

CRISTIAN MAURICIO VEGA CUICHÁN

**AVALIAÇÃO DE EXTRATORES PARA DETERMINAR A DISPONIBILIDADE
DE SILÍCIO EM DIFERENTES SOLOS BRASILEIROS**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central
da Universidade Federal de Viçosa -
Câmpus Viçosa**

T

V422a
2019

Vega Cuichán, Cristian, 1985-

Avaliação de extratores para determinar a disponibilidade de silício em diferentes solos brasileiros / Cristian Vega Cuichán. – Viçosa, MG, 2019.

xii, 87 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Leonardus Vergutz.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 64-73.

1. Solos - Teor de silício. 2. Plantas - Nutrição - Efeito do Silício. 3. Extração (Química). 4. Solos. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação

CDD 22. ed. 631.41

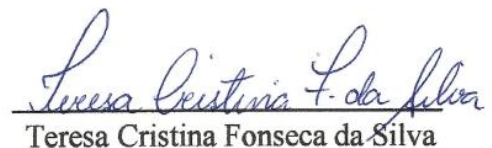
CRISTIAN MAURICIO VEGA CUICHÁN

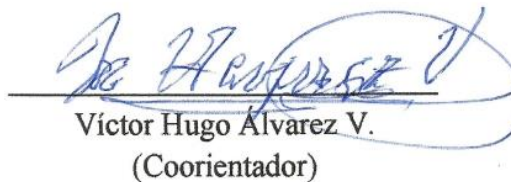
**AVALIAÇÃO DE EXTRATORES PARA DETERMINAR A DISPONIBILIDADE
DE SILÍCIO EM DIFERENTES SOLOS BRASILEIROS**

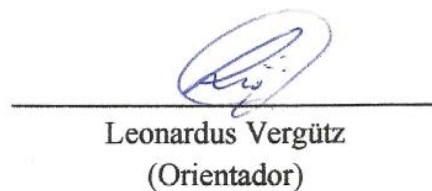
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 de fevereiro de 2019.


João Carlos Ker


Teresa Cristina Fonseca da Silva


Victor Hugo Alvarez V.
(Coorientador)


Leonardus Vergütz
(Orientador)

DEDICATÓRIA

À minha mãe (+)

Ao meu pai

À minha família

Às pessoas que acreditam que estou seguindo o caminho certo

AGRADECIMENTO

Ao Brasil, à Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Solos pela oportunidade de participar no processo seletivo e me outorgar uma bolsa, fornecida pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), para poder realizar meus estudos de Mestrado.

Ao meu Orientador, Professor Leonardus Vergütz, pela ótima e continua colaboração e sugestões em todas as etapas do presente trabalho, assim como pelo apoio profissional e pessoal em todo o tempo de estudo.

Ao Professor Victor Hugo Álvarez V., pela excelente coorientação e sugestões para a montagem do experimento, revisão da parte estatística e apresentação dos resultados.

Ao Professor Fabrício Rodrigues de Ávila que participou como coorientador e aos Professores Teresa Fonseca da Silva e João Carlos Ker pela participação na banca de defesa e pelo tempo dedicado à revisão do trabalho.

Ao Professor Raphael B. A. Fernandez e Ana Carolina, coordenador e secretaria do Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pelo apoio e comunicação constante desde o início do processo seletivo até a finalização do mestrado.

A todos os professores do Departamento de Solos pelas experiências e alta qualidade de ensino.

A todos os funcionários do Departamento de Solos, em todos seus níveis, especialmente aos Técnicos Carlos e Marcus, Carlinhos, Janílson, Evandro e Claudio, dos Laboratórios de Fertilidade, Espectrometria de Absorção Atômica, Elementos Traço, Física e Mineralogia do Solo respectivamente.

A Lucas, Matheus e Laís que participaram como estagiários nas diferentes etapas da pesquisa.

A Jéssica pelo apoio pessoal e profissional de forma constante e desinteressada sem importar horários nem datas fazendo desta etapa, sem dúvida nenhuma, uma das melhores da minha vida.

E a todos meus amigos e colegas de estudo e de vida.

SUMÁRIO

| | |
|---|-------------|
| LISTA DE QUADROS | vi |
| LISTA DE ILUSTRAÇÕES | viii |
| RESUMO | ix |
| ABSTRACT | xi |
| 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA | 1 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA | 4 |
| 2.1 Silício no solo..... | 4 |
| 2.2 Silício na planta..... | 8 |
| 2.3 Uso de Silício como fertilizante..... | 11 |
| 2.4 Extratores de Silício | 13 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 16 |
| 3.1 Caracterização dos solos | 16 |
| 3.1.2 Caracterização mineralógica..... | 19 |
| 3.2 Área experimental e amostragem | 20 |
| 3.2.1 Experimento 1 - Preparo da amostra na quantificação de Si disponível no solo | 20 |
| 3.2.2 Experimento 2 – Disponibilidade de Si no solo | 23 |
| 3.3 Determinação de Si disponível no solo..... | 28 |
| 3.4 Determinação do Silício na planta | 29 |
| 3.5 Análise estatística..... | 30 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 32 |
| 4.1 Caracterização mineralógica dos solos | 32 |
| 4.2 Preparo da amostra na quantificação de Si disponível no solo..... | 37 |
| 4.3 Extratores para determinar disponibilidade de Si no solo | 44 |
| 4.3.1 Teores de Si disponível no solo e taxas de recuperação pelos extratores Cloreto de Cálcio, Ácido Acético, Carbonato de Amônio e Mehlich-3 | 44 |
| 4.3.2 Teores de Si disponível no solo com e sem preparo de amostra..... | 52 |
| 4.3.3 Resposta da cultura de arroz à aplicação de Si | 54 |
| 4.3.4 Correlação entre o teor de Si disponível por cada extrator e o conteúdo de Si na parte aérea das plantas de arroz..... | 56 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5. | CONCLUSÕES | 63 |
| 6. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 64 |
| | APÊNDICES..... | 74 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1. Procedência e classificação dos solos. | 21 |
| Quadro 2. Características físicas dos solos. | 26 |
| Quadro 3. Características químicas dos solos. | 27 |
| Quadro 4. Minerais da fração argila determinados por difratometria de raios X. | 32 |
| Quadro 5. Teores de Si disponível (<i>tdSi</i>) nos solos 11-LVAd3 e 2-LVAd1 sem secagem e nos diferentes tempos de reumedecimento após secagem..... | 37 |
| Quadro 6. Equações do teor disponível de Si no solo (<i>tdSi</i>) (\hat{y} , mg dm ⁻³) em função do tempo de reumedecimento após secagem e sem secagem (x , h) para os dois solos estudados. | 38 |
| Quadro 7. pH no solos estudados em função do tempo de reumedecimento após secagem e sem secagem..... | 41 |
| Quadro 8. Equações dos teores de Si recuperado pelo extrator Cloreto de Cálcio (<i>tdSi</i> -CaCl ₂) (\hat{y} , mg dm ⁻³) em função das doses de Si (<i>dSi</i>) (x , mg dm ⁻³) aplicadas nos diferentes tempos de reumedecimento após secagem e sem secagem e taxa de recuperação de Si por Cloreto de Cálcio (<i>trSi</i> - CaCl ₂). | 43 |
| Quadro 9. Teor de Si disponível (<i>tdSi</i>) pelos extratores Cloreto de Cálcio (<i>tdSi</i> - CaCl ₂), Ácido Acético (<i>tdSi</i> -AA), Carbonato de Amônio (<i>tdSi</i> -CA) e Mehlich-3 (<i>tdSi</i> -M3) em função das doses de Si (<i>dSi</i>) aplicadas a cada solo e os dois preparos de amostra (pA). 44 | |
| Quadro 10. Equações dos teores de Si recuperado pelos extratores CaCl ₂ (<i>tdSi</i> - CaCl ₂), AA (<i>tdSi</i> -AA), CA (<i>tdSi</i> -CA) e M3 (<i>tdSi</i> -M3) em função das doses de Si (<i>dSi</i>) (x , mg dm ⁻³) aplicadas a cada solo e os dois preparos de amostra (pA) e taxa de recuperação de Si por CaCl ₂ (<i>trSi</i> - CaCl ₂), AA (<i>trSi</i> -AA), CA (<i>trSi</i> -CA) e M3 (<i>trSi</i> -M3). | 49 |
| Quadro 11. Contrastes ortogonais para teor de Si disponível (<i>tdSi</i>) pelos extratores Cloreto de Cálcio (CaCl ₂), Ácido Acético (AA), Carbonato de Amônio (CA) e Mehlich-3 (M3) por efeito das doses de Si dentro dos diferentes solos com e sem preparo de amostra (<i>dSi</i> d/ Solo com/sem-prep)..... | 51 |

