



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
COPEAG - COORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA



# **PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

## **Dissertação de Mestrado**

**EFEITOS DA ADUBAÇÃO SILICATADA  
E LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO NA  
CULTURA DO MILHO**

**EDVALDO ELOY DANTAS JÚNIOR**

**Campina Grande  
Paraíba**





**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO E PESQUISA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**  
**COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**



**DISSERTAÇÃO**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO IRRIGAÇÃO E DRENAGEM**

**EFEITOS DA ADUBAÇÃO SILICATADA E LÂMINAS DE**  
**IRRIGAÇÃO NA CULTURA DO MILHO**

**EDVALDO ELOY DANTAS JÚNIOR**

**CAMPINA GRANDE**  
**Estado da Paraíba- Brasil**  
**Novembro de 2009.**

**EDVALDO ELOY DANTAS JÚNIOR**  
**Engenheiro Agrícola**

**EFEITOS DA ADUBAÇÃO SILICATADA E LÂMINAS DE  
IRRIGAÇÃO NA CULTURA DO MILHO**

Orientadora: **Dr. Lucia Helena Garófolo Chaves**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de Concentração em Irrigação e Drenagem, do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, Área de Concentração: Irrigação e Drenagem.

**DIGITALIZAÇÃO:**  
**SISTEMOTECA - UFCG**

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG**

D192e

Dantas Júnior, Edvaldo Eloy.

Efeitos da adubação silicatada e lâminas de irrigação na cultura do milho / Edvaldo Eloy Dantas Júnior. — Campina Grande, 2009.  
96 f.: il. color

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientadora: Profa. Dra. Lúcia Helena Garófolo Chaves.

1. Adubação Silicatada. 2. Milho Irrigado. 3. Produção de Grãos. I. Título.

CDU 631.893(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

EDVALDO ELOY DANTAS JUNIOR

EFEITOS DA ADUBAÇÃO SILICATADA E LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO NA CULTURA DO MILHO

BANCA EXAMINADORA

*Lucia Helena Garófalo Chaves*  
Dra. Lucia Helena Garófalo Chaves – Orientador

*Hans Raj Ghay*  
Dr. Hans Raj Ghayi – Examinador

*Adilson David de Barros*  
Dr. Adilson David de Barros – Examinador

PARECER

*Aprovado com Distinção*

*Aprovação com Distinção*

*Aprovado com Distinção*

NOVEMBRO - 2009

## DEDICATÓRIA E OFERECIMENTO

*A minha querida e amada mãe, **Lúcia Verônica**, a minha segunda mãe **Maria Bernadete**, ao meu pai **Edvaldo Eloy**, a minha irmã, **Lúcia Virginia**, aos meus irmãos, **Gabriel Luiz** e **João Miguel** e demais familiares. Ao meu grande amigo **Fernando Antônio**, o qual sempre estive me apoiando nos momentos de trabalho árduo.*

*Dedico.*

*Ao meu **Deus**, criador de todas as coisas, que me dá saúde e força para perseverar até conquistar meus objetivos.*

*Ofereço.*

## AGRADECIMENTOS

*Primeiramente a Deus e aos meus pais, Lúcia Verônica Castor do Rêgo e Edvaldo Eloy Dantas por terem proporcionado a minha existência nesse mundo.*

*Aos meus avôs, Aderbal Castor do Rêgo Inês de Araújo Castor por terem provido meios para meus estudos e minha criação e Eraldo de Moraes Dantas e Cibele Eloy.*

*A minha irmã, Lúcia Virginia, aos meus irmãos João e Gabriel, aos meus tios e tias, em particular minha tia Maria Bernadete Castor do Rêgo por todo incentivo, durante minha vida acadêmica, aos meus primos e primas e demais familiares.*

*A professora Dr. Lúcia Helena Garófalo Chaves, pela orientação e pelas amistosas cobranças com intuito de melhores precisões nos dados, tendo como consequência a conquista de um trabalho bem elaborado.*

*Aos professores Drs. Iêde de Brito Chaves, Hans Raj Gheyi, Adilson David de Barros, pelas contribuições prestadas culminando no êxito deste trabalho. Assim como aos demais professores do curso de pós-graduação.*

*Ao professor Dr. Gaspar Henrique Korndörfer, professor titular do núcleo de solos da Universidade Federal de Uberlândia, pelas contribuições prestadas e apoio nas análises dos dados.*

*Aos colegas Reginaldo Nobre, Frederico, Gilberto Neto, Vinicius Campus, René Medeiros, José Sebastião pela força nos momentos de condução do experimento, em especial a Fernando Antonio.*

*Aos demais colegas da pós-graduação e da graduação do curso de engenharia agrícola.*

*Aos funcionários do laboratório de solos do Departamento de Engenharia Agrícola, Chico, Doutor, Wilson, José Maria, Pedro.*

*A RecMix do Brasil pela doação de Agrossilício, fonte de silício utilizada no experimento.*

*A coordenação de pós-graduação de engenharia agrícola.*

*E a Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudos oferecida.*

# ÍNDICE

	Páginas
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	viii
<b>LISTA DE TABELAS</b>	ix
<b>RESUMO</b>	xii
<b>ABSTRACT</b>	xiii
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	1
<b>2. OBJETIVOS</b>	3
2.1. Objetivo geral	3
2.2. Objetivos específicos	3
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	4
3.1. Silício	4
3.1.1. <i>Principais características dos silicatos</i>	5
3.1.1. <i>Silício na planta</i>	6
3.2. Fósforo	9
3.3. Interação do silício com o fósforo	11
3.4. Efeito da escória de siderurgia na disponibilidade de fósforo	12
3.5. Cultura do milho	13
3.5.1. <i>Exigências hídricas do milho</i>	16
3.5.2. <i>Necessidades nutricionais do milho</i>	18
3.6. Irrigação do milho	19
3.6.1. <i>Evapotranspiração</i>	19
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b>	22
4.1. Localização do experimento e clima	22
4.2. Tratamentos e delineamento experimental	22
4.3. Irrigação	23
4.3.1. <i>Equipamentos de irrigação</i>	23
4.3.2. <i>Estimativa da evapotranspiração de referência</i>	25
4.3.3. <i>Evapotranspiração da cultura (ETc)</i>	25
4.3.4. <i>Cálculo das lâminas de irrigação e tempo de irrigação</i>	26
4.4. Caracterização do solo utilizado	27
4.5. Instalação e condução do experimento	28
4.6. Variáveis de crescimento analisadas	30
4.6.1. <i>Comprimento do caule</i>	30
4.6.2. <i>Diâmetro do caule</i>	31
4.6.3. <i>Área foliar</i>	31
4.6.4. <i>Massa seca da parte aérea (MSPA)</i>	31
4.7. Teor relativo de água na folha (TRA)	31
4.8. Teores de fósforo e silício na parte aérea da planta	32
4.9. Produção de milho	33
4.10. Eficiência do uso da água (EUA)	33
4.11. Análise dos dados	33
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	34
5.1. Total de água aplicada no milho	34
5.2. Variáveis de crescimento analisadas	34
5.2.1. <i>Comprimento do caule</i>	34
5.2.2. <i>Diâmetro do caule</i>	40



## ÍNDICE

	Páginas
5.2.3. <i>Área foliar</i>	42
5.2.4. <i>Massa seca da parte aérea (MSPA)</i>	44
5.3. Teor relativo de água na folha (TRA)	48
5.4. Conteúdo de silício e fósforo na parte aérea da planta	50
5.4.1. <i>Conteúdo de silício na parte aérea da planta</i>	50
5.4.2. <i>Conteúdo de fósforo na parte aérea da planta</i>	54
5.5. Produção de milho	59
5.6. Eficiência do uso da água (EUA)	65
<b>6. CONCLUSÕES</b>	71
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	73
<b>8. APÊNDICES</b>	87

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Curva do coeficiente de cultura ( $K_c$ ) do milho, conforme Doorenbos e Pruitt (1977) .....	21
<b>Figura 2:</b> Esquema de distribuição dos tratamentos com a irrigação em faixas .....	22
<b>Figura 3:</b> Equipamentos de regularização do sistema de irrigação e tubulação principal .....	23
<b>Figura 4:</b> Esquema de acionamento das unidades de irrigação .....	24
<b>Figura 5:</b> Gotejador Katif, inserido na linha de polietileno irrigando o vaso com o milho .....	24
<b>Figura 6:</b> Desbaste das duas primeiras plantas .....	30
<b>Figura 7:</b> Comprimentos de caule nas diferentes fases do desenvolvimento do milho em função das lâminas de irrigação aplicada .....	38
<b>Figura 8:</b> Variação da produção de grãos em função das lâminas de irrigação aplicadas .....	64
<b>Figura 9:</b> Variação da produção de grãos de milho em função da adubação silicatada .....	65
<b>Figura 10:</b> Comportamento das médias da eficiência do uso da água na produção de grãos de milho, com referencia às lâminas de irrigação .....	67
<b>Figura 11:</b> Comportamento das médias da eficiência do uso da água na produção de grãos de milho, com referencia às dosagens de adubação com silício .....	67

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Atributos físico-hídrico e químicos do solo utilizado no experimento ....	28
<b>Tabela 2.</b> Lâminas de irrigação acumuladas nas fases de avaliação das plantas de milho .....	34
<b>Tabela 3.</b> Quadrados médios da análise de variância do comprimento do caule nas diferentes fases vegetativas das plantas, em função das lâminas de irrigação e doses de silício. ....	35
<b>Tabela 4:</b> Valores médios do comprimento do caule, em cm, nas diferentes fases vegetativas das plantas, em função das lâminas de irrigação e doses de silício .....	37
<b>Tabela 5.</b> Médias do comprimento de caule, em cm, dos desdobramentos das lâminas de irrigação dentro das doses de silício .....	39
<b>Tabela 6:</b> Médias do comprimento de caule, em cm, dos desdobramentos das doses de silício dentro de cada lâmina de irrigação aplicada .....	40
<b>Tabela 7:</b> Resumo da análise de variância do diâmetro do caule em diversas fases de crescimento do milho .....	41
<b>Tabela 8:</b> Valores médios do diâmetro do caule, em mm, em função da lâmina de irrigação e da adubação silicatada aplicada .....	42
<b>Tabela 9:</b> Resumo da análise de variância da área foliar em diversas fases de crescimento do milho. ....	43
<b>Tabela 10:</b> Valores médios da área foliar em função da lâmina de irrigação e da adubação silicatada aplicada .....	44
<b>Tabela 11:</b> Resumo da análise de variância da matéria seca da parte aérea (MSPA) em diversas fases de crescimento do milho .....	45
<b>Tabela 12:</b> Valores médios da matéria seca da parte aérea (MSPA) em função da lâmina de irrigação e da adubação silicatada aplicada .....	46
<b>Tabela 13:</b> Médias da matéria seca da parte aérea (MSPA) dos desdobramentos das lâminas de irrigação dentro das doses de silício .....	47

<b>Tabela 14:</b> Médias da matéria seca da parte aérea (MSPA) dos desdobramentos das doses de silício dentro de cada lâmina de irrigação aplicada .....	48
<b>Tabela 15:</b> Resumo da análise de variância do teor relativo de água na folha (TRA) em diversas fases de crescimento do milho .....	49
<b>Tabela 16:</b> Valores médios do teor relativo de água nas folhas (TRA, %) em função da lâmina de irrigação e da adubação silicatada aplicada .....	50
<b>Tabela 17:</b> Resumo da análise de variância do teor de silício na parte aérea, nas fases de floração e produção .....	51
<b>Tabela 18:</b> Valores médios do teor de silício na parte aérea da planta, em função da lâmina de irrigação e da adubação silicatada aplicada .....	52
<b>Tabela 19:</b> Análise do desdobramento das lâminas de irrigação dentro de cada dose de silício aplicada, na época da floração e produção .....	52
<b>Tabela 20:</b> Médias dos teores de silício na parte aérea da planta, para os desdobramentos das lâminas de irrigação aplicadas dentro de cada dose de silício ..	53
<b>Tabela 21:</b> Análise do desdobramento das doses de silício dentro de cada lâmina de irrigação aplicada, na época da floração e produção .....	53
<b>Tabela 22:</b> Médias dos teores de silício na parte aérea da planta, para os desdobramentos das doses de silício dentro de cada lâmina de irrigação aplicada ..	54
<b>Tabela 23:</b> Resumo da análise de variância do teor de fósforo na parte aérea da planta, nas fases de floração e produção .....	55
<b>Tabela 24:</b> Valores médios do teor de fósforo na parte aérea da planta, em função da lâmina de irrigação e da adubação silicatada aplicada .....	56
<b>Tabela 25:</b> Análise do desdobramento das lâminas de irrigação dentro de cada dose de silício aplicada, na época da floração e produção .....	56
<b>Tabela 26:</b> Médias dos teores de fósforo na parte aérea da planta, para os desdobramentos das lâminas de irrigação aplicadas dentro de cada dose de silício..	57
<b>Tabela 27:</b> Análise do desdobramento das doses de silício dentro de cada lâmina de irrigação aplicada, na época da floração e produção .....	58
<b>Tabela 28:</b> Médias dos teores de fósforo na parte aérea da planta, para os desdobramentos das doses de silício dentro de cada lâmina de irrigação aplicada ..	58



<b>Tabela 29:</b> Análise de variância da produção do milho .....	59
<b>Tabela 30:</b> Valores médios de produção de grãos dos milhos dentro de cada tratamento .....	60
<b>Tabela 31:</b> Análise do desdobramento das lâminas de irrigação dentro de cada dose de silício aplicada .....	61
<b>Tabela 32:</b> Médias de produção de grãos dos desdobramentos das lâminas de irrigação dentro de cada dose de silício aplicada .....	62
<b>Tabela 33:</b> Análise do desdobramento das doses de silício dentro de cada lâmina de irrigação aplicada .....	63
<b>Tabela 34:</b> Médias de produção de grãos dos desdobramentos das doses de silício dentro de cada lâmina de irrigação aplicada .....	63
<b>Tabela 35:</b> Análise de variância eficiência do uso da água (EUA) .....	65
<b>Tabela 36:</b> Valores médios da eficiência do uso da água dentro de cada fonte de variação .....	66
<b>Tabela 37:</b> Análise de variância das médias de EUA no desdobramento das lâminas de irrigação dentro de cada dose de silício aplicada .....	68
<b>Tabela 38:</b> Médias da eficiência do uso da água na produção de grãos para os desdobramentos das lâminas de irrigação aplicada dentro de cada dose de silício ..	69
<b>Tabela 39:</b> Análise de variância das médias de EUA do desdobramento das doses de silício dentro de cada lâmina de irrigação aplicada .....	69
<b>Tabela 40:</b> Médias da eficiência do uso da água na produção de grãos para os desdobramentos das doses de silício dentro de cada lâmina de irrigação aplicada. .	70

## EFEITOS DA ADUBAÇÃO SILICATADA E LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO NA CULTURA DO MILHO

*Autor: Edvaldo Eloy Dantas Júnior  
Orientadora: Dr. Lucia Helena Garófolo Chaves*

### RESUMO:

O experimento foi conduzido sob condições de casa de vegetação pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, localizada pelas coordenadas geográficas: 7°15'18" de latitude Sul, 35°55'28" de longitude Oeste, altitude média de 550m. Considera-se que a aplicação de resíduos siderúrgicos, em doses que reflitam o incremento de silício como nutriente e não como corretivo de acidez do solo, propicia a saturação dos sítios de adsorção de fósforo no solo, tornando o fósforo mais absorvível pelas plantas. Outro ponto de importância é que o silício tende a formar uma camada extra na célula propiciando maior resistência à parede celular, tornando, a planta, mais resistente a danos mecânicos e ao estresse hídrico. Objetivou-se, portanto, avaliar os efeitos de silício, presente em escória de siderurgia, e lâminas de água, no desenvolvimento de plantas de milho. Os tratamentos resultaram da combinação de quatro lâminas de irrigação referentes à reposição de água de 50, 75, 100 e 125 % da evapotranspiração da cultura, com quatro doses de silicato de cálcio e magnésio correspondentes a 0, 300, 600 e 900kg ha<sup>-1</sup> de silício. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, sendo as lâminas de água distribuídas em faixas e as doses de silício compondo as subparcelas. Verificou-se que as variáveis de crescimento como comprimento e diâmetro do caule, área foliar e massa seca da parte aérea foram afetadas pelas lâminas de irrigação e/ou pela adubação silicatada. A produção do milho foi significativamente influenciada pelas dosagens de silício e lâminas de água, obtendo-se a maior produção de grãos com a dosagem de 600 Kg.ha<sup>-1</sup> de silício, e nas maiores lâminas de irrigação. A melhor eficiência do uso da água para produção de grãos, foi nos tratamentos de 600Kg . ha<sup>-1</sup> combinada com a lâmina de reposição de 125 % da ET<sub>c</sub>.

