lavoura Arroeira**, n.320, p.6-8, 1980.

PEREIRA, J.A.; SOBRINHO, J.T.; BELTRÃO, N.E.de.M. Resposta de cultivares tradicionais e melhoradas de arroz de sequeiro a diferentes níveis de umidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.29, p 857-65, 1994.

PIAU, W.C. **Viabilidade do uso de escória como corretivo e fertilizante**. Piracicaba, 1991. 99p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Estadual Paulista, 1991.

PLANETA ARROZ. Safra 2004/2005. Disponível em <<http://www.planetaarroz.com.br>>. Acesso em: 28 março.2005

PINHEIRO. B.da.S.; STEINMETZ, S.; STONE, L.F.; GUIMARÃES, E.P. Tipo de planta, regime hídrico e produtividade do arroz de sequeiro **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.20, p 87-95, 1985.

PINHEIRO, B.das.S.; STONE, L.F.; SILVA, S.C.da. Minimização do risco por deficiência hídrica em arroz de sequeiro na região dos cerrados. Santo Antônio de Goiás. GO: Embrapa Arroz e feijão, 1999, p.116-147.

PINHEIRO. B.da.S. Características morfofisiológica da planta relacionadas à produtividade. In: (Eds) Vieira, N.R.de.A. Santos, A.B.dos., SANT´ANA, E.P. A cultura do arroz no Brasil. Santo Antônio de Goiás. GO: Embrapa Arroz e feijão, 2000. 39p.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo da acidez do solo na soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.287-286, 2003.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo cultivado com cana-de-açúcar em vasos. **Scientia Agrícola**, v.57, n.4, p. 739-744, 2000.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M.; COUTINHO, E.L.M., ROQUE, C.G.; VILLAR, M.L.P. Avaliação da escória de siderurgia e de calcário como corretivo da acidez do solo no cultivo de alface. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.539-546, 2002.

RAIJ, B.van., CAMARGO, O.A. Sílica solúvel em solos. **Bragantia**, v.32, p.223-31, 1973.

RAIJ, B.van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo, Campinas: Instituto Agrônômica – Fundação IAC, 1996. 2ed. 285p.

RAIJ, B.van., ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade do solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônômica, 2001. 284p.

RAVEN J,A. Cycling silicon-the role of accumulation in plant. **New Phytologist**, v.158. p.419-421, 2003.

ROSSI, C.; LIMA G.P.P.; HAKVOORT, D.M.R. Atividade de peroxidases (EC 1.11.1.7) e teor de prolina em feijoeiro *Phaseolus vulgaris* L. cultivado em condições de salinidade. **Scientia Agrícola**, v.54, n.3, p. 123-127, 1997.

SANTOS, G.R.; KORNDORFER, G.H.; FILHO, J.C.R.; PELUZIO, E.R. Adubação com silício: influencia sobre as principais doenças e sobre a produtividade do arroz por inundação. **Revista Ceres**, v.50, p.1-8, 2003.

SAVANT, N.K.; SNYDER, G.H.; DATNOFF, L.E. Silicon management and sustainable rice production. **Advanced Agronomic**, v.58, p.151-99, 1997a.

SAVANT, N.K., DATNOFF, L.E., SNYDER, G.H. Depletion of plant-avaivable silicon in soils: a possible cause of declining rice yields. **Communication in Soil Science in Plant Analalysis**, v.28, p.1245-52, 1997b.

SAWAZAKI, H.E.; TEIXEIRA, J.P.F. Estresse de água no crescimento, produtividade e acúmulo de prolina em feijão. **Bragantia**, v.40, p.157 -166, 1981a.

SAWAZAKI, H.E.; TEIXEIRA, J.P.F. Variação do teor de prolina em folhas de feijão em função da disponibilidade de água no solo. **Bragantia**, v.40, p.47-56, 1981b

SEO, S.W.; OTHA, Y. Role of the hull in the ripening of rice plant. V Water loss in hull and development of rice kernel. **Japan Journal Crop Science**, v.51 , p.529-534, 1982.