Quadro 12. Produção de matéria seca (*mMS-PA*), teor total de Si (*ttSi-PA*) e conteúdo de Si da parte aérea (*cSi-PA*) de plantas de arroz em função das doses de Si (*dSi*) aplicadas.....55

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Difractometria de raios X representativa da fração argila natural para amostras dos solos (a) 1-PVd, (b) 2-LVAd1, (c) 3-Lae, (d) 4-LVAd2, (e) 5-LVe e (f) 6-CXd.33

Figura 2. Difractometria de raios X representativa da fração argila natural para amostras dos solos (g) 7-RLe, (h) 8-LVdf, (i) 9-LAd, (j) 10-LVj, (k) 11-LVAd3 e (l) 12-LVAh. 35

Figura 3. Teores de Si disponível (*tdSi*) pelos extratores (a) Cloreto de Cálcio (CaCl_2), (b) Ácido Acético (AA), (c) Carbonato de Amônio (CA) e (d) Mehlich-3 (M3). S1 = 1-PVd, S2 = 2-LVAd1, S3 = 3-Lae, S4 = 4-LVAd2, S5 = 5-LVe, S6 = 6-CXd, S7 = 7-RLe, S8 = 8-LVdf, S9 = 9-LAd, S10 = 10-LVj, S11 = 11-LVAd3 e S12 = 12-LVAh. pA-SCC= Amostras de solo em capacidade de campo; pA-SS = Amostras de solo seco. *, ** significativo a 5 e 1 %; ns não significativo até 5 %.53

Figura 4. Correlação linear simples entre o conteúdo de Si da parte aérea (*cSi-PA*) de plantas de arroz e o teor de Si disponível pelos extratores (a) Cloreto de Cálcio (*tdSi-CaCl₂*), (b) Ácido Acético (*tdSi-AA*), (c) Carbonato de Amônio (*tdSi-CA*) e (d) Mehlich-3 (*tdSi-M3*) em amostras úmidas (pA-SCC) dos solos com todas as doses de Si (*dSi*). *, ** significativo a 5 e 1 %.....57

Figura 5. Correlação linear simples entre o conteúdo de Si da parte aérea (*cSi-PA*) de plantas de arroz e o teor de Si disponível pelos extratores (a) Cloreto de Cálcio (*tdSi-CaCl₂*), (b) Ácido Acético (*tdSi-AA*), (c) Carbonato de Amônio (*tdSi-CA*) e (d) Mehlich-3 (*tdSi-M3*) em amostras secas (pA-SS) dos solos com todas as doses de Si (*dSi*). *, ** significativo a 5 e 1 %.....58

RESUMO

VEGA CUICHÁN, Cristian Mauricio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Avaliação de extratores para determinar a disponibilidade de Silício em diferentes solos brasileiros.** Orientador: Leonardus Vergütz. Coorientadores: Victor Hugo Álvarez Venegas e Fabrício Ávila Rodrigues.

O Si é um elemento não essencial para as plantas, porém considerado benéfico por seus efeitos positivos e desejáveis como aumento na produtividade e de tolerância a estresses abióticos e bióticos. No entanto, este elemento tem recebido pouca atenção por parte dos pesquisadores, o que acarreta em poucos estudos a respeito do seu comportamento e na sua baixa utilização na agricultura mundial. Parte desse problema se dá pela dinâmica complexa do elemento no sistema solo-solução. Prova desse baixo conhecimento é que ainda não existe extrator eficiente que permita quantificar a sua disponibilidade para as plantas, etapa fundamental para a correta recomendação da adubação silicatada. Sendo assim, foram desenvolvidos dois experimentos. O primeiro teve como objetivo estudar a influência dos ciclos de umedecimento e secagem nos teores de Si disponível no solo. Para isso, foram usados dois tipos de solo (camada de 0-20 cm) de características contrastantes. Os solos foram incubados com cinco doses de Si (0, 75, 150, 300 e 600 mg dm⁻³), umedecidos (80 % da capacidade de campo) e deixados em repouso por 96 horas até alcançarem o equilíbrio. Posteriormente foram reumedecidos e após 1, 12, 48, 96 e 144 h, os tratamentos foram amostrados e então o Si foi extraído. O segundo experimento teve por objetivos estudar a influência do modo de preparo da amostra de solo na dosagem de Si e avaliar a capacidade de diferentes extratores químicos para determinar a disponibilidade de Si em solos brasileiros e correlacioná-los com o conteúdo do elemento absorvido por uma planta indicadora (arroz, *Oriza sativa*). Para isso, foram avaliados 12 tipos de solos (camada de 0-20 cm) de características físicas, químicas e mineralógicas diferentes, dois preparos de amostras de solos (com umidade a 80 % da capacidade de campo e secas em estufa a 45 °C) e três doses de Si (0, 300 e 600 mg dm⁻³) em esquema fatorial 12x3x2, disposto em blocos casualizados (BC) com quatro repetições, totalizando 72 tratamentos e 288 unidades experimentais. Os extratores avaliados foram: ácido acético 0,5 mol L⁻¹, cloreto de cálcio 10 mmol L⁻¹, carbonato de amônio 9,6 g L⁻¹ e Mehlich-3. Os resultados mostraram que o processo de secagem e posterior reumedecimento levou à diminuição da recuperação de Si pelo

extrator, sugerindo que a disponibilidade parece estar mais relacionada à mineralogia da fração argila do solo. Assim mesmo, o preparo da amostra influenciou na dosagem de Si, porém estas diferenças aparentemente não afetaram a quantidade de Si disponível para a planta, já que foi justamente em amostras de solo secas que encontrou-se a melhor correlação entre os teores disponíveis de Si no solo e a recuperação pelas plantas. Quanto aos extratores, o cloreto de cálcio 10 mmol L^{-1} usado em amostras secas apresentou a melhor capacidade preditiva ($R^2 = 0,73$) entre o teor de Si disponível no solo e conteúdo de Si na planta. Sendo assim, este extrator poderia ser usado para estimar a biodisponibilidade de Si em solos brasileiros, seguindo a metodologia convencional de secagem da amostra para análise.

ABSTRACT

VEGA CUICHÁN, Cristian Mauricio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Evaluation of extractors to determine the availability of Silicon in different Brazilian soils.** Adviser: Leonardus Vergütz. Co-advisers: Victor Hugo Álvarez Venegas and Fabrício Ávila Rodrigues.