**Palavras-chave:** adubação silicatada, milho irrigado, produção de grãos.

## EFFECTS OF SILICATE FERTILIZER AND IRRIGATION BLADES IN CORN GROWTH

*Author: Edvaldo Eloy Dantas Júnior*

*Advisors: Dr. Lucia Helena Garófolo Chaves*

### ABSTRACT:

The experiment was conducted under greenhouse conditions from the Department of Agricultural Engineering Technology Center and Natural Resources, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, located at the geographical coordinates: 7° 15' 18" south latitude, 35° 55' 28" west longitude, average elevation of 550m. It considers that the application of steel industry residues in doses that reflect the growth of silicon as a nutrient and not as a corrective of soil acidity leads to the saturation of sites of adsorption of phosphorus in the soil, making phosphorus more absorbable by the plants. Another point of importance is that silicon tends to form an extra layer in the cell providing greater rigidity to the cell wall, making the plant more resistant to mechanical damage and to water stress. So the objective, for both, to assess the effects of silicate, present in steel industry waste, and water blades on the corn plants development. The treatments were the combinations of four irrigation levels concerning water replacement of 50, 75, 100 and 125% of crop evapotranspiration, with four doses of calcium silicate and magnesium corresponding to 0, 300, 600 and 900kg ha<sup>-1</sup> of silicon. The experimental design was in a randomized block in split plots, and the irrigation water divided into tracks and silicon levels composing subplots. It was found that the growth variables such as length and stem diameter, leaf area and shoot dry weight were influenced by irrigation water and/ or silicate fertilization. Corn yield was significantly influenced by the doses of silicate and water blades, it was obtained the largest grain production with the silicate dosage of 600kg ha<sup>-1</sup>, and higher irrigation. The highest efficiency of water use for grain production was with the treatments of 600kg. ha<sup>-1</sup> combined with the 125% blade replacement of the ETc.

Keywords: Silicate fertilization, irrigated corn, grain production.

## *1 » INTRODUÇÃO*

---

A demanda crescente e desordenada dos recursos naturais implica na necessidade do desenvolvimento de técnicas de produção e uso de materiais, de forma cada vez mais otimizada.

A produção agrícola apresenta um amplo número de práticas que podem ser substituídas ou redimensionadas, para mitigar ações que causem danos ambientais. Enfatiza-se que a substituição das técnicas que apresentam uso desordenado da água em perímetros de irrigação por métodos mais eficientes de aplicação deste recurso, assim como a adequação das excessivas adubações minerais que têm potencial de se tornarem fontes poluidoras do ambiente, por técnicas que minimizem os efeitos maléficos da adubação inadequada, e o uso de rejeitos industriais, ricos em nutrientes, para suplementação mineral às plantas, são formas de atenuar os impactos ambientais provocados pelas atividades agropecuárias.

Materiais como as escórias de siderurgias, ricas em silicato de cálcio e magnésio, estão sendo amplamente utilizadas na agricultura, sobremaneira em países com alto padrão tecnológico, como acontece no Japão (Prado, 2000). Essas escórias, quando aplicadas aos solos, têm efeito sobre suas propriedades físico-químicas tal como na nutrição das plantas, uma vez que são fontes de silício, cálcio e magnésio.

O silício não é considerado essencial para vegetais superiores, de vez que não atende aos critérios diretos e indiretos de essencialidade, porém diversos pesquisadores, avaliando os efeitos das escórias de siderurgia tanto nos solos como nas plantas, têm atribuído os resultados favoráveis encontrados em suas pesquisas, ao efeito do silício contido nessas escórias.

Dentre os benefícios ocasionados pelo uso de adubação silicatada às plantas, relatados na literatura, tem-se resistência às doenças e pragas, tolerância à toxicidade por metais pesados, tolerância a estresses hídricos e salinos, menor transpiração, promoção de crescimento e nodulação em leguminosas, efeito na atividade de enzimas e na composição mineral, melhoria da arquitetura da planta facilitando a mecanização, redução no acamamento e conseqüente aumento da taxa fotossintética e aumento de produtividade, principalmente em cana-de-açúcar.



Na agricultura existe um grande impasse quanto à disponibilização de fósforo para as plantas, pois muitas vezes o fósforo existente nos solos não se encontra prontamente assimilável pelos vegetais e, quando adicionado aos solos, por meio de fertilizantes, pode tornar-se imobilizado, continuando não disponível às plantas. Com isto, cria-se a necessidade da aplicação de grandes quantidades de adubo fosfatado, nas áreas cultivadas. Dentro deste contexto alguns estudos indicam que a presença de silício no solo propicia a saturação dos sítios de adsorção de fósforo no solo, tornando o elemento mais disponível para as plantas.

Apesar dos vários relatos na literatura a respeito dos efeitos benéficos do silício, tanto para a planta como para o solo, outros tantos aparecem de forma contraditória, em razão de ainda não se conhecer exatamente as funções do silício para as plantas, como ele atua na sua fisiologia, quais as plantas mais beneficiadas com sua presença e quais as doses mais adequadas para cada tipo de cultura. Em relação aos solos, mais especificamente no que diz respeito à sua contribuição na melhoria da disponibilidade do fósforo, também são encontrados na literatura resultados contraditórios, o que é compreensível, uma vez que este mecanismo é influenciado por vários fatores como, por exemplo, os tipos de minerais que predominam nos solos, os quais estão relacionados com o grau de intemperismo dos mesmos, o pH dos solos e as quantidades de silício que são utilizadas.

Face ao que foi exposto, fica evidente que os efeitos do uso de escórias de siderurgias, ricas em silício na agricultura, precisam ser mais pesquisados, sob todos os aspectos, em particular dos efeitos inferidos às culturas.

## **2 » OBJETIVOS**

---

---

### **2.1. Objetivo Geral**

Objetivou-se com este trabalho avaliar os efeitos do silício presente em escória de siderurgia, e lâminas de água no desenvolvimento de plantas de milho cultivadas em condições de ambiente protegido (casa de vegetação).

### **2.2. Objetivos Específicos**

1. Estudar o crescimento, desenvolvimento e produção do milho submetido às doses crescentes de silício e diferentes lâminas de água;
2. Avaliar a ação do silício nos quantitativos de fósforo absorvido pelas plantas;
3. Avaliar a ação do silício nos quantitativos de silício absorvido pelas plantas;
4. Identificar a lâmina de irrigação aliada às doses de silício, que reflita na maior produção de grãos de milho;
5. Avaliar os efeitos do silício no que se refere à otimização do uso eficiente da água para a produção de grãos de milho adubado com esse elemento.

### 3.1. Silício

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante, em peso, na crosta terrestre e componente majoritário de minerais do grupo dos silicatos (RAIJ, 1991). Na natureza, encontra-se combinado com outros elementos, principalmente o oxigênio, formando os tetraedros de silício ( $\text{SiO}_4$ ). Jackson (1964) afirma que 80 % dos minerais das rochas ígneas e metamórfica são compostos de silicatos.

O dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), vulgarmente chamado sílica, é um dos mais importantes compostos de silício que ocorrem na natureza. Dentre as formas cristalinas tem-se o quartzo, a tridimita e a cristobilita, sendo o quartzo a forma mais comum e, quando cristalizado, é o principal componente das areias brancas (FASSBENDER, 1987).

Mesmo sabendo que o silício é um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre e que a maioria dos solos contém consideráveis quantidades de silício, cultivos consecutivos podem reduzir o nível deste elemento até o ponto em que a adubação com silício seja necessária para a obtenção de máximas produções (KORNDÖNFER & DATNOFF, 1995). Para Nascimento et al. (2009), os principais drenos de silício nos solos incluem a precipitação deste elemento em soluções, a polimerização de ácidos monossilícicos, formando ácidos polissilícicos, lixiviação, adsorção em óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, além da absorção pelas plantas.

Segundo Korndöner et al. (2002), as principais formas de silício, do ponto de vista agrônomico, são: a) silício solúvel ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ - ácido monossilícico) que, desprovido de cargas elétricas, tem interessantes consequências no comportamento da sílica com relação aos vegetais (RAIJ & CAMARGO, 1973); b) silício adsorvido ou precipitado com óxido de ferro e alumínio e nos minerais silicatados (cristalinos ou amorfos).

### 3.1.1. Principais características dos silicatos

Os silicatos de cálcio e magnésio são constituídos, primordialmente, de  $\text{CaSiO}_3$  e  $\text{MgSiO}_3$ . Segundo Korndörfer et al. (2002) os efeitos benéficos da aplicação de silicatos de cálcio e magnésio estão associados, normalmente, ao aumento da disponibilidade do silício, à elevação do pH do solo e ao aumento de cálcio e magnésio trocáveis no solo, promovendo maior e menor saturação por bases e alumínio, respectivamente. Para os referidos pesquisadores os silicatos podem reduzir a toxicidade do ferro (Fe), alumínio (Al) e manganês (Mn) para as plantas, além de aumentar a disponibilidade de fósforo (P) no solo.

Os silicatos têm, no solo, comportamento similar ao dos carbonatos de cálcio e magnésio, sendo capazes de elevar o pH e neutralizar o alumínio trocável. Seu efeito como corretivo de acidez do solo foi explicado por Alcarde (1992), que demonstra a ação neutralizante do silicato nas equações 1, 2 3 e 4.



O cálculo para recomendação dos silicatos, por terem comportamento semelhante ao dos carbonatos, pode ser feito através de qualquer um dos métodos de recomendação de calagem. Vale salientar que, em solos corrigidos, isto é, com pH acima de 6,0 e/ou saturação de bases acima de 60%, as doses de silicato a serem aplicadas não devem superar os  $800 \text{ kg ha}^{-1}$  (KORNDÖRFER et al., 2002).

A correção da acidez do solo é feita, tradicionalmente, com o uso de calcários; no entanto, muitos resíduos industriais, por terem na sua composição elementos que podem substituir esses calcários, vêm sendo pesquisados quanto à viabilidade de seu uso na agricultura. Dentre esses resíduos se tem a escória de siderurgia, consti-



tuída quimicamente por óxidos e silicatos de cálcio e de magnésio, óxidos de ferro e manganês, ferro metálico e outros elementos em menores proporções.

As pesquisas realizadas com escórias têm demonstrado, na sua grande maioria, o poder de aumentar os teores de cálcio e magnésio do solo assim como de neutralizar a acidez do solo (PRADO & FERNANDES, 2000; ASSIS et al., 2007; REZENDE et al., 2007). Esta neutralização ocorre porque os silicatos, presentes nas escórias, promovem a reação dos ânions  $\text{SiO}_3^{-2}$  com a água, liberando hidróxidos ( $\text{OH}^-$ ) para a solução do solo (KORNDÖRFER et al., 2009). Entretanto, alguns experimentos mostram que os efeitos deste resíduo na reação do solo, são diferentes daqueles correspondentes ao calcário, ou seja, apresentam reação mais lenta em doses equivalentes em carbonato de cálcio (FÁZIO & GUTIERREZ, 1989; FORTES, 1993).

Prado & Korndörfer (2003), observaram que a aplicação de escória de siderurgia (fonte de silício) na dose de até  $4000 \text{ kg ha}^{-1}$  em um Latossolo Vermelho Amarelo, tendeu a reduzir a acidez do solo.

Chaves & Farias (2008), comparando escória de siderurgia com calcário dolomítico no que diz respeito à correção de acidez do solo, observaram que ambos foram eficientes nesta correção tendo as reações de neutralização sido mais rápidas com o uso da escória de siderurgia.

### **3.1.2. Silício na planta**

O silício tem sido considerado elemento essencial para um número de espécies de *Poaceae* e *Cyperaceae*, mas sua importância para todas as plantas superiores ainda não foi confirmado. Segundo Epstein (1999) ainda faltam evidências da participação do elemento em moléculas de algum constituinte essencial para as plantas e/ou no metabolismo das mesmas. Entretanto, os efeitos benéficos do silício têm sido observados em diversas plantas incluindo-se desde as espécies consideradas acumuladoras até as não acumuladoras do elemento. Segundo Ma et al. (2003), o silício se acumula a níveis bastante elevados nos tecidos de quase todas as plantas. Embora o conteúdo deste elemento seja baixo em leguminosas (JONES &

HANDRECK, 1967), estudos recentes têm mostrado que o silício promove o crescimento de *Glycine max* (LI et al., 2004) e de *Vigna unguiculata* (L.) (MALI & AERY, 2009), quando aplicado nesta última cultura, em baixas concentrações. Segundo esses autores, elevadas concentrações de silício reduzem os teores de ferro nas folhas e raízes da *Vigna unguiculata* (L.) provocando clorose e redução na produção de matéria seca.

Gomes et al. (2009), avaliando diferentes doses de silício e formas de aplicação na cultura da batata inglesa, não constataram o efeito da adubação com silício no desenvolvimento e produtividade da cultura. Da mesma forma, Faria Junior et al. (2009), relatam que a aplicação de silício em arroz não afetou os componentes de crescimento e produção da referida cultura.

Os silicatos de cálcio e de magnésio podem ser utilizados como fonte de silício para as plantas, uma vez que cultivos consecutivos reduzem o nível do elemento no solo e sua reposição se faz conveniente (KORNDÖRFER et al., 2002).