SIEGEL, B.Z. Plant peroxidases – an organismic perspective. **Plant Growth Regulation**, v.12, p.303-312, 1993.

SINGH, T.N.; ASPINALL, D.; PALEG, L.; BOGGESE, S.F. Changes in praline concentration in excised plant tissues. **Australian Journal Biological Science**, v. 26, p.57-63, 1973.

SINSKA, I.; LEWANDOWSAKA, U. Polyamines and ethylene in the removal of embryonal dormancy in apple seeds. **Physiologia Plantarum**, v.81,p.59-64, 1991.

SCHMIDT, R.E.; ZHANG, X.; CHALMERS, D.R. Response of ptotosynthesis and superoxide dimutase to silica applied to creeping bentgrass grown under two fertility levels. **Journal of Plant Nutrition**, v.22, p.1763-1773, 1999.

SHAH, K.; KUMAR, R.G.; VERMA, S.; DUBEY, R.S. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidation enzymes in growing rice seedlings, **Plant Science**, v. 161, p.1135-1144, 2001

SHEVYAKOVA, N.I. Metabolism and the physiological role of proline in plants under conditions of water and salt stress. **Soviet Plant Physiology**, v.30, p.597-608, 1984.

SLOCUM, R.D. Tissue and subcellular localization of polyamines and enzymes of polyamine metabolism. In: Slocum R.D., Flores H.E (eds) *Biochemistry and Physiology of Polyamines in Plant*. Boca Raton, Florida p.94-101. 1991

SNYDER, G.H. Development of silicon soil test for Histosol-grown rice. *Belle Glade: Univ. Florida*, 1991. (EREC Res. Report).

STEINMETZ, S.; REYNIERS, F.N.; LIU, W.T.H. Favorable rainfall periods in upland rice regions of Brazil. In: UPLAND RICE WORKSHOP, 1982, Bauaké. An overview of upland rice research: proceedings. Los Banos: IRRI, 1984. p. 275-281

STEINMETZ, S. Estudos agrometeorológicos na cultura do arroz. Goiânia: EMBRAPA-CNPAF, 1986. 11p. (EMBRAPA.PNP de arroz, Projeto 001.80.002/8). Relatório final.

STEWART, C.R. The effect of wilting on proline metabolism in excised bean leaves in the dark. **Plant Physiology**, v.51, p.508-511, 1972.

STONE, L.F.; OLIVEIRA, A.B.de.; STEINMETZ, S. Deficiência hídrica e resposta de cultivares de arroz de sequeiro ao nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.14, p 295-301, 1979.

STONE, L.F.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Deficiência hídrica, vermiculita e cultivares. I efeito na produtividade do arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.19, p 695-707, 1984.

STONE, L.F. Absorção de P, K, Mg, Ca e S por arroz influenciada pela deficiência hídrica, vermiculita e cultivares. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.20, p 1251-58, 1985.

STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A.; SILVA, S.C.da. Tensão de água do solo e produtividade do arroz. EMBRAPA CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ E FEIJÃO. Comunicado Técnico, n.19, p.1-6, 1986

STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A. Resposta do arroz de sequeiro à profundidade de aração adubação potássica e condições hídrica do solo **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.31, p 885-95, 1996.

STONE, L.F.; SILVA, J.G. da. Resposta do arroz de sequeiro à profundidade de aração adubação nitrogênio e condições hídricas do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, p 891-97, 1998.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M.da. Arroz irrigado por aspersão. **Informe Agropecuário**. Belo Horizonte, v.25, n.222. p.70 - 79, 2004.

TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. In: MATUSUO, T., KUMAZAWA, K., ISHII, R., ISHIHARA, K., HIRATA, H. *Science of rice plant physiology*. Tokio: Nobunkyo, 1995, v:2, cap.5, p.420-433, 1995

TAKATSUKA, M.; MAKIHARA, D.; TSUDA, M.; HIRAI, Y.; TAKAMURA. Plant water relacion and silicon concntration in two rice varieties differing in salinity tolerance. **Japan Journal Tropical Agriculture**, v.45, p.259-265, 2001.