Si is a non-essential element for plants but considered beneficial because of its positive and desirable effects such as increased productivity and tolerance to abiotic and biotic stresses. However, this element has received little attention on the part of the researchers, which results in less studies about its behavior and its low use in the world agriculture. Part of this problem is due to the complex dynamics of the element in the soil-solution system. Proof of this low knowledge is that there is still no efficient extractor to quantify its availability to plants, a fundamental step for the correct recommendation of silicate fertilization. Thus, two experiments were developed. The first one had the objective of studying the influence of the wetting and drying cycles on soil Si contents. For this, two soil types (0-20 cm layer) of contrasting characteristics were used. Soils were incubated with five doses of Si (0, 75, 150, 300 and 600 mg dm⁻³), moistened (80% field capacity) and kept for 96 hours until it reaches apparent equilibrium. Subsequently they were re-moistened and after 1, 12, 48, 96 and 144 h, the treatments were sampled and then the Si was extracted. The second experiment had as objectives to study the influence of soil sample preparation on Si dosage and to evaluate the ability of different chemical extractors to evaluate the availability of Si in Brazilian soils and to correlate them with the content of the element absorbed by an indicator plant (rice, *Oriza sativa*). Twelve soil types (0-20 cm layer) of different physical, chemical and mineralogical characteristics were evaluated, two soil sample preparation (with humidity at 80% of the field capacity and drying in an oven at 45 °C) and three doses of Si (0, 300 and 600 mg dm⁻³) in a 12x3x2 factorial scheme, arranged in randomized complete block design (RCBD) with four replications, totaling 72 treatments and 288 experimental units. The extracts evaluated were acetic acid 0.5 mol L⁻¹, calcium chloride 10 mmol L⁻¹, ammonium carbonate 9.6 g L⁻¹ and Mehlich-3. The results showed that the drying process and subsequent re-moistened led to a decrease on the recovery of Si by the extractors, suggesting that the availability seems to be more related to the mineralogy of the soil clay fraction. Likewise, the preparation of the sample influenced

the dosage of Si, but these differences apparently did not affect the amount of Si available to the plant since it was precisely in dry soil samples that the best correlation was found between the available levels of Si in the soil and recovery by plants. As for the extractors, the calcium chloride 10 mmol L⁻¹ used in dry samples showed the best predictive capacity ($R^2 = 0.73$) between the Si content available in the soil and Si content in the plant. Thus, this extractor could be used to estimate Si bioavailability of Brazilian soils, following the conventional drying methodology of the sample for analysis.

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Além dos 17 elementos considerados essenciais, C, O, H, N, P, K, Ca, Mg, S, Cl, Mn, B, Zn, Fe, Cu, Ni e Mo (Kirkby, 2012), existem os denominados benéficos (Korndörfer, 2006; Dechen; Nachtigall, 2007; Rodrigues et al., 2011; Broadley et al., 2012), não essenciais (Prakash; Savant; Sonar, 2018), quase essências (Savant; Snyder; Dantnoff, 1997) ou funcionais (Asher, 1991), como o Si.

Esses elementos são assim chamados por não cumprirem os critérios de essencialidade, mas por acarretarem benefícios para algumas espécies de plantas sob condições específicas de crescimento. A ausência deles não impede as plantas de concluírem seu ciclo de vida, mas são capazes de promover diversos processos fisiológicos, sendo considerados importantes para seu crescimento e desenvolvimento podendo inclusive aumentar a produtividade das culturas (Lepsch, 2001; Furlani, 2004; Korndörfer, 2006; Kirkby, 2012; Korndörfer; Prakash; Savant; Sonar, 2018).

Apesar de não existir evidência da participação direta do Si no metabolismo das plantas e da sua participação em compostos orgânicos (Takahashi; Ma; Miyake, 1990; Ma; Takahashi, 2002; Neumann; de Figueiredo, 2002; Richmond; Sussman, 2003;), o Si é quantitativamente muito importante em solos e plantas apresentando um ciclo biogeoquímico de dinâmica complexa (Tubaña; Babu; Datnoff, 2016).

Seu adequado fornecimento apresenta efeitos benéficos como aumento de produtividade e tolerância das plantas contra estresses bióticos e abióticos (Ma; Miyake; Takahashi, 2001; Richmond; Sussman, 2003). Plantas com adequados teores de Si são mais resistentes ao ataque de pragas e doenças, estresses hídrico, térmico, salino e excesso de metais (Fe, Mn, Al e Na), além de apresentar maior eficiência de uso da água, melhor estrutura e arquitetura da planta e aumento no aproveitamento do P especialmente em solos muito intemperizados (van Raij; Camargo, 1973; Yoshida, 1975; Korndörfer, 2006; Rodrigues et al., 2011; Haynes, 2014; Crusciol et al., 2018; Prakash; Savant; Sonar, 2018;). Com relação aos estresses bióticos, esses benefícios são atribuídos principalmente à deposição do Si nas células dos diferentes órgãos das plantas funcionando como barreiras fisiológicas (Ma, 2015).

Embora a fertilização com Si tenha aumentado em alguns países (Tubaña; Babu; Datnoff, 2016), o Si continua sendo um elemento pouco estudado na agricultura mundial (Epstein, 1999, 2001; Sommer et al., 2006; Prakash; Savant; Sonar, 2018). Apesar da vasta literatura mostrando sua importância, às vezes ainda é considerado sem um rol importante nos processos químicos e biológicos (Matichenkov; Calvert, 2002) especialmente no solo, embora suas interações sejam complexas (Nascimento; Cunha; Rodrigues, 2009).

Com o aumento do uso de fertilizantes silicatados, surge a necessidade de desenvolver extratores confiáveis para a avaliação da disponibilidade deste elemento no solo, fator primordial para realizar o correto manejo da adubação silicatada (Camargo et al., 2005). Neste contexto, vários extratores químicos têm sido estudados, mas nenhum tem-se mostrado eficiente (Korndörfer et al., 1999; Meyer; Keeping, 2001; Gutierrez; Inocêncio; Novelino, 2011; Crusciol et al., 2018).

Essa situação é ainda pior em países de clima tropical, incluindo o Brasil, onde existe menos informação a respeito da ciclagem biogeoquímica do Si e sobre a avaliação da disponibilidade desse elemento no solo (Savant; Snyder; Dantnoff, 1997; Abe; Yamasaki; Wakatsuki, 2016; Crooks; Prentice, 2017). O conhecimento da sua dinâmica na solução do solo é fundamental, uma vez que o Si nesta fase dita a disponibilidade do mesmo para as plantas (Jones; Handreck, 1965).

Além disso, o entendimento mais claro sobre este elemento é essencial para a compreensão de fenômenos pedogenéticos, visto que a remoção do Si do perfil é um dos principais aspectos do intemperismo químico dos solos (van Raij; Camargo, 1973; Korndörfer et al., 1999).

Portanto, para realizar o correto manejo do Si em sistemas agrícolas brasileiros é imperativo conhecer a sua real disponibilidade nos solos. Para isso são precisos extratores eficientes, padronização das técnicas de quantificação em solução e adequado preparo das amostras de solo.

Neste sentido, formulou-se a hipótese de que existe correlação entre a disponibilidade de elemento para as plantas em solos brasileiros e a quantidade extraída por algum dos extratores químicos testados e que o preparo da amostra de solo influencia na determinação da disponibilidade de Si no solo.

Assim, os objetivos do trabalho foram: a) estudar a influência dos ciclos de umedecimento e secagem nos teores de Si disponível no solo b) avaliar a influência do modo de preparo da amostra de solo na extração pelos extratores químicos; c) determinar o teor de Si disponível extraído dos solos por meio dos extratores avaliados; d) determinar o conteúdo na planta e e) correlacionar o teor de Si disponível no solo obtido através de diferentes extratores e o conteúdo do elemento absorvido pelo arroz (*Oriza sativa*), tido como planta indicadora, para escolher os extratores mais eficientes.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O Si é considerado um elemento não essencial muito importante no solo e planta por benefícios como aumento da produtividade e melhor resistência a estresses bióticos e abióticos (Broadley et al., 2012). Outros exemplos destes elementos são: Co (Barker; Pilbeam., 2007), Na (Korndörfer, 2006) e Se (Furlani, 2004; Dechen; Nachtigall, 2007).