O silício é absorvido pelas plantas na forma de ácido monossilícico  $H_4SiO_4$  (YOSHIDA, 1975; TAKAHASHI, 1995) e, uma vez absorvido, é facilmente translocado no xilema. Segundo Yoshida (1975), 99 % de silício acumulado no interior da planta se encontram na forma de ácido polimerizado; o restante, 1 %, se encontra na forma coloidal ou iônica. Já no interior da planta o elemento é depositado principalmente no retículo endoplasmático, paredes celulares e espaços intercelulares, como sílica amorfa hidratada ( $SiO_2.nH_2O$ ). Ele também forma complexos com polifenóis e, assim, serve como alternativa à lignina no reforço das paredes celulares (TAIZ & ZEIGER, 2004), atribuindo maior resistência mecânica à invasão de fungos e bactérias no interior da planta, dificultando também o ataque de insetos sugadores e herbívoros (Epstein, 1999).

Goussain et al. (2002) observaram, o efeito da aplicação de silício em plantas de milho no desenvolvimento da lagarta-do-cartucho, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith), que a aplicação de silício pode dificultar a alimentação das lagartas, causando aumento de mortalidade e canibalismo e, portanto, tornando as plantas de milho mais resistentes às mesmas, embora, Prado & Korndörfer (2003), tenham observado que o silício presente na escória de siderurgia aplicada na dose de até

4000 kg ha<sup>-1</sup> no plantio de milho, não diminuiu a incidência de *Phaeosphaeria maydis* e *Helminthosporium* SP na cultura.

Gomes et al. (2009), monitorando incidência de insetos-praga por meio da determinação do número pulgões, de lesões foliares provocadas por *Diabrotica speciosa* (Germar) e de folíolos minados por *Liriomyza* spp. na cultura da batata inglesa sob efeito da adubação com silício, verificaram que as plantas adubadas com silício, independentemente da forma de aplicação e da fonte utilizada, apresentaram menor número de injúrias foliares em relação àquelas da testemunha.

Em gramíneas, como milho, arroz e sorgo, a sílica é depositada na forma de corpos silicosos, principalmente nas células epidérmicas, silicosas e buliformes, e nos estômatos e tricomas foliares (CURRIE & PERRY, 2007).

A acumulação de sílica nos órgãos de transpiração provoca a formação de uma camada dupla de sílica cuticular, a qual reduz a perda de água por transpiração, aumentando a eficiência no uso da água pelo vegetal e fazendo com que as plantas sejam mais resistentes a estresse biótico, como insetos mastigadores (NWUGO & HUERTA, 2008). Segundo Faria (2000) e Ma et al. (2001), a eficiência no uso de água pode ser de grande importância para as gramíneas que crescem em regiões onde o período de estiagem é longo e severo mas, segundo Agarie et al. (1998) a contribuição na redução da transpiração, sobretudo nos estômatos e camada cuticular devido à presença de silício, é muito pequena, como um todo.

Segundo Silva & Casagrande (1983) e Savant et al. (1999) em folhas de cana-de-açúcar, ricas em silício, o elemento preencheria os espaços interfibrilares, reduzindo o movimento de água através da parede celular, causando aumento da economia de água na planta, pela diminuição da taxa de transpiração.

Takahashi (1995), observou que a transpiração do arroz nas fases de perfilhamento e alongamento foi 1,3 vez maior na ausência do silício quando comparada com o tratamento que recebeu esse elemento químico. Vander Vorn (1980), também observou que o coeficiente de transpiração do arroz diminuiu significativamente na presença de silício.

Diversos autores têm observado ganhos significativos na produtividade de algumas gramíneas, como o arroz, a cana-de-açúcar, o milho, o capim kikuiu, o capim Bermuda e outras não gramíneas, como a alfafa, feijão, tomate, alface e repolho, com aumento do nível de silício solúvel no solo (ELAWAD & GREEN, 1979; KORNDÖRFER & LEPSCH, 2001). Invariavelmente, esses efeitos ocorrem em plantas cuja acumulação de silício em suas estruturas seja grande. No entanto, o efeito da adubação com silício em cana-de-açúcar ainda precisa ser mais estudado, uma vez que são discordantes os resultados encontrados na literatura. Diferentes autores constataram o efeito favorável desta adubação; outros, não encontram efeito algum sobre o desenvolvimento da cultura (MADEIROS et al., 2009). Estudos feitos por Deren et al. (1994), demonstraram haver grandes variabilidades quanto à capacidade genética das cultivares em acumularem silício.

Para Nelson & Moser (1994) a síntese e o acúmulo de vários compostos naturais evoluíram conforme as plantas se foram adaptando à grande diversidade de ambientes. Em geral, os seres vivos estão sob influências dos meios bióticos e abióticos, de forma que a absorção de silício pelas plantas é estimulada pelas condições do meio em que este vegetal esteja inserido. Segundo Soest (1994) o investimento das plantas em um sistema de proteção secundária é energeticamente dispendioso e tais sistemas são ativados frequentemente apenas como resposta à predação ou a outros fatores causadores de estresse, como clima adverso, pragas e doenças.

### **3.2. Fósforo**

O fósforo (P) é um macronutriente essencial, requerido por todas as plantas para crescimento, desenvolvimento e reprodução. Há muitas substâncias bioquímicas importantes nas plantas que contêm P. Fosfolípidos são componentes estruturais primários das membranas que cercam células e organelas da planta. Dentro da célula a informação genética na forma de DNA e moléculas de RNA, contém P como um componente estrutural integrante. Essas importantes moléculas constituem a informação genética na planta e guiam a síntese de proteínas que se dá dentro das células (BLEVINS, 1999).



O fósforo se encontra na fase sólida do solo como ortofosfatos, combinado principalmente com metais como ferro, alumínio e cálcio, ocorrendo também na matéria orgânica. Porém existem mais de 170 formas minerais de fósforo no solo (HOLFORD, 1997), que constituem suas frações inorgânicas. Mesmo em combinações orgânicas, predomina o  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  como agrupamento central dos fosfatos (RAIJ, 1991).

Barber (1995) divide o fósforo total presente no solo nas seguintes categorias gerais:

- i) P como íons e compostos na solução do solo;
- ii) P adsorvido sobre a superfície de constituintes inorgânicos;
- iii) minerais de P no solo, sejam cristalinos ou amorfos; e
- iv) P como componente da matéria orgânica do solo. Segundo este autor, na média os solos agrícolas têm a quantidade total de  $1.000 \text{ kg ha}^{-1}$  de P e as plantas cultivadas podem retirar anualmente de  $10$  a  $40 \text{ kg ha}^{-1}$ . A reserva de P no solo é, portanto, muito pequena comparada com a retirada anual e pode esgotar-se muito rapidamente, em especial porque a maior parte do P presente no solo não se encontra na forma imediatamente disponível para a planta.

A concentração de fósforo na solução do solo é extremamente baixa, variando de  $0,1$  a  $10 \mu\text{mol}_c \text{ L}^{-1}$ , raramente excedendo esses valores, e seu movimento no solo se dá principalmente por difusão, em taxa extremamente lenta ( $10-12$  a  $10-15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) seguindo a direção do gradiente de concentração criado na zona de depleção ( $0,2$  a  $1,0 \text{ mm}$ ) ao redor das raízes da planta sempre que ocorre a absorção do nutriente pelas células radiculares (SCHACHTMAN et al., 1998; VANCE et al., 2003). Seu movimento ou fluxo difusivo no solo é fortemente influenciado pelas características químicas e físicas como umidade, teor de argila, mineralogia e densidade aparente do solo. A redução da umidade e os aumentos dos teores de argila, de óxidos de ferro e de densidade aparente, reduzem dramaticamente o fornecimento desse nutriente para as plantas (Barber, 1995; Novais & Smith, 1999). Devido a essa baixa movimentação do fósforo no solo sua aplicação deve ser feita toda em pré-plantio incorporado ou por ocasião do plantio,  $5 \text{ cm}$  abaixo e  $5 \text{ cm}$  ao lado da semente (MALAVOLTA, 1987; SILVA, 1999; ROSOLEM, 2001).

O fósforo do fertilizante remanescente no solo é lentamente transformado para formas menos disponíveis, por meio de reações de compostos insolúveis precipitados ou pela difusão para o interior dos óxidos (ENGELSTED & TERMAN, 1980; BARROW, 1985; RAIJ, 1991). Na ausência de adições anuais de fertilizantes fosfatados a produtividade dependerá da quantidade e da disponibilidade desse fósforo residual acumulado no solo (BARROW, 1980).

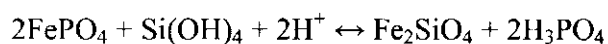
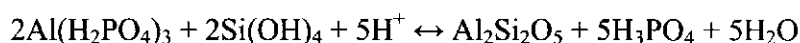
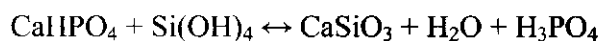
O principal fator que reduz a disponibilidade do fósforo aplicado no solo para as plantas é a sua fixação no solo pelo fenômeno da adsorção. Segundo Lopes & Cox (1979), o processo de adsorção do fósforo pelos óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio é o principal fator envolvido na fixação do fósforo. O fenômeno de retenção de fósforo no solo é conhecido há mais de um século, pelo que descreve o trabalho de Thomas (1980). Embora a adsorção inicial de fósforo ao solo traga aspecto altamente positivo, o “envelhecimento” dessa adsorção com a formação de fósforo não-lábil, torna-se problema. Querer manter a alta concentração de fósforo na solução do solo, necessária para uma alta e rápida absorção pela planta, é incompatível com o que se observa na prática: imobilidade desse elemento pela sua intensa e rápida adsorção no solo.

### **3.3. Interação do silício com o fósforo**

Importantes efeitos dos silicatos sobre as propriedades dos solos, como a interação com o fósforo, por exemplo, são considerados por Matychenkov & Calvert (2002). Os autores comentam que os fertilizantes silicatados adsorvem fósforo, podendo diminuindo sua lixiviação em cerca de 30 a 90 %, sem diminuir sua disponibilidade às plantas, pelo fato de que o fósforo é mantido em formas trocáveis na superfície dos silicatos.

Lima Filho et al. (1999), comentam que o uso de fertilizantes silicatados aumenta a eficiência da adubação de NPK. Segundo Nascimento et al. (2009) os silicatos interferem propriedades de adsorção e promovem menor lixiviação de potássio e outros nutrientes móveis no solo.

Lima Filho et al. (1999) discorrem com o fato de que, com a adição de silicatos ao solo, ocorrem reações químicas de troca entre silicatos e fosfato de cálcio, magnésio, alumínio e ferro, com conseqüente formação de seus respectivos silicatos e, concomitante, a liberação do íon fosfato para a solução do solo (MATYCHENKOV & CALVERT, 2002). São apresentadas, a seguir, as reações químicas de troca entre silicato e fosfato de Ca, Al e Fe:



Além das reações de troca com fosfatos, anteriormente apresentadas, o ânion silicato pode deslocar o ânion fosfato dos sítios de adsorção nos óxidos ou ocupá-los preferencialmente ficando, portanto, os fosfatos livres e absorvíveis para as plantas (NASCIMENTO et al, 2009).

#### **3.4. Efeito da escória de siderurgia na disponibilidade de fósforo**

Prado & Fernandes (1999), utilizando escoria de siderurgia rica em silício e calcário em uma Areia Quartzosa, verificaram que nos tratamentos em que se adicionou a escória, o fósforo disponível se manteve em níveis maiores quando comparados com os tratamentos em que se utilizou calcário. Entretanto, em Latossolo Vermelho-Escuro os autores observaram que o nível de fósforo disponível aumentou para os dois tratamentos porém foi necessário o dobro de calcário (em equivalente de  $\text{CaCO}_3$ ) em relação à escória de siderurgia, para se obter o mesmo efeito, isto é, para atingir o mesmo nível de fósforo disponível no solo.

Segundo Smyth & Sanchez (1980), a maior eficiência da escória sobre o calcário no aumento de fósforo disponível do solo, se deve mais ao efeito do silicato contido na escória, exercendo uma competição dos ânions de silicato com o fósforo pelos mesmos sítios de adsorção, que ao efeito do pH propriamente dito.

A utilização do ânion silicato proveniente, por exemplo, das escórias por competir com o ânion fosfato pelos mesmos sítios de adsorção do solo (Fassbender, 1987), poderia ser uma das formas para aumentar a eficiência da fertilização fosfatada (PRADO & FERNANDES, 2001). Por outro lado, Lopes (1977), ressalta que a eficiência do silicato em aumentar o P disponível do solo não está na capacidade de troca dos ânions silicato pelo fosfato e, sim, na saturação ou bloqueio desses sítios de adsorção de P pelo ânion silicato.

Estudos sobre o efeito da escória de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar, realizados por Prado & Fernandes (2001), indicam que a aplicação de escória de siderurgia incrementou os níveis de fósforo disponível do solo, de maneira linear, ao passo que a aplicação de calcário não apresentou relação significativa. Ao se correlacionar o fósforo disponível do solo com a produção de colmos da cana-de-açúcar planta, encontrou-se relação direta linear entre os mesmos apenas com a aplicação da escória.

Prado & Korndörfer (2003), observaram que a aplicação de escória de siderurgia na dose de até 4000 kg ha<sup>-1</sup> em um Latossolo Vermelho Amarelo não aumentou a disponibilidade de fósforo, potássio, cálcio e magnésio no solo, da mesma forma que não aumentou a produtividade do milho cultivado nessas condições.

Com a aplicação de doses crescentes de escória de siderurgia em um Argissolo Acinzentado Distrófico, também não foi observado aumento do fósforo disponível no solo (CHAVES & FARIAS, 2008).

### 3.5. Cultura do milho

O milho (*Zea mays L.*), planta da família das Gramíneas (*Poacea*) e do gênero *Zea*, tem origem nas Américas, provavelmente na faixa tropical do norte da Argentina até o Canadá. É uma das culturas mais antigas do mundo, havendo provas de que é cultivado há pelo menos 4.000 anos.

Logo depois da chegada dos europeus nas Américas, o milho foi levado para a Europa, onde era plantado em jardins, até que seu valor alimentício se tornou

conhecido; em virtude de se tratar de planta tropical, para se desenvolver e produzir satisfatoriamente, o milho exige clima quente e úmido. Os processos da fotossíntese, respiração, transpiração e evaporação (evapotranspiração) são funções diretas da energia disponível no ambiente, comumente designada por calor, tal como o crescimento, o desenvolvimento e a translocação de fotoassimilados se encontram ligados também à disponibilidade hídrica do solo (TEODORO, 2003).

O milho pertence ao grupo de plantas com metabolismo fotossintético do tipo  $C_4$ , que se caracteriza pelo elevado potencial produtivo. Entre as plantas  $C_4$ , o milho está no grupo de espécies com maior eficiência de uso da radiação solar, ou eficiência quântica, com valor médio entre 64,5 a 69  $\text{mmol mol}^{-1}$ , enquanto outras espécies  $C_4$  apresentam valores em torno de 52,6 a 60,4  $\text{mmol mol}^{-1}$ . Esta maior eficiência é atribuída à anatomia foliar, por apresentar menor área entre as nervuras (HATTERSLEY, 1984).