TANAKA, A.; PARK, Y.D. Significance of the absorption and distribution of silica in the growth of rice plant. **Soil Science Plant Nutrition**, v.12, p. 23-8, 1966.

TAYLOR, C.B. Proline and water déficit: ups, downs, ins ando ut. **Plant Cell**, Reckville,v.8,p. 1221-1224, 1996.

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BESTON, J.D.; HAULIN, J.L. Soil fertility and fertilizer. New York: Macmillam, 1993, p.634.

TORELLO, W.A., RICE, L.A. Effects of NaCl stress on proline and cation accumulation in salt sensitive and tolerant turfgrasses. **Plant and Soil**, v.93, p.241-47, 1986.

TRENHOLM, L.E., DUNCAN, R.R., CARROW,R.N., SNYDER, G.H. Influence of silica on growth, quality, and wear tolerance of seashore paspalun. **Journal of Plant Nutrition**, v.22, p.1763-1773, 1999.

TURNER, L.B., STEWART, G.R. The effect of water stress upon polyamine level in barley (*Hordeum vulgare L.*) leaves. **Journal Exp. Botanic**, v.37, p.170-7, 1986.

VERMAS, T.S.; MINHAS, R.S. Effect of iron and manganese interaction on paddy yield and iron and manganese nutrition in silicon-treated and untreated soil. **Soil Science**, v.147, p.107-15, 1989.

VERMAS, S.; DUBEY, R.S. Lead toxicity lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants. **Plant Science**, v.164, p.645-655, 2003.

VORM, P.D.J. Uptake of Si by five plant species, as influenced by variations in Si-supply. **Plant Soil**, v.56, p.153-6, 1980.

WANG, S.Y.; GALLETTA, G.J. Foliar application of potassium silicate induces metabolic changes ins strawberry plants. **Journal of Plant Nutrition**, v.21. p.157-167, 1998.

WALLACE, A. Relationships among nitrogen, silicon, and heavy metal uptake by plants. **Soil Science**, v.147, p.457-60, 1989.

WALLACE, A. Participation of silicon in cation-anion balance as a possible mechanism for aluminum and iron tolerance in some gramineae. **Journal Plant Nutrition**, v.15, p.1345-51, 1992.

WINSLOW, M.D. Silicon, disease resistance, and yield of rice genotypes under upland cultural conditions. **Crop Science**, v.32, p.1208-13, 1992.

YEO, A.R.; FLOWERS, S.A.; RAO, G.; WELFARE, K.; SENANAYAKE, N.; FLOWERS, T.J. Silicon reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) insaline conditions and this is accounted for by a reduction in the transpirational bypass flow. **Plant Cell and Environment**, v.22, p.559-565, 1999.

YOSHIDA, S., OHNISHI, Y., KITAGISHI, K. Role of silicon in rice nutrition. **Soil Plant Food**, v. 5, p. 127-33, 1959.

YOSHIDA, S., OHNISHI, Y., KITAGISHI, K. Chemical forms, mobility and deposition of silicon in rice plant. **Soil Science Plant Nutrition**, v.8, p.15-21, 1962.

YOSHIDA, S., AHA, S.B. The accumulation process of carbohydrate in rice varieeties in relation to the response to nitrogen in tropics. **Soil Science Plant Nutrition**, v.14 p. 153-62, 1968.

YOSHIDA, S., NAVESER, S.A., RAMIREZ, E.A. Effects of silica and nitrogen supply on some leaf characters of rice plant. **Plant Soil**, v.31, p.48-56, 1969.

YOSHIDA, S. Growth and development of the rice plant. In: YOSHIDA, S. *Fundamental of rice crop science*. Los Banos, 1981. cap.1, p.1-63.

YOSHIDA, S. Physiological aspects of rain yield. **Annual Revision Plant Physiology**, v.23 p. 437.1972.