É o segundo elemento químico mais abundante, depois do O, ocorrendo em cerca de 28 % da crosta terrestre (Korndörfer, 2006; Tubaña; Babu; Datnoff, 2016). Faz parte de mais de 370 minerais formadores de rocha (Sommer et al., 2006), mas não é encontrado na natureza de forma livre como cátion tetravalente em solução, estando sempre ligado com outros elementos (Richmond; Sussman, 2003). Encontra-se predominantemente em minerais primários e aluminossilicatos secundários combinando-se com Al, Mg, Ca, Na K ou Fe e óxidos de Fe e Al (Dechen; Nachtigall, 2007; Mello; Pérez, 2009).

Além disso, é componente quantitativamente importante do sistema solo-planta (Epstein, 2001) e reconhecido como essencial para algumas diatomáceas, membros das algas amarelas ou douradas e membros das famílias Chrysophyceae e Equisitaceae (Epstein, 1999).

2.1 Silício no solo

No solo o teor de Si total pode variar desde 10 a 450 g kg⁻¹ (Nascimento; Cunha; Rodrigues, 2009), enquanto a concentração do elemento na solução varia de menos de 1 até 100 mg L⁻¹ de SiO₂ (Raven, 1983; Camargo et al., 2005), equivalente a 0,47 até 46,74 mg L⁻¹ de Si. Esses valores tendem a ser menores em solos básicos e em solos com grandes quantidades de óxidos de Fe e Al, quando a adsorção de ânions é elevada (Jones; Handreck, 1965; Broadley et al., 2012).

É por isto que a mineralogia (Beckwith; Reeve, 1963; van Raij; Camargo, 1973), textura (van Raij; Camargo, 1973; Meyer; Keeping, 2001; Camargo et al., 2005) e pH

(Beckwith; Reeve, 1963; van Raij; Camargo, 1973) influenciam nas concentrações de Si na solução do solo.

Sob condições de alta precipitação, comuns em regiões tropicais e subtropicais, os silicatos menos resistentes ao intemperismo liberam este elemento que é rapidamente lixiviado (Korndörfer; Lepsch, 2001), o que faz com que estes solos apresentem baixos teores de Si na solução se comparados com solos de regiões onde as condições climáticas favorecem um intemperismo menos intenso. Assim, em Latossolos ácricos e Argissolos que sofreram intensa dessilicatização e Organossolos com altos teores de matéria orgânica a disponibilidade de Si é muito baixa (Snyder; Jones; Gascho, 1986; Savant; Snyder; Dantnoff, 1997; Pereira et al., 2003; Tubaña; Heckman, 2015).

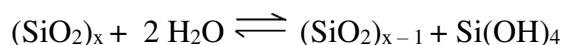
Cornelis et al. (2011) indicam que a liberação de Si pela intemperização de minerais é influenciada principalmente pela precipitação e neoformação de minerais, fenômenos de sorção em fases sólidas, preservação das formas estáveis no perfil, adição pelas chuvas e absorção pelos microrganismos e vegetais. Adicionalmente, frações de minerais primários e secundários, reações que ocorrem nas superfícies minerais, além dos processos que acontecem na rizosfera, são fatores que contribuem para esta disponibilidade (Tubaña; Babu; Datnoff, 2016).

A formação de minerais secundários contendo Si no solo é fortemente influenciada pela sua atividade na solução, que depende tanto do material de origem como do clima, principalmente água e temperatura (Cornelis et al., 2011), pH e presença de cátions e compostos orgânicos em solução (Gérard; François; Ranger, 2002; Sommer et al., 2006; Cornelis et al., 2011).

No solo, o Si encontra-se em diferentes fases: líquida, adsorvida e sólida (Matichenkov; Bocharnikova, 2001) sendo as principais formas: a) Si solúvel presente na solução e prontamente disponível (Crusciol et al., 2018), b) Si adsorvido ou precipitado com óxidos de ferro (Fe_2O_3), de alumínio (Al_2O_3) (Crusciol et al., 2018), de manganês (Mckeague; Cline, 1963a) e carbonatos (Sommer et al., 2006), c) Si estrutural como componente de minerais silicatados cristalinos ou amorfos (Korndörfer, 2006; Sommer et al., 2006; Haynes, 2014), d) várias formas de SiO_2 como SiO_2 -amorfo, SiO_2 -solo e SiO_2 -quartzo (Mello; Pérez, 2009) e d) sílica biogênica originada da decomposição da matéria orgânica do solo (MOS) e constituída por formas amorfas ou

poliméricas de Si (Korndörfer, 2006). Além disso, encontra-se em águas naturais e na atmosfera (Dechen; Nachtigall, 2007).

Todos os minerais sofrem intemperismo físico, químico e biológico, levando à dissolução de sílica na solução do solo que envolve reações de hidratação e desidratação catalisadas por íons OH⁻ segundo a reação (Iler, 1979):

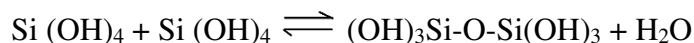


Esta reação faz que o Si seja liberado para a solução do solo principalmente em forma de ácido monossilícico (H₄SiO₄) ou [Si(OH)₄], também chamado de ácido ortossilícico (todos os O₂ fazendo uma ligação simples com o elemento) (Snyder, 2001). Esta é uma molécula monomérica, não carregada, contendo somente um Si (van Raij; Camargo, 1973; Iler, 1979; Ma; Miyake; Takahashi, 2001) que é coordenado com quatro átomos de O (Iler, 1979).

O ácido monossilícico influi diretamente na concentração na fase líquida que, por saída de água, pode formar polímeros chamados de ácidos polissilícicos, que estão formados de tetraedros com ligações Si-O-Si formando sílica dimérica [Si₂O₃(OH)₄²⁻], trimérica [Si₃O₅(OH)₅³⁻], tetramérica [Si₄O₈(OH)₄⁴⁻] e assim por diante (Dietzel, 2002; Nascimento; Cunha; Rodrigues, 2009) e que não são absorvíveis pelas plantas (Snyder, 2001).

Assim mesmo, aplicações de doses maiores de 100 mg dm⁻³ de Si no solo promovem mudanças na coordenação do Si de quatro para seis originando a sua polimerização e posterior formação de complexos insolúveis (Dietzel, 2002; Paim et al., 2006).

A solubilidade dos ácidos polissilícicos vai diminuindo com o aumento do comprimento da cadeia, de acordo com a equação sugerida por Mengel e Kirkby (2001):



Estas formas polimerizadas se depositam e ligam às partículas do solo criando pontes de sílica que melhoram a agregação do solo e a capacidade de retenção de água (Norton, 1993).

Além da polimerização no solo, o ácido monossilícico dissolvido pode sofrer dissociação ou precipitação. Fatores como pH, sua concentração na solução e presença de óxidos de Al e Fe influenciam nestes processos (Korndörfer, 2006).

A fonte mais simples de ácido monossilícico é o quartzo (SiO_2) que reage com a água ($\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_4\text{SiO}_4$), mas que não controla o Si na solução do solo por ter uma baixa solubilidade (Epstein, 2001) mantendo valores de $0,1 \text{ mmol L}^{-1}$ (Mello; Pérez, 2009). Portanto, a fração areia de solos intemperizados, constituída em grande parte por quartzo, apresenta baixo potencial de liberação de Si (Korndörfer, 2006).

Por isto, a maior contribuição do solo vem do Si amorfo ou sílica biogênica (amorfa) com solubilidade de $1,82 \text{ mmol L}^{-1}$ (Mello; Pérez, 2009) e que contribui significativamente para a sua presença em solução, apresentando solubilidade 17 vezes maior que o quartzo (Tubaña; Babu; Datnoff, 2016).

Outras fontes de ácido monossilícico são a dissociação de ácidos polissilícicos, desorção de Si dos óxidos e hidróxidos de Fe e Al, dissolução de minerais cristalinos e não cristalinos, adição de fertilizantes silicatados, água de irrigação e decomposição e ciclagem dos resíduos vegetais que provavelmente é a maior e principal fonte de ácido monossilícico em solos mais intemperizados (Korndörfer, 2006; Nascimento; Cunha; Rodrigues, 2009).