Segundo Teodoro (2003) a referida espécie, devido ao alto grau de seleção e ao aprimoramento do manejo agrônômico, é cultivada atualmente em escala comercial, numa área que vai da latitude 58 ° N (norte da Rússia) até 40 ° S (Argentina), distribuída nas mais diversas altitudes, desde localidades abaixo do nível do mar (região do Mar Cáspio) até regiões apresentando mais de 2.500 m de altitude, nos Andes Peruanos.

Em território brasileiro o cultivo do milho é muito expressivo, sendo produzido em praticamente todo o território. Segundo dados do IBGE (2009), 5.319 municípios da Federação cultivam o milho em suas terras agricultáveis, o que representa 95,6 % dos municípios brasileiros. Conforme o IBGE (2009), em 2009 a produção nacional de milho em grão totalizou 51.126.952 toneladas, plantadas em uma área de 13.789.854 hectares, obtendo-se o rendimento médio de 3.708  $\text{kg ha}^{-1}$ .

O Brasil tem extensão territorial de 8.514.876,599  $\text{km}^2$ ; deste montante, 1,62 % das terras estão sendo cultivadas com milho. O Nordeste ocupa uma área de 1.662.947  $\text{km}^2$ , o que representa 19,53 % da área total da Nação. O plantio de milho nas terras nordestinas está em torno de três milhões de hectares ou 30 mil quilômetros quadrados, responsável, portanto, por 21,76 % da área nacional cultivada com milho (IBGE, 2009).

Costa et al. (2008) enfatizam que a produtividade do milho na região nordestina é baixa em decorrência da predominância de sistemas de produção que utilizam pouca ou nenhuma tecnologia e apresentam insuficiência e irregularidade pluviométrica. Os autores sugerem o uso de sementes de variedades adaptadas à região, para o melhoramento do rendimento da cultura do milho.

Os principais parâmetros climáticos que norteiam a escolha de uma cultivar e da época de plantio, são as disponibilidades térmica e hídrica da região. O Nordeste brasileiro, por estar situado na faixa tropical de baixas latitudes, não apresenta problemas de deficiências térmicas para a produção de milho, em nenhuma época do ano, sendo a precipitação pluviométrica, devido às suas irregularidades, o fator limitante dos cultivos agrícolas em sistemas de sequeiro. Portanto o, cultivar escolhido, deve ter características agronômicas e um ciclo de produção compatível com os índices pluviométricos da localidade que se deseja trabalhar.

A disponibilidade de genótipos de ciclo precoce e superprecoce mais adaptados às condições de semiaridez, por completarem o ciclo de produção dentro de um espaço mais curto, podendo coincidir com a fase de índices pluviométricos mais altos da região, é uma realidade, apesar de ainda pouco difundida na região (COSTA et al., 2008).

Carvalho et al. (1996) avaliando o desempenho de 25 cultivares de milho nos Estados de Alagoas, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Sergipe e Bahia, observaram que, na média geral, a BR 106, foi a que apresentou maior produtividade, 4.167 kg ha<sup>-1</sup>.

Dentre os variados genótipos de milho desenvolvidos para diversas regiões com características climáticas distintas, a EMBRAPA desenvolveu o milho 'BRS Caatingeiro', que é uma variedade de milho com grãos semiduros amarelos, adaptada especialmente para a região semiárida do Nordeste do Brasil. Tem ciclo superprecoce, florescendo entre 41 e 50 dias, o que diminui o risco de sofrer com estresse de umidade no período em que o milho é mais sensível à falta de água. Na região mais seca do semiárido, os tetos de produtividade variam em torno de 2 a 3 toneladas de grãos por hectare. Em condições mais regulares de precipitação, podem

ser obtidas produções que variam de 4 a 6 toneladas de grãos por hectare, aproximadamente (EMBRAPA, 2009).

### **3.5.1. Exigências hídricas do milho**

A umidade do solo constitui-se em um dos mais importantes fatores da produção agrícola, a exemplo da produção de milho, que é extremamente afetada por deficiências hídricas durante o estabelecimento da cultura.

O milho é uma cultura muito resistente a incidência de sol em todo o ciclo vegetativo; contudo, esta cultura apresenta um período crítico, que vai da prefloração ao início do enchimento de grãos (MORIZET & TOGOLA, 1984). Nessa etapa fenológica o milho é sensível ao déficit hídrico, podendo-se observar esta sensibilidade nos processos fisiológicos ligados à formação do zigoto e início do enchimento de grãos e na elevada transpiração que ocorre nesse período, em razão do maior índice de área foliar. Os eventos de formação do zigoto e início do crescimento dos grãos, são muito suscetíveis a estresses, sobretudo ao déficit hídrico (SCHUSSLER & WESTGATE, 1991a; ZINSELMEIER et al., 1995).

Cruz et al. (1997) enfatizam que o milho é cultivado em regiões cuja precipitação varia de 250 a 5.000 mm por ano, sendo que a quantidade de água consumida pelas plantas dessa cultura durante o seu ciclo total, é em torno de 600 mm. Os referidos autores relatam que dois dias de estresse hídrico no florescimento diminuem o rendimento em mais de 20 % e de quatro a oito dias, o diminuem em mais de 50%. Jara et al. (1998) em estudos realizados em Prosser, Washington - USA avaliaram que a evapotranspiração do milho estimada para o período de 40 dias após o plantio é de 172 mm com média de 4,3 mm d<sup>-1</sup>.

Por se tratar de uma espécie de metabolismo C<sub>4</sub>, o milho tende a expressar sua elevada produtividade quando a máxima área foliar coincide com a maior disponibilidade de radiação solar, desde que não haja déficit hídrico. Esta condição permite a máxima fotossíntese possível, porém aumenta a necessidade hídrica da cultura, já que o elevado fluxo energético incidente também eleva a evapotranspiração (BERGAMASCHI et al., 2004).



Matzenauer et al. (1995) explicitam que muitos trabalhos têm sido realizados com o objetivo de verificar os efeitos do déficit hídrico sobre o rendimento de grãos e identificar os períodos mais sensíveis ao déficit para a cultura do milho. Entretanto, os resultados experimentais variam dependendo da duração e da intensidade do déficit, bem como do local, tipo de solo e cultivares. De acordo com as pesquisas realizadas pelos referidos autores, o período em que foram observadas as mais altas associações entre o rendimento do milho e as variáveis hídricas, foi o que engloba a floração e o início de enchimento de grãos, caracterizando-se como o período de maior sensibilidade ao déficit hídrico.

Robins & Domingo (1953) e Denmead & Shaw (1960) relatam que as maiores reduções no rendimento de grãos de milho causadas pelo estresse hídrico, ocorrem a partir da emergência do pendão até cerca de uma semana após o espigamento. Os dados de Claassen & Shaw (1970) indicam que o período de maior sensibilidade da cultura do milho, em relação ao estresse, é a partir de aproximadamente uma semana antes a duas semanas após o espigamento. Moss & Downey (1971) concluíram que o estresse antes do espigamento pode resultar na redução do número de grãos devido ao efeito da diminuição de carboidratos sobre a esterilidade dos gametas femininos. Kiniry & Ritchie (1985) mostraram que a redução no número de grãos se inicia seis dias após o espigamento, em condições de estresse. Grant et al. (1989) verificaram que o intervalo em que o número de grãos foi mais sensível ao estresse hídrico se iniciou de dois a sete dias após o espigamento e terminou 16 a 22 dias após o espigamento. O peso de grãos foi reduzido pelo estresse durante o período de enchimento de grãos e o menor peso (51% da testemunha) ocorreu com estresse no período de 12 a 16 dias após o espigamento.

Segundo Bergamaschi (1992) o déficit hídrico afeta praticamente todos os aspectos relacionados ao desenvolvimento das plantas, reduzindo a área foliar, diminuindo a fotossíntese e afetando vários outros processos, além de alterar o ambiente físico das culturas por modificar o balanço de energia do sistema. Para Kramer (1969), os efeitos causados pelo déficit hídrico são devidos às modificações na anatomia, morfologia, fisiologia e bioquímica das plantas. Uma das consequências mais importantes da sensibilidade do alongamento celular ao déficit hídrico é a redução da área foliar. A redução na área foliar causa decréscimo da taxa de crescimento da

planta especialmente durante os estádios iniciais de crescimento e, como resultado, menor interceptação da radiação solar. Este efeito do déficit hídrico sobre a área foliar é de caráter permanente e, no caso das culturas de hábito de crescimento determinado, não há possibilidade de compensação via aumento do número de folhas (BEGG & TURNER, 1976).

### **3.5.2. Necessidades nutricionais do milho**

As necessidades nutricionais de qualquer planta são determinadas pela quantidade de nutrientes extraída durante o ciclo. Esta extração total dependerá, portanto, do rendimento obtido e da concentração de nutrientes nos grãos e na palhada. Assim, tanto na produção de grãos como na de silagem se faz necessário colocar, à disposição da planta, a quantidade total de nutrientes que ela extrai, e que devem ser fornecidos pelo solo, através de adubações. Com relação aos micronutrientes, as quantidades requeridas pelas plantas de milho são muito pequenas. Por exemplo, para uma produção de 9 t ha<sup>-1</sup> de grãos, são extraídos: 2.100 g de ferro, 340 g de manganês, 110 g de cobre, 400 g de zinco, 170 g de boro e 9 g de molibdênio. Entretanto, a deficiência de um deles pode ter efeito tanto na desorganização de processos metabólicos quanto em relação à deficiência de um macronutriente como, por exemplo, o nitrogênio (COELHO et al. 2009).

O fósforo é um elemento de fundamental importância para as culturas, atuando no armazenamento de energia e na integridade estrutural da planta, e atua principalmente como componente de nucleotídeos utilizados nas reações que envolvem ATP (Adenosina tri-fosfato) (TAIZ & ZEIGER, 2004).

Korndörfer et al. (1999) mostram haver correlação positiva entre a produtividade do milho e os teores de P nas folhas. Isto é, quanto maior o teor de P maior a produtividade, indicando que, neste caso, a análise foliar, pode ser um bom indicativo da necessidade de P para o milho. Segundo Trani et al (1983), a cultura do milho deve ter, no mínimo, uma concentração de fósforo de 2,2 g kg<sup>-1</sup> de matéria seca.

Para Novais et al. (1999), o montante de 100 mg de N, 150 mg de K e 300 mg de  $P_2O_5$  para cada quilograma de solo é o suficiente para atender às necessidades nutricionais de plantas cultivadas em vaso.

### 3.6. Irrigação do milho

#### 3.6.1. Evapotranspiração

A perda combinada de água para a atmosfera em forma de vapor através dos processos de evaporação da superfície do solo somada à transpiração estomática e cuticular das plantas, define o termo evapotranspiração (ET) (TEODORO, 2003).

Durante o processo de ET a evaporação da água do solo ocorre concomitantemente com a transpiração vegetal e, por não ser fácil de separar os dois processos, considera-se a ET perda única. Desta forma, os fatores que afetam a ET são os mesmos que influenciam a evaporação da superfície líquida e da água do solo descoberto, acrescidos das características das plantas que cobrem a área em estudo (HARBECK JR. et al., 1971). Do ponto de vista, os fatores que influenciam a ET podem ser divididos em fatores físicos atmosféricos e parâmetros dos vegetais, sendo a radiação, temperatura do ar, velocidade do vento e umidade relativa do ar, os principais fatores físicos atmosféricos, e o albedo da cultura índice de área foliar e, resistência estomática, os principais parâmetros vegetais (TEODORO, 2003).

Dependendo das características físicas e ambientais da área onde os elementos e parâmetros meteorológicos foram medidos e estimados, a evapotranspiração pode ser definida como: evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), evapotranspiração de cultura ( $ET_c$ ), evapotranspiração real ( $ET_r$ ) e evapotranspiração de oásis ( $ET_{oa}$ ) (PEREIRA et al., 1997).

O conhecimento da evapotranspiração da cultura é de fundamental importância para os projetos de irrigações, porém sua determinação é difícil e sujeita a muitos erros, visto que a estimativa e/ou a medida da  $ET_c$ , exige equipamentos e conhecimentos técnicos que nem sempre estão ao alcance de pequenos e médios produtores. Para contornar essas dificuldades as características que diferenciam a

gama de referência das culturas agrícolas podem ser integradas num coeficiente de cultura ( $K_c$ ). Desta forma, pode-se estimar a  $ET_c$  multiplicando-se a  $ET_0$  pelo  $K_c$  ( $ET_c = ET_0 \cdot K_c$ ) (TEODORO, 2003).

Vários são os métodos para determinação da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), dentre os quais estão os evaporímetros que são equipamentos utilizados na medição da evaporação da água como, por exemplo, o *Tanque Classe A*. Em virtude do processo de evaporação da água livre no tanque (EV) e a  $ET_0$  serem semelhantes para converter EV em  $ET_0$ , deve-se multiplicar a EV por um coeficiente de ajuste ou coeficiente do tanque  $K_p$  ( $ET_0 = K_p \cdot EV$ ) (BERNARDO et al., 2006).

Fernandes et al. (2004), após terem correlacionado os valores de evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), pelo método do tanque “Classe A” utilizando-se de dois valores de  $K_p$ , obtidos dentro e fora de casa de vegetação, recomendam que para a estimativa da  $ET_0$ , se deve adotar  $K_p$  igual a 1,0, quando o referido tanque é instalado no interior da casa de vegetação.

Dentre os métodos utilizados para estimar ou medir a evapotranspiração de uma cultura ( $ET_c$ ) e seus componentes, se destacam o balanço de energia pela razão de Bowen (**BERB**), balanço de energia (**BE**), balanço hídrico através de medidas gravimétricas ou de sondas de nêutron da umidade do solo, medidas de lisímetros e microlisímetros, entre outros (TEODORO, 2003).

Comumente, o  $K_c$  utilizado na determinação da  $ET_0$  é obtido dividindo-se a evapotranspiração da cultura pela evapotranspiração de referência ( $K_c = ET_c / ET_0$ ), mas também pode ser determinado através do quociente do balanço de energia sobre uma cultura específica pelo balanço de energia numa superfície de referência, conforme Jensen (1968):

$$K_c \approx \frac{\lambda E}{\lambda E_0} = \frac{(Rn + H + G)}{(Rn_0 + H_0 + G_0)}$$

Em que:

$K_c$  = Coeficiente de cultura

$R_n$  = Saldo de radiação

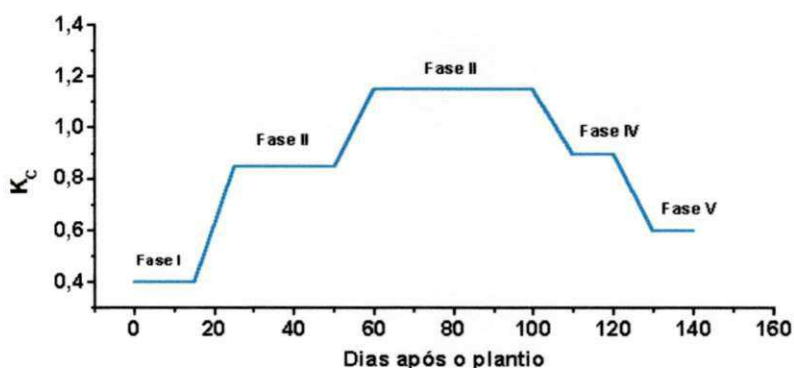
$H$  = Fluxo de calor sensível

$\lambda E$  = Fluxo de calor latente

$G$  = Fluxo de calor no solo.