A principal espécie química do Si presente em condições de pH abaixo de 9 é o ácido monossilícico, sendo a espécie predominante na faixa normal de variação do pH dos solos tropicais. A valores de pH entre 2 e 9 a solubilidade é constante (Cornelis et al., 2011), mas em valores de pH mais elevados o ácido monossilícico dissocia-se formando o íon silicato H_3SiO_4^- ($\text{H}_4\text{SiO}_4 = \text{H}_3\text{SiO}_4^- + \text{H}^+$) e outras espécies iônicas que contribuem de forma significativa para o Si em solução (Jones; Handreck, 1965; Ma; Miyake; Takahashi, 2001; Mengel; Kirkby, 2001; Mello; Pérez, 2009).

Na solução do solo, a forma monomérica é estável por longos períodos de tempo a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ em concentrações menores que 2 mmol L^{-1} , equivalente a 56 mg L^{-1} (Iler, 1979; Karathanasis, 2002). Porém, polimeriza-se rapidamente quando essa concentração é excedida (Matichenkov; Ammosova, 1994), formando primeiro ácidos polissilícicos de baixo peso molecular e posteriormente espécies poliméricas maiores já reconhecidas como partículas coloidais.

O ácido monossilícico reage rapidamente com ácido molíbdico para formar o ácido silicomolíbdico, de coloração amarelada e inerte em solução neutra. Em concentrações menores às da saturação da sílica amorfa, as espécies iônicas formadas a

pH > 9 ($(\text{HO})_3\text{SiO}^-$ e $(\text{HO})_2\text{SiO}_2^-$) combinam-se facilmente com íons metálicos diminuindo sua disponibilidade e em presença de HF é convertido em ácido hexafluorossilícico (H_2SiF_6) (Iler, 1979; Matichenkov; Ammosova, 1994).

Em solos ácidos, o ácido monossilícico encontra-se na forma molecular não dissociada (Korndörfer, 2006) comportando-se, na solução do solo, como um ácido fraco ionizando-se apenas 2 mg L^{-1} na espécie iônica $\text{SiO}(\text{OH})_3^-$ a pH 7 (Iler, 1979).

Korndörfer (2006) cita que além do pH, sua disponibilidade é também afetada pela temperatura, teor de matéria orgânica e concentração na solução do solo. Os principais drenos do ácido monossilícico são: precipitação, polimerização, adsorção, lixiviação e absorção pelas plantas (Korndörfer, 2006; Nascimento; Cunha; Rodrigues, 2009).

2.2 Silício na planta

O Si é absorvido pelas plantas principalmente na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) (Jones; Handreck, 1965; Korndörfer, 2006; Cornelis et al., 2011; Rodrigues et al., 2011; Broadley et al., 2012; Ma, 2015) em concentrações de 0,1 a $0,6 \text{ mmol L}^{-1}$ ($2,8$ a $16,8 \text{ mg L}^{-1}$) (Nascimento; Cunha; Rodrigues, 2009) e com amplas variações entre as diferentes espécies e genótipos (Neumann; de Figueiredo, 2002). Em menor quantidade e a pH > 9 pode ser absorvida a forma iônica $\text{SiO}(\text{OH})_3^-$ (Epstein, 1994; Yoshida, 1975).

O Si é transportado do solo até as raízes principalmente por fluxo de massa, sobretudo em solos temperados (Dayanandan; Kaufman; Franklin, 1983) e pode ser absorvido rapidamente por gramíneas ou lentamente como ocorre na maioria das dicotiledôneas (Korndörfer, 2006).

Mitani e Ma (2005) e Cornelis et al. (2011) denominam a absorção rápida como ativa e a lenta como passiva, além de mencionar também a absorção restrita que é caracterizada por uma baixa absorção por algumas plantas, o que implica na acumulação de H_4SiO_4 na solução do solo.

Dentro da planta, o ácido monossilícico é muito pouco móvel e, pela ausência de cargas elétricas, sua absorção poderia ser de natureza não seletiva e altamente passiva

(Korndörfer; Pereira; Camargo, 2002), embora Ma e Takahashi (2002) e Rodrigues et al. (2011) indiquem que também pode ser ativa através de transportadores (proteínas) de membrana específicos, como no caso das espécies das famílias Poaceae, Equisetaceae e Cyperaceae.

As divergências de opinião em relação à absorção do Si podem resultar de aspectos como a variada relação do elemento com as diferentes espécies vegetais. Assim, enquanto em plantas superiores estão envolvidos mecanismos mais complexos para permitir o transporte adicional de longa distância entre tecidos e compartimentos especializados das raízes para os estômatos, nas diatomáceas unicelulares o transporte é menos complexo (Richmond; Sussman, 2003). Isto indica a necessidade de estudos mais detalhados para entender a complexa relação entre a transpiração que favorece a sua translocação e a sua influência na regulação do mecanismo de captação (Richmond; Sussman, 2003).

Mesmo assim, acredita-se que o movimento do Si desde as raízes até a parte aérea da planta é feito no mesmo sentido do fluxo de água (movimento ascendente) apenas pelo xilema (Mengel; Kirkby, 2001), sendo dependente da transpiração (Jones; Handreck, 1965; Motomura; Mita; Suzuki, 2002; Korndörfer, 2006; Snyder; Matichenko; Datnoff, 2007; Guntzer; Keller; Meunier, 2012;).

No xilema, o Si ainda continua como ácido monossilícico (Jones; Handreck, 1965; Casey et al., 2004; Mitani; Ma, 2005), porém, com a perda de água devido à transpiração, vai se concentrando e polimerizando. Quando a sua concentração excede 2 mmol L^{-1} a $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, começa a formação de ácido polissilícico e, com a evolução da polimerização, vai sendo precipitado e depositado como sílica amorfa hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), virtualmente a única forma do elemento nas plantas (Ding et al., 2009) também conhecida como opala biogênica, sílica gel ou fitólitos (Balasta et al., 1988; Epstein, 1999, 2001; Richmond; Sussman, 2003; Guntzer; Keller; Meunier, 2012).

No solo, os fitólitos podem ser usados na interpretação da gênese do solo, determinando a idade dos horizontes ou camadas de sedimentos através do C ocluso neles que é preservado por muito tempo (Costa et al., 2010).

A sílica amorfa hidratada é encontrada principalmente em células (citoplasma e vacúolos) das paredes celulares da epiderme dos sítios de maior transpiração. Mas

também pode ser encontrada em lúmens celulares, tricomas, espaços intracelulares, sistema vascular e endodermis de raízes, caules, folhas e órgãos reprodutivos, fortalecendo desta forma a estrutura da planta aumentando sua resistência ao acamamento e ataque de pragas e doenças e diminuindo a transpiração (Savant; Snyder; Dantnoff, 1997; Ma; Miyake; Takahashi, 2001; Korndörfer; Pereira; Camargo, 2002; Richmond; Sussman, 2003; Cornelis et al., 2011; Rodrigues et al., 2011).

Segundo Raven (1983) e Korndörfer (2006) depois que o elemento é depositado não se distribui mais no interior da planta, tornando-se praticamente imóvel. Por isto, geralmente as folhas mais velhas são mais ricas em Si do que as mais novas (Mengel; Kirkby, 2001; Henriot et al., 2006). Finalmente retorna ao solo através da queda das partes da planta que não são colhidas continuando seu ciclo biogeoquímico (Guntzer; Keller; Meunier, 2012).

O teor de Si nas plantas, em peso seco, varia de 1 a 100 g kg⁻¹ (Epstein, 1994, 1999; Ma; Miyake; Takahashi, 2001; Ma; Takahashi, 2002), sendo elas classificadas como: acumuladoras, intermediárias e não acumuladoras de Si.

Plantas acumuladoras são definidas como aquelas que acumulam mais de 10 g kg⁻¹ de Si na sua matéria seca e mostram uma relação molar Si/Ca superior a 1. Plantas intermediárias contêm 5 - 10 g kg⁻¹ ou superior a 10 g kg⁻¹ de Si, mas com relação molar Si/Ca menor do que 1. Já as plantas tidas como não acumuladoras são aquelas que contêm menos de 5 g kg⁻¹ de Si (Ma; Miyake; Takahashi, 2001; Tubaña; Babu; Datnoff, 2016).

A maioria de plantas acumuladoras de Si são monocotiledôneas, as intermediárias são a maioria de dicotiledôneas, entanto que algumas destas e as leguminosas são consideradas não acumuladoras (Ma; Miyake; Takahashi, 2001; Ma; Takahashi, 2002; Cornelis et al., 2011).

É importante mencionar que o Si é o único elemento que não prejudica as plantas quando está acumulado em excesso. Isso devido às suas propriedades de indissociação no pH fisiológico e polimerização, além de não ter ligação com substâncias celulares nem a criação de alta pressão osmótica na planta (Ma; Miyake; Takahashi, 2001).

A sua absorção e transporte geralmente interage com a absorção e o transporte de outros elementos, sendo relevantes as interações em que o Si interfere com a absorção

ou particionamento dentro da planta dos elementos presentes no solo em concentrações suficientemente altas para prejudicá-la (Epstein, 2001). Diversas evidências demonstram que os efeitos negativos causados por toxicidades de Al e outros íons metálicos (comuns em solos ácidos, muito intemperizados e desilicatados) são mitigados pelo Si (Corrales; Poschenrieder; Barceló, 1997; Cocker; Evans; Hodson, 1998; Haynes, 2017).

Outro benefício do uso do elemento é aumento do aproveitamento do P, especialmente em solos de regiões tropicais geralmente com avançado grau de intemperismo. No Brasil, Gutierrez, Inocêncio e Novelino (2011), trabalhando com um Latossolo Vermelho distroférico, determinaram um maior aproveitamento de P quando plantas de milho foram cultivadas com doses crescentes de P com presença e ausência de adubação silicatada. Neste contexto, Ma, Miyake e Takahashi (2001) mencionam que como o P encontra-se na solução do solo em forma aniônica (H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} principalmente), o ânion silicato compete pelos sítios de adsorção carregados positivamente na fase sólida do solo aumentando a disponibilidade do P. Além disso, estudos mais recentes mostraram que uma maior absorção de Si ativa genes na planta que permitem um melhor aproveitamento do macronutriente (Ma, 2015).

Em solos salinos e sódicos, conhecidos também como solos halomórficos e caracterizados por conter teores elevados de sais solúveis, Na trocável, ou ambos (Ribeiro; Barros; Freire, 2009), o Si pode minimizar ou retardar a absorção do Na pelas plantas (Liang, 1999; Yeo et al., 1999).

Assim, o Si tem efeitos benéficos no crescimento de várias culturas, principalmente cana de açúcar e arroz, além de outros cereais como trigo e cevada, frutas e vegetais (Prakash; Savant; Sonar, 2018). Porém, estes efeitos não têm sido observados em todas as culturas (Ma; Miyake; Takahashi, 2001).

2.3 Uso de Silício como fertilizante

Entre os vários insumos agrícolas, os fertilizantes são parte integral das estratégias para uma máxima produção agrícola e nos anos recentes mais de 50 % do aumento da produção agrícola pode ser atribuído ao uso destes insumos (Prakash; Savant; Sonar, 2018).

Savant, Snyder e Dantnoff (1997) já faziam referência que na produção agrícola mundial eram extraídas entre 210 e 224 Mt de Si em solos que por diversas razões como dessilicatização acelerada, polimerização do elemento, degradação e perda da matéria orgânica do solo, aumento da erosão, diminuição da população microbiana entre outras, ou contem oferta inadequada ou são naturalmente baixos em Si disponível para as plantas. Estes fatos fazem com que as culturas, sob certas condições climáticas, respondam positivamente à adubação silicatada (Prakash; Savant; Sonar, 2018).

O Si como fertilizante tem sido utilizado em vários países, sendo cada vez mais comum seu uso nos diferentes sistemas produtivos ao redor do mundo (Tubaña; Babu; Datnoff, 2016). Os fertilizantes silicatados podem influenciar nas culturas de duas formas, incluindo a melhoria das propriedades químicas e fertilidade do solo e sobre o crescimento e desenvolvimento vegetal (Matichenkov; Calvert, 2002).

Rússia, Estados Unidos da América, alguns países do sudeste asiático e mais recentemente Brasil, Austrália e a África do Sul, vêm usando com sucesso fertilizantes silicatados pelos efeitos positivos à aplicação deste elemento para a produção comercial de diferentes culturas (Ma; Miyake; Takahashi, 2001; Matichenkov; Bocharnikova; Calvert, 2001; Rodrigues et al., 2011), especialmente arroz (*Oriza sativa*) e cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*).

Neste contexto, Rodrigues et al. (2011) mencionam que o Si como fertilizante está sendo usado na cultura do arroz há seis décadas no Japão. Assim mesmo, nos Estados Unidos além da cultura do arroz, são usadas adubações silicatadas na cultura da cana-de-açúcar. Nesse país, só no estado da Florida são aplicadas anualmente mais de 0,15 Mt de silicato de cálcio (produto da indústria siderúrgica e da produção de fósforo elementar). No caso do Brasil, foi incluído na Legislação Brasileira de Fertilizantes como um nutriente benéfico para as culturas (Brasil, 2004).

As fontes mais usadas são a wollastonita (CaSiO_3), escórias da siderurgia e resíduos das culturas, principalmente de arroz, que contém grandes quantidades de fitólitos que são uma fonte de Si disponível (Guntzer; Keller; Meunier, 2012). Esta palha ao ser reciclada e usada como fertilizante pode apresentar melhores resultados em termos de concentração do elemento na planta (Hossain; Horiuchi; Miyagawa, 2001). Segundo Haynes (2014) as respostas positivas às adubações ocorrem particularmente em

solos contendo baixas concentrações do elemento em solução, incluindo Latossolos, Nitossolos e Organossolos. Além disso, pelo contínuo processo de perda (lixiviação) conhecido como dessilicatização, cultivos intensivos com culturas de alto rendimento, a pouca ciclagem dos subprodutos que não são devolvidos para os campos e o uso de fertilizantes com menos impurezas do elemento, os solos subtropicais e tropicais são geralmente baixos em Si disponível para a planta e são beneficiados com a fertilização silicatada (Korndörfer; Lepsch, 2001; Meyer; Keeping, 2001; Korndörfer; Pereira; Camargo, 2002).

Pelo exposto, a aplicação de fertilizantes silicatados influencia de forma direta melhorando o crescimento das plantas, assim como otimizando a fertilidade do solo melhorando as suas propriedades físicas e químicas mantendo os nutrientes na forma disponível (Matichenkov; Bocharnikova; Calvert, 2001).

2.4 Extratores de Silício

A extração de Si do solo tem sido realizada tanto com ácidos como com bases fortes (Gibson, 1994), sendo de modo geral as soluções ácidas as mais eficientes (Camargo et al., 2005). Assim, Tubaña e Heckman (2015) indicam que os extratores mais adequados para a extração de Si disponível incluem principalmente água, CaCl_2 e ácido acético, embora outros extratores como o tampão de acetato (Abe; Yamasaki; Wakatsuki, 2016) e método de incubação anaeróbio (Tsujimoto et al., 2014) também tenham sido sugeridos. Iler (1979) indica que o ácido monossilícico não pode ser extraído por ácidos orgânicos neutros.