O índice “o” designa os valores medidos na superfície de referência e, no caso de Jensen (1968), uma cultura de alfafa.

O  $K_c$  varia em função do estágio de desenvolvimento da cultura, apresentando altas correlações com o índice de área foliar. Os valores do  $K_c$  (Figura 3.1) na cultura do milho são de 0,3 – 0,7 na fase I (da emergência até 10 % de cobertura da superfície do solo – CSS), 0,8 – 0,87 na fase II (10 a 80% da CSS), 1,04 – 1,20 na fase III (80 a 100% da CSS), 0,8 – 0,95 na fase IV (100% da CSS) e 0,35 – 0,6 na fase V (da maturação fisiológica a colheita) ( DOORENBOS & PRUITT, 1977 ).



**Figura 1:** Curva do coeficiente de cultura ( $K_c$ ) do milho, conforme Doorenbos e Pruitt (1977)

## 4 » MATERIAL E METODOS

### 4.1. Localização do experimento e clima

O experimento foi conduzido em condições de casa de vegetação pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, localizada pelas coordenadas geográficas: 7°15'18" de latitude Sul, 35°55'28" de longitude Oeste, altitude média de 550 m, com precipitação média anual de 802,7 mm, temperatura máxima de 27,5°C, mínima de 19,2°C e umidade média relativa do ar de 83%.

### 4.2. Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos resultaram da combinação de quatro lâminas de irrigação referentes à reposição de água de 50, 75, 100 e 125 % da evapotranspiração da cultura, com quatro doses de silicato de cálcio e magnésio correspondentes a 0, 300, 600 e 900 kg ha<sup>-1</sup> de silício, o que refletia em 0, 82, 164 e 246 g de silicato de cálcio e magnésio em cada vaso.

O produto utilizado como fonte de silício foi o AGROSSILICIO PLUS, que é um Fertilizante Mineral Simples, proveniente de escória de siderurgia silicatada contendo: 25,0 % de Cálcio; 6,0 % de Magnésio e 10,5 % de Silício.

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, sendo as lâminas de água distribuídas em faixas e as doses de silício compondo as subparcelas (Figura 2).

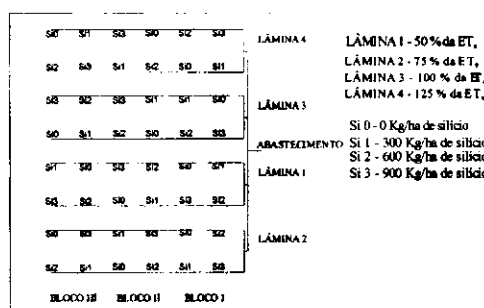


Figura 2: Esquema de distribuição dos tratamentos com irrigação em faixa

### 4.3. Irrigação

Para o suprimento hídrico das plantas utilizou-se o método de irrigação pressurizado, adotando-se o sistema de irrigação localizada por gotejamento.

#### 4.3.1. Equipamentos de irrigação

A água utilizada na irrigação foi procedente do sistema de abastecimento do campus universitário. A pressão no ponto de conexão entre a rede de abastecimento e o sistema de irrigação foi mantida a  $25 \text{ kgf cm}^{-2}$ , estando este ponto localizado a uma distância de 1,0 m do tubo principal de adução de água para o sistema de irrigação.

Entre o tubo principal de diâmetro nominal de 25 mm e 8,5 m de comprimento que alimentava o sistema de irrigação e a rede de abastecimento do campus universitário, foram colocados, em sequência: um registro de gaveta, a fim de calibrar a pressão da água para o sistema, e um manômetro, para aferição da pressão de serviço no início do sistema, conforme detalhamento na Figura 3.

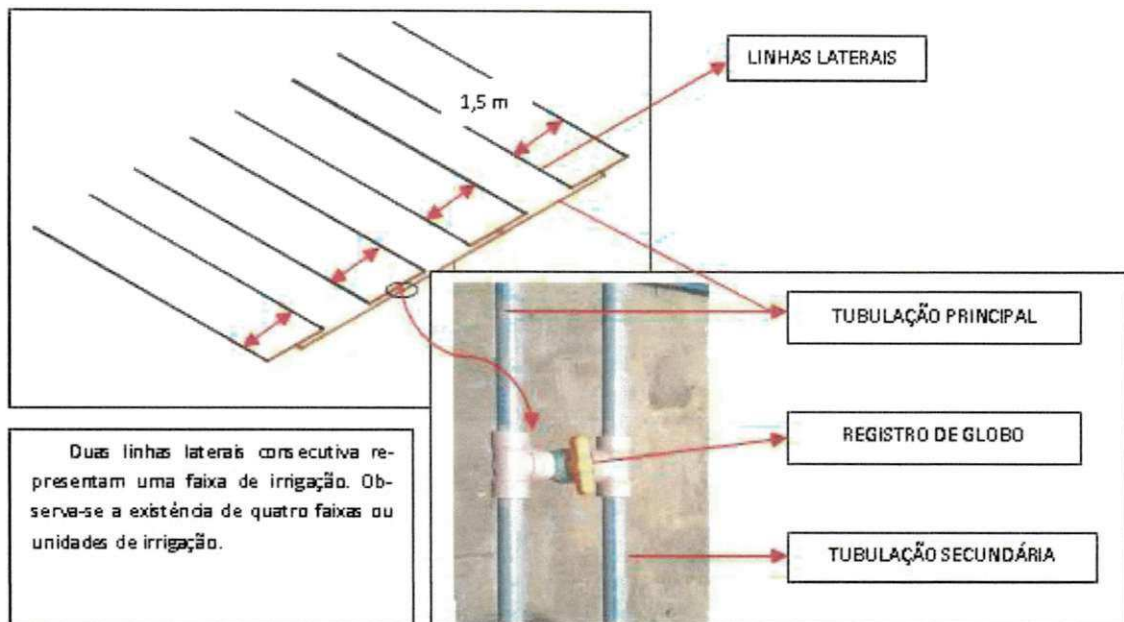


**Figura 3:** Equipamentos de regularização do sistema de irrigação e tubulação principal

A tubulação secundária, com diâmetro nominal de 25 mm e 1,50 m de comprimento com duas saídas, totalizava quatro unidades conectadas à tubulação principal de adução de água por registros de globo de acionamento rápido, o qual

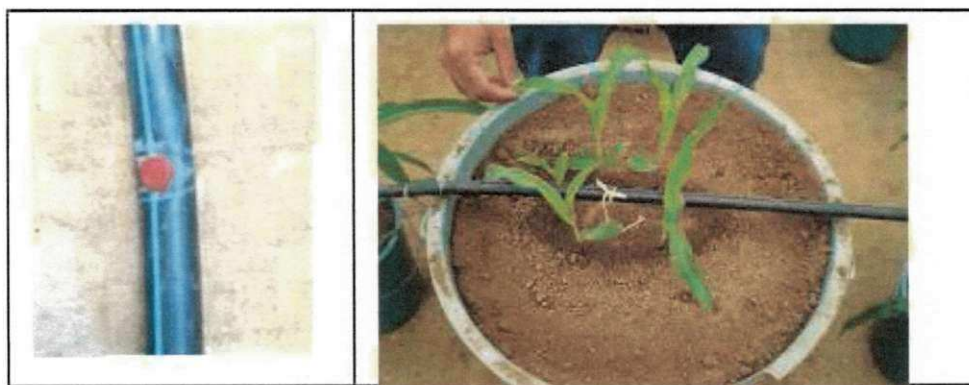


regulava a entrada de água para o abastecimento das linhas laterais de irrigação, em cada faixa de irrigação (Figura 4).



**Figura 4:** Esquema de acionamento das unidades de irrigação

Nas linhas laterais de polietileno com diâmetro nominal de 16 mm e 6,5 m de comprimento, foram colocados 6 gotejadores distanciados a cada 1,25 m, da marca “Katif” autocompensantes, com faixa de pressão de serviço entre 0,6 e 4,0 kgf cm<sup>-2</sup> e vazão de 4,8 L h<sup>-1</sup>. Cada vaso contava com um gotejador, que permitia a aplicação de água para a planta (Figura 5).



**Figura 5:** Gotejador Katif inserido na linha de polietileno irrigando o vaso com o milho

#### 4.3.2. Estimativa da evapotranspiração de referência

Para quantificar o volume de água a ser aplicado na irrigação adotou-se, como base, a evaporação do tanque “Classe A” instalado dentro da casa de vegetação.

Fernandes et al. (2004) ao estudar em a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) dentro e fora de casa de vegetação pelo método do tanque “Classe A” utilizando-se de dois valores de  $K_p$  (coeficiente do tanque), 0,7 e 1,0, recomendaram a instalação de tanques dentro de casas de vegetação com utilização de  $K_p$  igual a 1,0.

Diante da indicação proposta por Fernandes et al. (2004) o cálculo da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), dentro da casa de vegetação foi feito pela multiplicação de  $K_p$  (igual a 1,0) pela evaporação (EV), medida no taque “Classe A” diariamente, conforme equação 4.1.

$$ET_0 = K_p \cdot EV \quad \text{Eq. 4.1}$$

donde:

$ET_0$  – Evapotranspiração de referência da casa de vegetação, em  $\text{mm dia}^{-1}$ ;

$K_p$  – Coeficiente do tanque (Pan Coefficient);

EV – Evaporação do tanque, em  $\text{mm dia}^{-1}$ .

#### 4.3.3. Evapotranspiração da Cultura ( $ET_c$ )

Para o cálculo da evapotranspiração da cultura utilizou-se a Equação 4.2, ressaltando que o ciclo da cultura foi dividido em quatro fases fenológicas distintas, conforme indicação de Allen et al. (1998). A adoção do  $K_c$  (coeficiente de cultura) baseou-se nas indicações do referido boletim com modificações referentes às caracterizações para distinção entre as mudanças das fases fenológicas da cultura.

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad \text{Eq. 4.2}$$

donde:

$ET_c$  – Evapotranspiração da cultura;

$K_c$  – Coeficiente de cultivo;

$ET_0$  – Evapotranspiração de referência da casa de vegetação, em  $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ .

Adotou-se, inicialmente, um  $K_c$  igual a 0,7 na fase fenológica correspondente à emissão das segunda à quarta folhas totalmente expandidas. A folha do milho foi considerada expandida quando a linha de união lâmina-bainha (“colar”) se apresentava facilmente visível.

O desenvolvimento vegetativo da cultura correspondente à emissão da quinta à décima segunda folhas completamente expandidas, foi considerado a segunda fase fenológica da cultura. Nesse estágio de desenvolvimento do milho adotou-se  $K_c$  igual a 0,87 até a emissão da oitava folha; 1,04 da oitava à décima folha e 1,20 da décima à décima segunda folha, totalmente expandidas.

Considerou-se terceira fase fenológica o período compreendido desde a expansão completa da décima segunda folha até o aparecimento de grãos pastosos, estando inseridos nesse intervalo de tempo os estágios de emissão do pendão, florescimento e polinização, e aparecimento de grãos leitosos, mantendo-se o  $K_c$  igual a 1,20.

A quarta fase fisiológica do milho foi considerada no momento em que começou a formação de “dentes”, prolongando-se até a maturação fisiológica, ou seja, no momento em que os grãos se encontravam com a camada preta, na inserção com a espiga. Nesse estágio se adotou um  $K_c$  igual 0,35.

#### **4.3.4. Cálculo das lâminas de irrigação e tempo de irrigação**

Foram adotadas quatro lâminas de irrigação que correspondiam à reposição de 50, 75, 100 e 125 %, da evapotranspiração da cultura.

Os níveis de água em forma de volume (mensurada em litros), foram calculados multiplicando-se a  $ET_c$  referente a cada estágio de desenvolvimento do milho, por 0,5; 0,75; 1,0 e 1,25, obtendo-se as lâminas  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  e  $L_4$  ( $\text{mm dia}^{-1}$  ou  $1,0 \text{ L m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) referentes à reposição de 50, 75, 100 e 125 %, da evapotranspiração da cultura; em seguida, os valores das lâminas  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  e  $L_4$  foram multiplicados pela área da abertura do vaso ( $S_{\text{vaso}} = 0,13 \text{ m}^2$ ), obtendo-se o volume requerido para suprimento dos níveis de reposição diária de água, anteriormente apresentados.

Sabendo que a vazão dos gotejadores utilizados era de  $4,8 \text{ L h}^{-1}$  e tendo o volume, em litros necessário para o suprimento das lâminas de irrigação em estudo,

dividiu-se o volume requerido pela vazão do gotejador obtendo-se, então, o tempo de funcionamento do sistema.

#### 4.4. Caracterização do solo utilizado

O solo utilizado no experimento foi coletado da camada superficial (0 -20 cm) de um Neossolo Regolítico eutrófico (EMBRAPA, 1999), proveniente de uma área próxima ao Campus I da Universidade Federal de Campina Grande. Antes do preenchimento dos vasos o solo foi peneirado e tratado com brometo de metila, para esterilização de possíveis patógenos presentes no mesmo.

A caracterização do solo foi feita no Laboratório de Irrigação e Salinidade (LIS) do Departamento de Engenharia Agrícola / UFCG, tendo-se realizado análises físico-hídricas e químicas do solo, seguindo-se as metodologias propostas pela Embrapa (1997). Pela determinação da retenção de umidade no solo (Richards, 1947), o ponto de murcha permanente (Pmp), água retida no solo a um potencial matricial de -1,5 MPa, foi de 2,8 % e a capacidade de campo (Cc), correspondentes ao percentual de água retida a um potencial de -0,033 MPa foi de 7,4 %, conforme Tabela 1.

O pH do solo foi determinado em água, na proporção 1: 2,5 (solo: água); o cálcio, magnésio e o alumínio, foram extraídos do solo utilizando-se KCl 1N, sendo o cálcio e o magnésio determinados por titulação com EDTA 0,025 N e o alumínio por titulação com NaOH 0,05 N; o hidrogênio foi extraído com acetato de cálcio a pH 7,0 e titulado com NaOH 0,1 N; o sódio e o potássio foram extraídos do solo utilizando-se acetato de amônio a pH 7,0 e determinados por fotometria de chama; para o fósforo utilizou-se o extrator Mehlich ( $H_2SO_4$  0,025N + HCl 0,05N), determinado por fotolorimetria; o carbono orgânico foi determinado pelo método de Walkley - Black com a utilização da solução de dicromato de potássio 0,4 N para oxidação da matéria orgânica e titulado com sulfato ferroso amoniacal 0,1 N. A Tabela 1 contém os dados referentes às análises físico-hídrica e química do solo utilizado na pesquisa.

**Tabela 1:** Atributos físico-hídrico e químico do solo utilizado no experimento

<b>Características Físico-hídricas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
<b>→ Granulometria</b>		
Areia	g kg <sup>-1</sup>	841,5
Silte	"	87,5
Argila	"	71,0
Textura	-	Areia Franca
<b>→ Densidade</b>		
Aparente	-	1,40
Real	-	2,76
Porosidade	%	49,27
<b>→ Umidade Natural</b>		
0,033 (MPa)	%	7,40
1,5 (MPa)	%	2,80
Água disponível	%	4,60
<b>Características Químicas</b>		
pH em água (1:2,5)	-	6,60
CE (suspensão solo-água)	dS m <sup>-1</sup>	0,20
Carbono Orgânico	g kg <sup>-1</sup>	5,20
Matéria Orgânica	"	8,40
Nitrogênio	"	0,50
Fósforo Assimilável	mg kg <sup>-1</sup>	28,50
<b>→ Complexo Sortivo</b>		
Cálcio	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	2,55
Magnésio	"	2,23
Sódio	"	0,06
Potássio	"	0,28
Hidrogênio	"	0,79
Alumínio	"	0
CTC	"	5,91
Carbonato de Cálcio Qualitativo	-	Ausente
<b>→ Extrato de saturação</b>		
pH (extrato de saturação)	-	6,37
CE (extrato de saturação)	dS m <sup>-1</sup>	0,57
Cloreto	meq/l	2,50
Carbonato	"	0,00
Bicarbonato	"	2,70
Sulfato	"	Ausente
Cálcio	"	0,87
Magnésio	"	1,63
Potássio	"	0,88
Sódio	"	1,73
Porcentagem de Saturação	%	19,66
RAS	(mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>0,5</sup>	1,54
Classe do solo	Não Salino, não sódico	

#### 4.5. Instalação e condução do experimento

Os vasos utilizados no experimento, com 70 cm de altura, 40 e 30 cm de diâmetro na parte superior e na base, respectivamente, foram preenchidos com 80 kg de

solo previamente peneirado e tratado com brometo de metila. Este preenchimento foi realizado em duas etapas: inicialmente, foram colocados em cada vaso 40 kg de solo e, em seguida, os outros 40 kg de solo, previamente misturados com 82, 164 e 246 g de silicato de cálcio e magnésio, conforme os tratamentos.

Após o preenchimento dos vasos, o solo neles contido, foi incubado e mantido em capacidade de campo pelo tempo de trinta dias, para que o silicato pudesse reagir com o solo, a fim de saturar os prováveis sítios de adsorção dos colóides do solo.

Transcorrido o período de incubação o solo foi adubado com nitrogênio, fósforo e potássio, segundo recomendação de Novais et al. (1991) para ambiente protegido, nas dosagens 100 mg de N; 300 mg de  $P_2O_5$  e 150 mg de  $K_2O$  por quilo de solo, tendo como fontes dos elementos a uréia (46 % de N), o superfosfato triplo (46 % de  $P_2O_5$ ) e o cloreto de potássio (60 % de  $K_2O$ ), respectivamente. Todo o fósforo foi colocado em fundação e as doses de nitrogênio e potássio divididas em duas partes, uma aplicada em fundação e a outra aplicada 15 dias após a germinação do milho.

Após as adubações realizou-se o semeio do milho colocando-se cinco sementes por vaso do milho BRS – Caatingueiro, proveniente da safra colhida no mês de abril de 2009, adquirido na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Três dias após a semeadura (DAS) observou-se o aparecimento dos coleóptilos, e no sexto DAS as folhas cotiledonais se abriram completamente.

As avaliações das variáveis de crescimento, como comprimento e diâmetro dos caules, comprimento, largura e número das folhas, foram realizadas em cinco épocas, discriminadas a seguir.

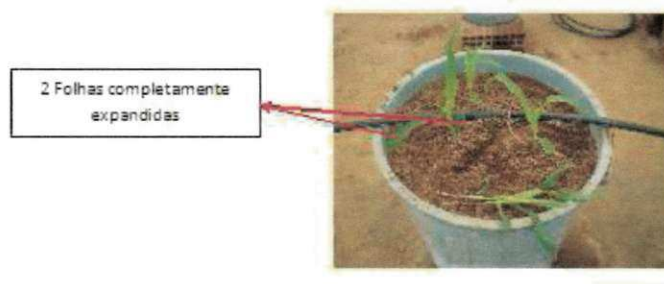
1º Avaliação – Aos 6 dias após a semeadura (DAS), fase em que as plantas apresentavam 2 folhas totalmente expandidas, foi realizado o desbaste, permanecendo apenas três plantas por vaso (Figura 6), as quais foram avaliadas;

2º Avaliação – Aos 31 DAS, fase em que as plantas apresentavam 4 folhas totalmente expandidas;

3º Avaliação – Aos 43 DAS, fase em que as plantas apresentavam 8 folhas totalmente expandidas; nesse período foi coletada uma planta para análise destrutiva, permanecendo duas plantas em cada vaso;

4º Avaliação – Aos 49 DAS, fase em que as plantas apresentavam inflorescência; neste período foi feita a coleta da segunda planta para análise destrutiva;

5º Avaliação – Aos 92 DAS, fase em que os grãos se encontravam com a camada preta na inserção com a espiga, conhecida como maturação fisiológica. Após a avaliação das variáveis de crescimento as plantas foram colhidas, pesadas e levadas à estufa para secagem. Salienta-se que aos 65 DAS já havia espigas formadas em todas as plantas.



**Figura 6:** Desbaste das duas primeiras plantas

Do início do experimento até a emissão da segunda folha das plantas, completamente expandidas, a irrigação foi realizada diariamente mantendo o solo em capacidade de campo em todos os tratamentos; a partir daí, teve início do controle das lâminas de irrigação, diferenciando-se os tratamentos.

#### **4.6. Variáveis de crescimento analisadas**

##### **4.6.1. Comprimento do caule**

O comprimento do caule (CC) foi mensurado da superfície do solo ao “colar” (linha de união lâmina-bainha facilmente visível) de última folha totalmente expandida, com o auxílio de régua graduada, conforme Benincasa (2003).



#### **4.6.2. Diâmetro do caule**

A medição do diâmetro do caule (DC) foi realizada com um paquímetro analógico, cujas leituras foram efetuadas na região do colo de cada planta, próximo ao nível do solo, segundo Skora Neto (2003).

#### **4.6.3. Área foliar**

Após determinação das dimensões lineares (comprimento e largura) de cada lâmina foliar totalmente expandida, a Área Foliar (AF) foi calculada através da expressão:  $AF = C \times L \times 0,75$ , descrita e utilizada por Tollenaar (1992). A Área Foliar por planta foi calculada somando-se as áreas de todas as folhas da planta.

#### **4.6.4. Massa seca da parte aérea (MSPA)**

As plantas coletadas nas 3<sup>o</sup>, 4<sup>o</sup> e 5<sup>o</sup> avaliações, tiveram, inicialmente, suas regiões fisiológicas, caule, folhas e fruto (da planta coletada na 5<sup>o</sup> avaliação) separadas, lavadas com água destilada e acondicionadas em sacos de papel identificados e perfurados; em seguida, foram levadas a estufa com aeração forçada à temperatura de 61°C, por 72 horas ou até atingirem peso constante obtendo-se, assim, a fitomassa seca da parte aérea (FSPA), utilizando-se uma balança com precisão de 0,0001g.

#### **4.7. Teor relativo de água na folha (TRA)**

O Teor Relativo de Água na folha ( $TRA_{folha}$ ), segundo metodologia proposta por Cairo (1995), foi determinado na oitava folha (contada a partir da base da planta) das plantas coletadas nos períodos das 3<sup>o</sup> e 4<sup>o</sup> avaliações. Desta folha foram cortados cinco quadrados de 20 mm, os quais foram, de imediato, individualmente pesados obtendo-se a *Massa real*; em seguida, foram acondicionados em sacos plásticos, individualmente, contendo 200 mL de água destilada, previamente identificados, permanecendo em repouso 24 horas. Após este período os quadrados foram pesados,

individualmente, resultando na massa túrgida ou *Massa saturada* da amostra. Feitas as pesagens, os quadrados foram acondicionados em sacos de papel previamente identificados com 4 furos nas laterais para facilitar a aeração, e levados à estufa de aeração forçada a 61°C por um período médio de 72 horas ou até atingirem peso constante; ao final deste período o material foi pesado obtendo-se a *Massa seca*.

O cálculo do  $TRA_{\text{folha}}$  foi realizado utilizando-se a Equação 4.4.

$$TRA_{\text{folha}} = \left( \frac{\text{Massa real} - \text{Massa seca}}{\text{Massa saturada} - \text{Massa seca}} \right) \cdot 100 \quad \text{Eq. 4.4.}$$

#### 4.8. Teores de fósforo e silício na parte aérea da planta

Determinou-se a quantidade de fósforo e silício no caule e folhas das plantas, coletadas nas 4ª e na 5ª avaliações (fases de floração e produção). As partes foram secadas, trituradas e encaminhadas para análise no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo da Universidade Federal de Campina Grande, PB; para determinação do fósforo nas partes da planta e determinação do silício, encaminharam-se as amostras, ao Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia

A determinação do fósforo foi realizada em 0,5 g de amostras moídas e peneiradas de cada parte da planta sendo submetidas adigestão nitroperclórica (1: 2) completando-se o volume para 50 mL e depois filtrado para obtenção do extrato, a partir do qual se determinou o teor de fósforo por espectrofotometria de absorção atômica (EMBRAPA, 1997).

A análise de Si nas plantas de milho foi feita segundo o método descrito por Elliott & Snyder (1991) adaptado por Korndörfer et al. (2004). Separava-se 0,1000 g da amostra (caules e folhas triturados) e se colocava em tubo de plástico; a seguir, acrescentavam-se 2 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30 ou 50%) mais 3 mL de NaOH (1:1); depois de agitados os tubos eram imediatamente colocados na autoclave durante 1 h a 123°C e 1,5 atm. de pressão. Uma alíquota do material digerido era misturado a 2 mL de molibdato de amônio 1:5 [(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub> Mo<sub>7</sub> O<sub>24</sub> . 4 H<sub>2</sub>O : água destilada] para a formação do complexo amarelo ácido sílico-molíbico [H<sub>4</sub> (Si Mo<sub>12</sub> O<sub>40</sub>)]. A formação do complexo ácido sílico-molíbico é máxima entre pH 1,0 e 2,0; para baixar o pH das amostras, quantidades proporcionais ao volume da alíquota, adicionava-se HCl

(50%). O ácido 1-amino-2-naftol-4-sulfônico (reductor), utilizado para eliminar a interferência do P e do Fe, foi substituído pelo ácido oxálico (75 g de  $(\text{COOH})_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$  em 200 mL de água destilada) na proporção de 2 mL por amostra. A leitura do Si nos extratos era feita em fotocolorímetro, no comprimento de onda de 410 nm.

#### **4.9. Produção de milho**

A produção de milho foi avaliada pesando-se os grãos em balança de precisão de 0,001 g, secados em estufa de circulação de ar forçada a 60°, até atingir o teor de umidade de 13 % em base seca.

#### **4.10. Eficiência do uso da água (EUA)**

A eficiência do uso da água foi calculada pela relação entre a produção de milho (massa dos grãos secos) e o consumo de água no período de produção em que foram diferenciadas as lâminas de irrigação (período compreendido entre 22 de junho - 6 DAS - a 17 de setembro - 92 DAS, totalizando 86 DAS).

#### **4.11. Análise dos dados**

Os dados obtidos foram avaliados em esquema de faixas em parcelas subdivididas. Para os fatores lâminas de irrigação e doses de silício, realizaram-se a análise de regressão polinomial e o teste de Tukey para comparação das médias, utilizando-se o programa computacional SISVAR versão 5.1.

## 5 » RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Total de água aplicada no milho

As lâminas de reposição de água correspondentes a 50, 75, 100 e 125 % da  $ET_c$ , calculadas para as fases vegetativas da cultura em que as plantas apresentavam 4 e 8 folhas totalmente expandidas, floração e produção estão apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2:** Lâminas de irrigação de água acumuladas nas fases de avaliação das plantas de milho

Fase de avaliação	Lâmina de irrigação acumulada, mm			
	50 % da $ET_c$	75 % da $ET_c$	100 % da $ET_c$	125 % da $ET_c$
4º Folha	16	23	31	39
8º Folha	30	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>75</b>
Floração	39	<b>59</b>	<b>78</b>	<b>98</b>
Produção	87	<b>131</b>	<b>174</b>	<b>218</b>

### 5.2. Variáveis de crescimento analisadas

#### 5.2.1. Comprimento do caule

De acordo com a análise de variância do comprimento do caule do milho, nas diferentes fases vegetativas não houve efeito de bloco em nenhuma avaliação, possivelmente em decorrência do experimento ter sido conduzido em ambiente protegido, o qual apresentava as mesmas condições para todos os blocos (Tabela 3). Os coeficientes de variação das médias foram baixos, indicando boa precisão experimental.

Os efeitos de lâmina de irrigação sobre o comprimento do caule foram significativos na fase em que a planta apresentava 8 folhas, na fase de floração e na fase de produção da cultura. Segundo Mattos et al. (2005) a deficiência hídrica interfere na fisiologia e na morfologia das plantas, a ponto de causar, conforme a magnitude, severas limitações no desenvolvimento da planta. Para Bergamaschi et al. (2004) o

período crítico em que o milho necessita de aporte hídrico máximo, vai da fase do pendoamento (ou floração masculina) ao início de enchimento de grãos.

**Tabela 3:** Quadrados médios da análise de variância do comprimento do caule nas diferentes fases vegetativas das plantas, em função das lâminas de irrigação e doses de silício (Análises de variância completa em Apêndices A.I)

Fonte de Variação	GL	Quadrados Médios				
		Fases de avaliação				
		2º folha	4º folha	8º folha	Floração	Produção
Bloco	2	0,66 <sup>ns</sup>	2,48 <sup>ns</sup>	59,14 <sup>ns</sup>	350,13 <sup>ns</sup>	442,11 <sup>ns</sup>
Lâmina de Irrigação (L)	3	0,79 <sup>ns</sup>	5,73 <sup>ns</sup>	274,6 <sup>*</sup>	4787,37 <sup>**</sup>	6529,87 <sup>**</sup>
Erro 1	6	1,42	1,85	61,77	192,58	214,14
Dose de silicato de cálcio e magnésio	3	0,32 <sup>ns</sup>	0,86 <sup>ns</sup>	21,95 <sup>ns</sup>	214,36 <sup>ns</sup>	262,74 <sup>ns</sup>
Erro2	6	0,39	1,27	37,65	79,46	112,24
Interação (L x Si)	9	0,24 <sup>ns</sup>	0,99 <sup>ns</sup>	50,07 <sup>**</sup>	387,59 <sup>ns</sup>	490,29 <sup>**</sup>
Erro 3	18	0,47	0,99	15,63	175,76	186,19
Total corrigido	47					
Coeficientes de Variação (CV, %)						
CV 1 -----		14,93	8,70	13,20	10,93	10,42
CV 2 -----		7,78	7,21	10,31	7,02	7,54
CV 3 -----		8,62	6,35	6,64	10,45	9,71

<sup>ns</sup> Não significativo; <sup>\*\*</sup> Significativo ao nível de 1 % de probabilidade pelo teste F.