Os extratores podem determinar parte do elemento no solo (por exemplo, Si disponível) ou seu teor total. Segundo Snyder (2001) o método clássico para determinar o teor total de Si de vários materiais tem sido a conversão de silicatos insolúveis em silicato de sódio pela fusão de alta temperatura com hidróxido de sódio ou outras bases sódicas. O elemento pode então ser dosado por diferentes métodos incluindo gravimetria, colorimetria e espectrometria de absorção/emissão. Prakash, Savant e Sonar (2018) citam que sua análise, com espectrometria de absorção atômica ou técnicas

colorimétricas, requer que o Si esteja em solução quando análises de formas solúveis ou extraíveis são feitas.

Os métodos de extração usados variam dependendo da região do mundo. Desta forma, por exemplo, no Japão são usados métodos como a solução tampão de acetato de amônio a pH 4 (Imaizumi; Yoshida, 1958) e o método de incubação anaeróbica (Nonaka; Takahashi, 1988). Mesmo assim, Ma e Takahashi (2002) referem que para a cultura de arroz desse país, sempre houve uma necessidade contínua de métodos para avaliar a quantidade de Si disponível, tanto na planta como no solo, para realizar adubações adequadas que evitem sua deficiência.

Nos Estados Unidos é usado o ácido acético $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (Snyder, 2001) e na Austrália se trabalha com CaCl_2 10 mmol L^{-1} (Crooks; Prentice, 2017). No caso do Brasil, os mais utilizados são o ácido acético (Korndörfer et al., 1999) e o cloreto de cálcio (Korndörfer; Pereira; Nolla, 2004).

A água também é um extrator utilizado para avaliar a disponibilidade de Si. Porém, a concentração de Si em extratos de água varia com o tempo de contato, pH e temperatura (McKeague; Cline, 1963b).

No Brasil, a análise de Si disponível no solo não é feita rotineiramente pela dificuldade de contar com métodos que o avaliem adequadamente (Korndörfer et al., 1999; Gutierrez; Inocêncio; Novelino, 2011; Crusciol et al., 2018), sendo que esta determinação é fundamental para estudos de gênese dos solos e também para adequada recomendação da adubação silicatada (McKeague; Cline, 1963b; Camargo et al., 2005).

Assim mesmo, as análises de Si disponível em fertilizantes e corretivos não é normalmente feita no país, o que dificulta o uso de fontes confiáveis tanto nas pesquisas como na produção agrícola (Pereira et al., 2003). O método HCl $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ tem sido usado para a avaliação do elemento disponível em escórias (Snyder, 2001; Pereira et al., 2003), assim como resina trocadora de ânions para fertilizantes silicatados (Kato; Owa, 1997). Neste sentido, Pereira et al. (2003) avaliando diversos extratores como água, HCl , Na_2CO_3 , $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NH}_4\text{NO}_3$, ácido cítrico, ácido acético, resina trocadora de cátions e coluna de lixiviação, encontraram que o extrator $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NH}_4\text{NO}_3$ e resina trocadora de cátions podem ser usados na estimativa de Si disponível para as plantas em escórias e fertilizantes.

Nos Estados Unidos, o método oficial de extração de Si solúvel em fertilizantes é $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-NH}_4\text{NO}_3$ com contato solo – extrator por 5 d. O método é aplicável à detecção do elemento solúvel em produtos fertilizantes não líquidos, produtos misturados e substâncias benéficas em concentrações de Si de 2,0 a 84 g L⁻¹, com um limite de detecção de 0,6 g L⁻¹ e um limite de quantificação de 2,0 g L⁻¹ (Sebastian et al., 2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização dos solos

3.1.1 Caracterização física

Na caracterização física dos solos foi determinada a densidade de partículas (D_p), densidade do solo (D_s), equivalente de umidade (EU) e análise granulométrica.

A D_p foi determinada usando o método do balão volumétrico seguindo a metodologia sugerida pela EMBRAPA (2017). As amostras dos solos foram destorroadas, passadas em peneiras de 2 mm, homogeneizadas e colocadas para secagem em estufa a 105 °C durante 48 h para obter terra fina seca em estufa (TFSE). Após, foram transferidos 20 g de cada solo para balões volumétricos de 50 mL e foi adicionado álcool etílico até cobrir as amostras, as quais foram agitadas cuidadosamente para eliminar as bolhas. As amostras foram deixadas por 30 min em repouso, mas com pequena agitação periódica para eliminar possíveis bolhas de ar remanescente. Finalmente, foram completados os volumes dos balões e se registrou o volume total de álcool gasto. O cálculo da D_p foi feito usando a fórmula:

$$D_p = \frac{M_s}{V_s} = \frac{M_s}{V_B - V_G}$$

em que,

M_s = Massa de solo, em g

V_s = Volume das partículas do solo, em cm^3

V_B = Volume do balão, em mL

V_G = Volume de álcool gasto, em mL

A D_s foi determinada pelo método da proveta seguindo a metodologia sugerida pela EMBRAPA (2017). Em uma proveta de 100 mL e peso conhecido, foram acrescentados aproximadamente 30-35 cm^3 de terra fina seca ao ar (TFSA) deixando-os cair de uma só vez. Seguidamente, a proveta foi batida dez vezes sobre uma superfície de borracha com distância de queda de aproximadamente 5 cm para compactar o solo. Repetiu-se esta operação por mais duas vezes até que o nível da amostra ficou nivelado

com o traço do aferimento da proveta e foi pesado o conjunto (proveta + solo). O cálculo da Dp foi feito usando a fórmula:

$$D_s = \frac{M_s}{V_T} = \frac{[M_{(TFSA + Proveta)} - M_{Proveta}] \frac{1}{f}}{V_{Proveta}}$$

em que,

M_s = Massa de solo, em g

V_T = Volume total do solo, em cm^3

$V_{proveta}$ = Volume da proveta, em mL

$M_{proveta}$ = Massa da proveta, em g

M_{TFSA} = Massa de terra fina seca ao ar, em g

f = fator usado para a correção dos resultados de análises de solo feitas em TFSA para expressá-los em TFSE

Para o EU foi usada a metodologia sugerida por Cassel e Nielsen (1986). Caixas de metal específicas que possuíam uma tela de arame em uma extremidade para retirar água da amostra foram recobertas com papel filtro. Seguidamente, foi adicionada uma camada de TFSA de cada solo de aproximadamente 1 cm de espessura e saturou-se as amostras por 6 h. Após esse período, as caixas foram colocadas em uma centrífuga específica para determinar EU por 30 min a 2440 rpm, equivalente a um valor de potencial de -33 kPa. Decorrido este tempo, cada amostra foi transferida para um recipiente de peso conhecido, o conjunto foi pesado e as amostras levadas para estufa a 105 °C durante 48 h. Finalmente, as amostras foram retiradas, colocadas em um dessecador até atingir a temperatura ambiente e pesadas novamente. O cálculo do EU foi feito usando a fórmula:

$$EU = \frac{M_A}{M_S} = \frac{[M_{(Recipiente + TFSA + \text{Água})} - M_{(Recipiente + TFSA)}]}{M_{(Recipiente + TFSA)} - M_{Recipiente}}$$

em que,

M_A = Massa de água, em g

M_S = Massa de solo, em g

$M_{Recipiente}$ = Massa do recipiente, em g

M_{TFSA} = Massa de terra fina seca ao ar, em g

Para a análise granulométrica foi seguida a metodologia sugerida pela EMBRAPA (2012). Foram adicionados 10 g de TFSA de cada solo em garrafas de 500 mL e acrescentou-se 50 mL de solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹ com posterior repouso por 6 h. Decorrido esse tempo, as amostras foram agitadas durante 16 h a 50 rpm e a suspensão foi transferida para uma proveta de 500 mL através de peneira de malha de 0,053 mm, forçando a passagem do material composto por silte + argila com jatos de água usando uma pisseta. Completou-se o volume da proveta até o aferimento, agitou-se a suspensão durante 20 s e coletou-se imediatamente 25 mL que foram colocados em béqueres de 50 mL (de peso conhecido) e levados à estufa a 105 °C durante 48 h. Finalmente, as amostras foram colocadas em um dessecador até atingir a temperatura ambiente e depois foram pesadas.