A variação das médias do comprimento do caule em função das doses de silício, não foi significativa em nenhuma fase do desenvolvimento das plantas, indicando que o crescimento do caule não foi influenciado pela aplicação de silício como adubo (Tabela 3). Chaves & Vasconcelos (2006), avaliando o efeito do xisto retornado, proveniente da Petrobrás-SIX, como fonte de silício (57% em peso de SiO<sub>2</sub>), na cultura do milho, observaram pequenos acréscimos na altura das plantas porém sem significância estatística. Segundo Medeiros et al. (2009), a aplicação de escória de siderurgia, rica em silicato de cálcio e magnésio, na cultura de cana-de-açúcar, não teve influência significativa no crescimento nem nas características fisiológicas das plantas.

Em duas cultivares de trigo submetidas a doses crescentes de silício, Orioli Júnior et al. (2008), notaram que o silício não interferiu na altura das plantas, contra-

riando o que havia sido observado por Gong et al. (2003). De acordo com esses autores, em boas condições de umidade do solo a aplicação de silício aumentou a altura de plantas de trigo; no entanto, quando submeteram as plantas conjuntamente à aplicação de silício e estresse hídrico, a altura de plantas se manteve constante.

Mali & Aery (2009) estudando o efeito do silício na cultura de feijão macassar (*Vigna unguiculata* L.) observaram um aumento de 18,9% no comprimento dos caules das plantas cultivadas com a dose 100 mg Si kg<sup>-1</sup> de solo em relação ao controle sem silício tendo, a partir desta dose até 800 mg Si kg<sup>-1</sup> de solo, ocorrido decréscimo gradual no mesmo. Segundo Powell et al. (1986), a inibição do crescimento pelas doses mais altas de silício pode ser devida à limitação da atividade mitótica na zona meristemática e/ou a uma parada do crescimento das células como consequência da diminuição da turgidez das células (GABBRIELLI et al., 1990) ou, ainda, em virtude da reduzida elasticidade das paredes celulares (PANDOLFINI et al., 1992; AERY & JAGETIYA, 2000).

A interação entre os fatores lâmina de água e silício, teve efeito significativo sobre o comprimento do caule das plantas quando estas se encontravam com 8 folhas totalmente expandidas e quando se encontravam na fase de produção (Tabela 3).

Nas fases em que as plantas apresentavam 2 e 4 folhas totalmente expandidas, os comprimentos dos seus caules não diferiram entre si, a nível de 5 % de probabilidade, pelo teste de Tukey, em função das lâminas de água (Tabela 4). Na fase vegetativa em que as plantas apresentavam 8 folhas totalmente expandidas, só ocorreu diferença significativa entre os comprimentos dos caules das plantas que receberam as lâminas de reposição de água nos níveis de 75 e 125 % da ET<sub>c</sub>, tendo ocorrido os menores valores de comprimento de caule com a maior lâmina de água. Nas fases de floração e produção as plantas que receberam o suprimento de água correspondente a 100 e 125 % da ET<sub>c</sub>, apresentaram os maiores valores de comprimento de caule.

**Tabela 4:** Valores médios do comprimento do caule, em cm, nas diferentes fases vegetativas das plantas, em função das lâminas de irrigação e doses de silício

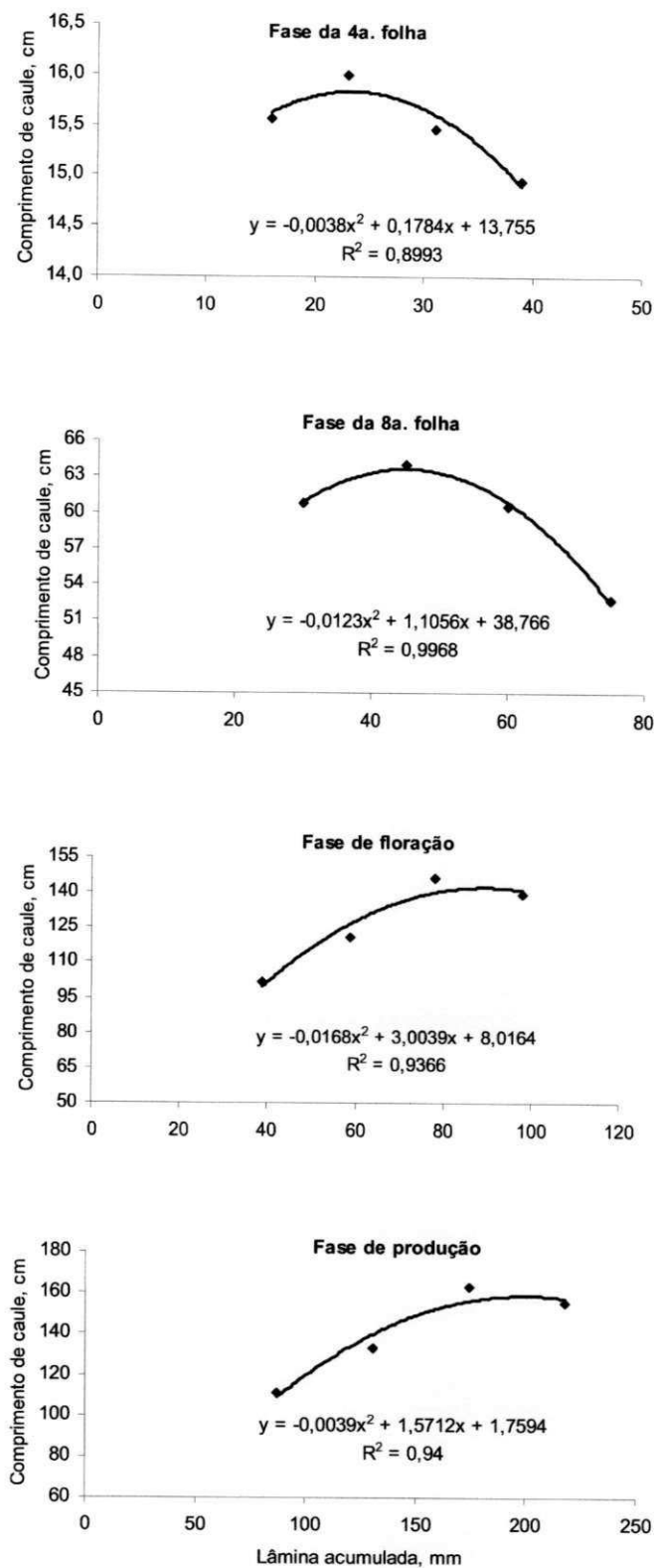
Fontes de Variação	Valores médios dos comprimentos de caule, cm.				
	Fases de avaliação				
	2º folha	4º folha	8º folha	Floração	Produção
Lâmina de irrigação (% ET <sub>c</sub> )					
50	7,63 a	15,57 a	60,78 ab	101,51 a	110,85 a
75	8,10 a	16,60 a	63,98 b	120,92 ab	133,41 b
100	8,07 a	15,47 a	60,59 ab	146,00 c	162,65 c
125	8,22 a	14,95 a	52,73 a	139,21 bc	155,08 c
Dose de Silício ( kg ha <sup>-1</sup> )					
0	8,23 a	15,93 a	60,27 a	121,44 a	134,85 a
300	7,98 a	15,78 a	60,99 a	127,90 a	140,98 a
600	7,97 a	13,32 a	58,78 a	126,62 a	139,89 a
900	7,84 a	15,56 a	58,03 a	131,67 a	146,26 a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na Figura 7 tem-se as curvas de tendência descritas pelas médias dos comprimentos dos caules, em relação à lâmina de irrigação aplicada, assim como as equações de regressão com seus respectivos R<sup>2</sup>, para diferentes épocas de avaliação. Todas as equações de regressão apresentam ótimos ajustes aos dados analisados, com coeficientes de correlação muito altos (>0,89).

Nas fases em que as plantas se encontravam com 4 e 8 folhas, ocorreram decréscimos do comprimento do caule em função do aumento das lâminas de irrigação (Figura 7). Tal comportamento pode estar relacionado ao fato do sistema radicular, nas épocas correspondentes às tais fases, ainda se encontrar totalmente desenvolvido e, com o aumento das referidas lâminas, os nutrientes podem ter sido carreados para as camadas mais profundas dos vasos em que as plantas estavam sendo cultivadas diminuindo, assim, a concentração dos mesmos na região de alcance das raízes.





**Figura 7:** Comprimentos de caule nas diferentes fases do desenvolvimento do milho em função das lâminas de irrigação aplicadas

Nas épocas de floração e produção as plantas, por terem seus sistemas radiculares completamente desenvolvidos, podendo explorar maior volume de solo e, conseqüentemente, tendo maior suprimento nutricional na rizosfera, apresentaram aumento no comprimento de caule em função do aumento da lâmina de irrigação (Figura 7) até determinado limite. A partir desse limite e na medida em que a lâmina aumentou, observou-se decréscimo do comprimento do caule, mostrando que água em excesso resultou em retardamento do desenvolvimento vegetativo da planta do milho.

De acordo com os desdobramentos (Tabela 5) observa-se que, em geral, a maior lâmina de irrigação (125 % da  $ET_c$ ) não foi a mais adequada para o desenvolvimento do caule.

**Tabela 5:** Médias do comprimento de caule, em cm, dos desdobramentos das lâminas de irrigação dentro das doses de silício

Desdobramento	Valores médios dos comprimentos de caule, cm.				
	Fases de avaliação				
Lâmina (% da $ET_c$ ) na Dose de Si ( $kg\ ha^{-1}$ )	2º folha	4º folha	8º folha	Floração	Produção
50 x 0	7,73 a	15,70 ab	60,67 a	97,93 a	107,40 a
75 x 0	8,67 a	17,57 b	60,43 a	108,00 ab	120,30 ba
100 x 0	8,47 a	15,67 ab	62,16 a	131,67 bc	146,67 bc
125 x 0	8,07 a	14,80 a	57,83 a	148,17 c	165,03 d
50 x 300	7,60 a	16,10 a	66,60 b	98,43 a	105,67 a
75 x 300	7,97 a	16,17 a	63,43 b	119,33 ab	130,93 ab
100 x 300	7,73 a	15,03 a	59,66 ab	164,33 c	183,07 c
125 x 300	8,63 a	15,80 a	54,26 a	129,50 b	144,27 b
50 x 600	7,70 a	15,47 a	61,27 b	103,00 a	113,17 a
75 x 600	7,97 a	15,93 a	64,77 b	122,33 ab	133,13 ab
100 x 600	7,93 a	15,17 a	57,67 ab	134,83 b	150,23 b
125 x 600	8,26 a	14,70 a	51,43 a	146,33 b	163,03 b
50 x 900	7,50 a	15,00 a	54,60 ab	106,67 a	117,17 a
75 x 900	7,80 a	16,73 a	67,27 c	134,00 ab	149,26 b
100 x 900	8,13 a	16,00 a	62,87 bc	153,16 b	170,63 b
125 x 900	7,93 a	14,50 a	47,4 a	132,83 ab	147,96 ab

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em relação às doses de silício (na interação com as lâminas), nas fases em que houve diferença significativa entre as médias de comprimento de caule observa-se que, com a presença do elemento, o desenvolvimento do caule foi maior em relação à testemunha e, na maioria dos casos, as doses de 300 e 600 kg ha<sup>-1</sup> se apresentaram mais favoráveis (Tabela 6).

**Tabela 6:** Médias do comprimento de caule, em cm, dos desdobramentos das doses de silício dentro de cada lâmina de irrigação aplicada

Desdobramento	Valores médios dos comprimentos de caule, cm.				
	Fases de avaliação				
Dose de Si (kg ha <sup>-1</sup> ) na Lâmina (% da ET <sub>c</sub> )	2º folha	4º folha	8º folha	Floração	Produção
0 x 50	7,73 a	15,70 a	60,67 ab	97,93 a	107,40 a
300 x 50	7,60 a	16,10 a	66,60 b	98,43 a	105,67 a
600 x 50	7,70 a	15,47 a	61,27 ab	103,00 a	113,17 a
900 x 50	7,50 a	15,00 a	54,60 a	106,67 a	117,17 a
0 x 75	8,67 a	17,57 a	60,43 a	108,00 a	120,30 a
300 x 75	7,97 a	16,17 a	63,43 a	119,33 a	130,93 a
600 x 75	7,97 a	15,93 a	64,77 a	122,33 a	133,13 a
900 x 75	7,80 a	16,73 a	67,27 a	134,00 a	149,26 a
0 x 100	8,47 a	15,67 a	62,16 a	131,67 a	146,67 a
300 x 100	7,73 a	15,03 a	59,66 a	164,33 b	183,07 b
600 x 100	7,93 a	15,17 a	57,67 a	134,83 bc	150,23 a
900 x 100	8,13 a	16,00 a	62,87 a	153,16 bc	170,63 ab
0 x 125	8,07 a	14,80 a	57,83 a	148,17 a	165,03 a
300 x 125	8,63 a	15,80 a	54,26 a	129,50 a	144,27 a
600 x 125	8,26 a	14,70 a	51,43 a	146,33 a	163,03 a
900 x 125	7,93 a	14,50 a	47,40 a	132,83 a	147,96 a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

### 5.2.2. Diâmetro do caule

Na Tabela 7 são vistos os dados referentes aos quadrados médios dos diâmetros dos caules do milho, mensurados em diferentes períodos de desenvolvimento da cultura. Verifica-se que não existiu diferença significativa em relação aos blocos e que os coeficientes de variação obtidos foram relativamente baixos, indicando boa precisão experimental.

A lâmina de irrigação influenciou de maneira significativa o diâmetro do caule das plantas, a nível de 5 % de probabilidade mas só a partir da fase em que as plantas já apresentavam 8 folhas totalmente expandidas.

Os efeitos das doses de silício não refletiram em diferenças significativas do diâmetro do caule corroborando com Chaves & Vasconcelos (2006) que, avaliando o efeito do xisto retornado (57% em peso de SiO<sub>2</sub>) na cultura do milho, não observaram efeitos significativos sobre o diâmetro do caule. Entretanto, Prado & Natale (2004) e Neri et al. (2009), constataram aumento do diâmetro do caule das plantas de maracujá e de milho, respectivamente, quando adubadas com silício. De acordo com Plucknett (1971), entre outros benefícios o silício pode aumentar o tamanho e o diâmetro dos colmos da cana-de-açúcar; no entanto, Medeiros et al. (2008), mostraram decréscimo no diâmetro caulinar de cana-de-açúcar quando adubada com doses crescentes de silício.

**Tabela 7:** Resumo da análise de variância do diâmetro do caule em diversas fases de crescimento do milho (Análises de variância, na íntegra em apêndices A.II)

Fonte de Variação	GL	Quadrados Médios				
		Fases de avaliação				
		2º folha	4º folha	8º folha	Floração	Produção
Bloco	2	0,16 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	6,11 <sup>ns</sup>	4,59 <sup>ns</sup>	4,83 <sup>ns</sup>
Lâmina de Irrigação (L)	3	0,88 <sup>ns</sup>	0,35 <sup>ns</sup>	<b>8,96*</b>	<b>36,7*</b>	<b>28,89*</b>
Erro 1	6	0,41	0,12	1,42	4,56	4,18
Dose de Silício (Si)	3	0,22 <sup>ns</sup>	0,21 <sup>ns</sup>	0,49 <sup>ns</sup>	1,93 <sup>ns</sup>	1,81 <sup>ns</sup>
Erro2	6	0,37	0,48	0,62	3,43	2,81
Interação (L X Si)	9	0,11 <sup>ns</sup>	0,16 <sup>ns</sup>	0,79 <sup>ns</sup>	1,25 <sup>ns</sup>	2,58 <sup>ns</sup>
Erro 3	18	0,17	0,29	2,99	2,64	1,63
Total corrigido	47					
<b>Coefficientes de Variação (CV, %)</b>						
CV 1 -----		11,99	3,49	4,99	10,14	9,88
CV 2 -----		11,45	6,84	3,29	8,80	8,11
CV 3 -----		7,73	5,37	7,22	7,72	6,18

<sup>ns</sup> Não significativo; \* Significativo ao nível de 5 % de probabilidade.

De acordo com os valores médios do diâmetro do caule apresentados na Tabela 8, pode-se observar que, em geral, os níveis de reposição de água que inferiram maiores médias foram as lâminas que refletiam em 100 e 125 % da ET<sub>c</sub>.

Comparando as médias dos diâmetros de caule das plantas nas várias fases em que foram avaliados, observa-se que nas fases de floração e produção ocorreu seu decréscimo quando comparadas com as médias observadas na fase em que a planta apresentava 8 folhas (Tabela 8). Provavelmente isto tenha ocorrido pelo fato das plantas apresentarem, nos períodos da floração e produção, uma demanda hídrica maior e, em contrapartida, menor turgescência das células caulinares, que nos períodos anteriores. Outro ponto a ser levado em consideração se refere à maturidade das células epidérmicas que, ao se tratar de caule, são chamadas de peridérmicas e para dar sustentação à planta tem em sua parede celular um acúmulo de súber, sendo intensificado na maturidade da planta (fases de floração e produção). Isto faz com que nessas células (da periderme) ocorra diminuição do conteúdo de água e da turgescência, explicando a diminuição do diâmetro do caule (RAVEN, 2001).

**Tabela 8:** Valores médios do diâmetro do caule, em mm, em função da lâmina de irrigação e da adubação silicatada aplicada

Fonte de Variação	Valores médios dos diâmetros de caule, mm.				
	Fases de avaliação				
	2º folha	4º folha	8º folha	Floração	Produção
Lâmina de irrigação (% da ET <sub>c</sub> )					
50	5,31 a	10,02 a	24,04 ab	19,87 ab	19,71 ab
75	4,97 a	9,99 a	22,72 a	19,27 a	19,03 a
100	5,50 a	10,37 a	24,27 ab	22,31 b	21,69 ab
125	5,58 a	10,07 a	24,74 b	22,80 b	22,27 b
Dose de Silício (Kg ha <sup>-1</sup> )					
0	5,21 a	10,25 a	24,70 a	20,66 a	20,34 a
300	5,23 a	9,97 a	23,89 a	21,02 a	20,62 a
600	5,45 a	10,20 a	23,70 a	21,62 a	21,23 a
900	5,47 a	10,03 a	24,01 a	20,96 a	20,52 a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

### 5.2.3. Área foliar

A Tabela 9 contém os dados referentes aos quadrados médios das medidas das áreas foliares do milho, avaliadas em diferentes períodos de desenvolvimento da cultura. Verifica-se que não existiu diferença significativa em relação aos blocos,

sendo os coeficientes de variação relativamente baixos, indicando boa precisão nos dados avaliados.

As lâminas de irrigação exerceram efeito significativo na área foliar das plantas somente nos períodos em que elas apresentavam 2 e 4 folhas totalmente expandidas, o que não foi observado nas demais fases vegetativas indicando que, mesmo nos tratamentos submetidos às menores lâminas de irrigação as plantas apresentaram áreas foliares semelhantes. Ressalta-se que, embora haja áreas foliares semelhantes, as plantas submetidas às lâminas de reposição de água de 50 e 75 % da  $ET_c$ , apresentavam tonalidade de verde mais claro do que as plantas com tratamentos de 100 e 125 % da  $ET_c$ , que apresentavam o verde com tonalidade mais escura.

**Tabela 9:** Resumo da análise de variância da área foliar em diversas fases de crescimento do milho (Análises de variância, na íntegra em apêndices A.III)

Fonte de Variação	GL	Quadrados Médios				
		Fases de avaliação				
		2ª folha	4ª folha	8ª folha	Floração	Produção
Bloco	2	49,7 <sup>ns</sup>	947,42 <sup>ns</sup>	1883,09 <sup>ns</sup>	38526,6 <sup>ns</sup>	36249,74 <sup>ns</sup>
Lâmina de Irrigação (L)	3	<b>26,37*</b>	<b>700,64*</b>	73697,65 <sup>ns</sup>	153781,69 <sup>ns</sup>	144692,3 <sup>ns</sup>
Erro 1	6	3,69	123,72	26834,99	97307,16	91555,25
Dose de Silício (Si)	3	6,43 <sup>ns</sup>	23,93 <sup>ns</sup>	11055,17 <sup>ns</sup>	35400,08 <sup>ns</sup>	33307,11 <sup>ns</sup>
Erro2	6	10,4	220,22	17221,26	33194,78	31232,81
Interação (L X Si)	9	3,99 <sup>ns</sup>	185,85 <sup>ns</sup>	23822,01 <sup>ns</sup>	131094,68 <sup>ns</sup>	123348,61 <sup>ns</sup>
Erro 3	18	17,16	409,58	12281,66	53415,28	50258,91
Total corrigido	47					
<b>Coefficientes de Variação (CV, %)</b>						
CV 1-----		11,99	3,49	4,99	10,14	9,88
CV 2-----		11,45	6,84	3,29	8,80	8,11
CV 3-----		7,73	5,37	7,22	7,72	6,18

<sup>ns</sup> Não significativo; \* Significativo ao nível de 5 % de probabilidade.

As doses de silício não refletiram em efeitos significativos nas médias de área foliar em nenhum período de avaliação, assim como a interação das lâminas de irrigação com as dosagens de adubação silicatada.

De acordo com Gong et al. (2003), a área foliar de trigo foi reduzida quando as plantas foram submetidas à aplicação de silício.

Mali & Aery (2009) estudando o efeito do silício na cultura de feijão macassar (*Vigna unguiculata* L.) observaram aumento de 52,2% na área foliar das plantas cultivadas com a dose 100 mg Si kg<sup>-1</sup> de solo em relação ao controle, sem silício ocorrendo, a partir de 200 mg Si kg<sup>-1</sup>, redução gradual na mesma.

As maiores médias de área foliar observadas no presente trabalho, mesmo não diferindo estatisticamente foram, em geral, aquelas correspondentes aos tratamentos com lâminas de reposição de 100 e 125 % da ET<sub>c</sub> (Tabela 10). Na fase em que a planta apresentava 8 folhas observou-se que as plantas submetidas às lâminas menores (50 e 100 % da ET<sub>c</sub>) apresentaram médias de área foliar ligeiramente maiores que as dos tratamentos com lâminas de irrigação de 75 e 125 % da ET<sub>c</sub>.

**Tabela 10:** Valores médios da área foliar em função da lâmina de irrigação e da adubação silicatada aplicada

Fonte de Variação	Valores médios das áreas foliar, cm <sup>2</sup>				
	Fases de avaliação				
	2º folha	4º folha	8º folha	Floração	Produção
<b>Lâmina de irrigação (% da ET<sub>c</sub>)</b>					
50	27,40 a	147,70 a	1106,26 a	760,52 a	737,71 a
75	26,88 a	147,85 ab	1021,74 a	682,48 a	662,00 a
100	27,80 ab	149,58 ab	1087,55 a	886,99 a	860,38 a
125	30,23 b	163,56 b	932,89 a	927,85 a	900,00 a
<b>Dose de Silício (kg ha<sup>-1</sup>)</b>					
0	28,71 a	152,02 a	999,75 a	759,35 a	736,57 a
300	27,49 a	150,27 a	1045,33 a	888,88 a	862,21 a
600	28,72 a	153,52 a	1072,61 a	798,21 a	774,26 a
900	27,39 a	152,90 a	1030,75 a	811,40 a	787,06 a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

#### 5.2.4. Massa seca da parte aérea (MSPA)

As lâminas de irrigação tiveram efeito significativo, a nível de 1 % de probabilidade, sobre o acúmulo de massa seca da parte aérea do milho nas fases de 8 folhas, floração e de produção, enquanto as doses de silício e a interação entre os

- 
- [8] Y. Cheon and C. Medrano. Random test data generation for java classes annotated with jml specifications. pages 385–392, 2007.
  - [9] Yoonsik Cheon, Antonio Cortes, Gary T. Leavens, and Ceberio Martine. Integrating random testing with constraints for improved efficiency and diversity. In *SEKE*, pages 861–866, 2008.
  - [10] Yoonsik Cheon and Gary Leavens. A runtime assertion checker for the java modeling language (jml). In *Proceedings of SERP*, 2002.
  - [11] David R. Cok and Joseph R. Kiniry. Esc/java2: Uniting esc/java and jml – progress and issues in building and using esc/java2. In *CASSIS*, 2004.
  - [12] m Darvas and Peter Mller. Faithful mapping of model classes to mathematical structures. volume 2, pages 477–499, 2008.
  - [13] Edsger W. Dijkstra. *A constructive approach to the problem of program correctness*. 1967. circulated privately.
  - [14] Michael D. Ernst, Jeff H. Perkins, Philip J. Guo, Stephen McCamant, Carlos Pacheco, Matthew S. Tschantz, and Chen Xiao. The Daikon system for dynamic detection of likely invariants. volume 69, pages 35–45, December 2007.
  - [15] Gordon Fraser and Andrea Arcuri. Evosuite: automatic test suite generation for object-oriented software. In *Proceedings of the 19th ACM SIGSOFT symposium and the 13th European conference on Foundations of software engineering, ESEC/FSE ’11*, pages 416–419, New York, NY, USA, 2011. ACM.
  - [16] David Gelperin and Bill Hetzel. The growth of software testing. *Communications of the ACM*, 31(6):687–695, 1988.
  - [17] C. Hoare. *An Axiomatic Basis for Computer Programming*, volume 12. 1969.
  - [18] C. Hoare. *Proof of Correctness of Data Representation*. 1975.
  - [19] Gary Leavens, A. Baker, and C. Ruby. Jml: A notation for detailed design. chapter 12, pages 175–188. In *Behavioral Specifications for Businesses and Systems*, 1999.



- [20] Gary Leavens, Albert Baker, and Clyde Ruby. Preliminary design of jml: A behavioral interface specification language for java. *SIGSOFT Softw. Eng. Notes*, 31:1–38, 2006.
- [21] Gary T. Leavens, Albert L. Baker, and Clyde Ruby. Preliminary design of jml: a behavioral interface specification language for java. *SIGSOFT Softw. Eng. Notes*, 31(3):1–38, May 2006.
- [22] Gary T. Leavens and Yoonsik Cheon. Design by contract with jml.
- [23] Darko Marinov and Sarfraz Khurshid. Testera: A novel framework for automated testing of java programs. In *ASE '01: Proceedings. 16th Annual International Conference on Automated Software Engineering*, page 22. IEEE Computer Society, 2001.
- [24] Vincent Massol and Ted Husted. *JUnit in Action*. Manning Publications Co., Greenwich, CT, USA, 2003.
- [25] Tiago Lima Massoni. *A Model-driven Approach to Formal Refactoring*. PhD thesis, UFPE, Recife, 2008.
- [26] Jim A.I McCal, Paul K. Richards, and Gene F. Walters. *Factors in Software Quality*, volume 1. Pressman, 1977.
- [27] B Meyer. Eiffel: programming for reusability and extendibility. *SIGPLAN Not.*, 22:85–94, 1987.
- [28] Bertrand Meyer. *Object-Oriented Software Construction*. Prentice-Hall, Inc., 1st edition, 1988.
- [29] Bertrand Meyer. Applying "design by contract". *IEEE Computer*, 25(10):40–51, 1992.
- [30] Bertrand Meyer. *Object-Oriented Software Construction, 2nd Edition*. Prentice-Hall, 1997.
- [31] Bertrand Meyer, Arno Fiva, Ilinca Ciupa, Andreas Leitner, Yi Wei, and Emmanuel Stapf. Programs that test themselves. *IEEE Computer*, 42(9):46–55, 2009.
- [32] Glenford J. Myers. *The art of software testing (2. ed.)*. Wiley, 2004.

- [33] Tobias Nipkow, Lawrence C. Paulson, and Markus Wenzel. *Isabelle/HOL — A Proof Assistant for Higher-Order Logic*, volume 2283 of *LNCS*. Springer, 2002.
- [34] C. Oriat. Jartege: a tool for random generation of unit tests for java classes. Rapport de recherche LSR-IMAG, RR 1069, 2004.
- [35] E. Jong P. Hartel, M. Butler and M. Longley. Transacted memory for smart cards. pages 478–499. 10th Formal Methods for Increasing Software Productivity, 2001.
- [36] C. Pacheco, S. Lahiri, M. Ernest, and T. Ball. Feedback-directed random test generation. pages 75–84, 2007.
- [37] Carlos Pacheco and Michael D. Ernst. Eclat: Automatic generation and classification of test inputs. In Andrew P. Black, editor, *ECOOP 2005 - Object-Oriented Programming, 19th European Conference, Glasgow, UK, July 25-29, 2005, Proceedings*, volume 3586 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 504–527. Springer, 2005.
- [38] E. Poll, P. Hartel, and E. Jong. A java reference model of transacted for smart cards. In *CARDIS*, pages 75–86. 2002.
- [39] Henrique Rebêlo, Sérgio Soares, Ricardo Lima, Leopoldo Ferreira, and Márcio Cornélio. Implementing java modeling language contracts with aspectj. In *Proceedings of SAC '08, SAC '08*, pages 228–233, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [40] Henrique Emanuel Mostaert Rebêlo. Implementing jml contracts with aspectj. Master's thesis, Department of Computing and Systems, State University of Pernambuco, May 2008.
- [41] R. Rodrigues. *JML-Based Formal Development of a Java Card Application for Managing Medical Appointments*. Universidade da Madeira, 2009.
- [42] Gustavo Soares, Rohit Gheyi, and Tiago Massoni. Automated behavioral testing of refactoring engines. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 39(2):147–162, 2013.
- [43] Gustavo Soares, Rohit Gheyi, Dalton Serey, and Tiago Massoni. Making program refactoring safer. *IEEE Software*, 27:52–57, 2010.

- 
- [44] Ian Sommerville. *Software Engineering*. Pearson Studium, 2001.
- [45] Jeannette M. Wing. Writing larch interface language specifications. *ACM Trans. Program. Lang. Syst.*, 9(1):1–24, January 1987.
- [46] Daniel M. Zimmerman and Rinkesh Nagmoti. Jmlunit: The next generation. In *FoVeOOS*, pages 183–197, 2010.