Adicionalmente, determinou-se a temperatura da suspensão remanescente (475 mL) e, por meio da Lei de Stokes, calculou-se o tempo de sedimentação do silte nos 5 cm superiores da proveta utilizando o valor da densidade de partículas determinada previamente para cada solo. Agitou-se a suspensão durante 20 s com um bastão e foi deixada em repouso de acordo com o tempo de sedimentação de cada solo. Decorrido o tempo, introduziu-se uma pipeta aferida de 25 mL até a profundidade de 5 cm e foi coletada a suspensão contendo só argila, a qual foi transferida para um béquer de 50 mL de peso conhecido e levada à estufa a 105 °C durante 48 h. Finalmente as amostras foram colocadas em um dessecador até atingir temperatura ambiente e foram pesadas.

Para completar a análise, com auxílio de jatos de água, passou-se o material retido na peneira de malha de 0,053 mm (areia) através de peneira de malha de 0,210 mm separando a areia grossa (2,00-0,210 mm) da areia fina (0,210-0,053 mm). Transferiu-se cada uma dessas frações para béqueres (de peso conhecido) que foram deixados em estufa a 105 °C durante 48 h. Decorrido o tempo, as amostras foram retiradas e colocadas em um dessecador até atingir temperatura ambiente, para finalmente serem pesadas. Os cálculos da análise granulométrica foram feitos usando as seguintes fórmulas:

$$X_{AG} = M_{AG} \frac{1}{M_{TFSA}} f$$

$$X_{AF} = M_{AF} \frac{1}{M_{TFSA}} f$$

$$X_{(S + Arg)} = [M_{(S + Arg + D)} - M_D] \frac{V_T}{V_C} \frac{1}{M_{TFSA}} f$$

$$X_{Arg} = [M_{(Arg + D)} - M_D] \frac{V_T}{V_C} \frac{1}{M_{TFSA}} f$$

$$X_S = X_{(S + Arg)} - X_{Arg}$$

em que,

X = Proporções de areia grossa (AG), areia fina (AF), argila (Arg) e silte (S), em kg/kg

M = Massa das frações texturais da terra fina seca ao ar e do dispersante (D), em g

V_T = Volume total da dispersão, em mL

V_C = Volume coletado, em mL

f = fator usado para a correção dos resultados de análises de solo feitas em TFSA para expressá-los em TFSE

3.1.2 Caracterização mineralógica

Das amostras obtidas na análise granulométrica, 100 mL da suspensão contendo a fração argila foram colocadas em copos plásticos. Adicionou-se uma solução de HCl 0,5 mol L⁻¹ até que as amostras atingirem pH de aproximadamente 4,0. Esperou-se 30 min até as argilas flocularem, descartou-se o sobrenadante e o restante do material foi colocado em tubos falcon de 50 mL que foram centrifugados por 5 minutos a 3000 rpm. Novamente descartou-se o líquido sobrenadante e com o material úmido foram feitas lâminas orientadas utilizando a técnica de esfregaço. Nesta técnica, a amostra é colocada em uma lâmina e usando outra lâmina para o friccionamento é obtida uma camada fina e homogênea. As lâminas orientadas foram secas ao ar e finalmente foi determinada a mineralogia de cada solo por difratometria de raios X (DRX) utilizando-se o difratômetro multifuncional Panalytical X'Pert PRO equipado com tubo de cobalto (CoK α) de 60 kV e detector X'Celerator. O intervalo de leitura foi de 4 a 65 °2 θ .

3.2 Área experimental e amostragem

3.2.1 Experimento 1 - Preparo da amostra na quantificação de Si disponível no solo

Para avaliar a influência do preparo da amostra na quantificação de Si disponível no solo, foi instalado um experimento com dois solos, cinco doses de Si e seis modos de preparo da amostra que envolveu o processo de secagem.

Foram escolhidas amostras de dois solos de condições físicas, químicas e mineralógicas diferentes (Quadro 1). Os solos selecionados foram um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico muito argiloso (11-LVAd3) e um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico franco arenoso (2-LVAd1).

Amostras destes solos foram passadas em peneiras de 2 mm, homogeneizadas, colocadas em tubos falcon de polipropileno de 50 mL (40 g de solo por tubo) e incubadas com doses de Si (dSi) de 0 (d0), 75 (d1), 150 (d2), 300 (d3) e 600 mg dm⁻³ (d4) com quatro repetições por dose, usando silicato de sódio (Na₂SiO₃ p.a.) como fonte.

Como a dinâmica do Si no solo é dependente do pH e o Na₂SiO₃ é um sal básico solúvel, doses crescentes ocasionariam alteração do pH do solo atingindo valores diferentes para cada dose. Para contornar esse problema, as doses de Si foram adicionadas ao solo a partir de uma solução estoque (0,5 mol L⁻¹ de Si), preparada a partir do Na₂SiO₃ que teve o seu pH corrigido para 6,5 com HCl e NaOH. Esta solução foi diluída e aplicada juntamente na água utilizada para elevar a umidade dos solos para 80 % da CC, de acordo com a concentração de Si imposta em cada tratamento. Assim, esses solos foram incubados por 96 h para que o elemento atingisse o equilíbrio entre a fase sólida e a solução.

Quadro 1. Procedência e classificação dos solos.

| Solo | Símbolo | Local de coleta | Localização geográfica | Altitude (m) |
|---|----------|----------------------------|------------------------------------|--------------|
| Argissolo Vermelho distrófico ^{al} | 1-PVd | UFV, Viçosa – MG (ANC) | Não disponível | 650 |
| Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico ^{al} | 2-LVAd1 | Três Marias – MG (ANC) | Não disponível | 750 |
| Latossolo Amarelo eutrófico ^{al} | 3-LAe | Linhares – ES (ANC) | Não disponível | 15 |
| Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico ^{al} | 4-LVAd2 | Deserto, Viçosa – MG (ANC) | Não disponível | 650 |
| Latossolo Vermelho eutrófico (rochas do Bambuí) | 5-LVe | Sete Lagoas – MG (ANC) | 19° 26' 45" S 44° 18' 14" O | 770 |
| Cambissolo Háptico distrófico | 6-CXd | Curvelo – MG (ANC) | 18° 57' 24" S 44° 41' 04" O | 730 |
| Neossolo Litólico eutrófico | 7-RLe | Patos de Minas – MG (AC) | 18° 38' 10" S 46° 21' 31" O | 980 |
| Latossolo Vermelho Distroférrico | 8-LVdf | Patos de Minas – MG (AC) | 18° 38' 09" S 46° 27' 34" O | 920 |
| Latossolo Amarelo distrófico | 9-LAd | Rio Paranaíba – MG (AC) | 19° 23' 57" S 46° 09' 23" O | 1200 |
| Latossolo Vermelho Perférrico (Itabirito) | 10-LVj | Nova Lima – MG (ANC) | 20° 07' 60" S 43° 57' 49" O | 1300 |
| Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico | 11-LVAd3 | Viçosa – MG (ANC) | 20° 45' S 44° 52' O | 650 |
| Latossolo Vermelho-Amarelo húmico | 12-LVAh | Araponga – MG (ANC) | 20° 40' 58.7" S 42° 34' 09.5" O | 951 |

^{al} Banco de solos do DPS – UFV; ANC= Solos coletados em área não cultivada; AC= Solos coletados em área cultivada.

Com relação ao modo de preparo das amostras, o primeiro tratamento visou avaliar a disponibilidade de Si em amostras de solo que encontravam-se em equilíbrio, mas sem passarem pelo processo de secagem. Para isso, elas foram coletadas com umidade de 80 % da CC após o período de equilíbrio de 96 h e seguiram direto para o processo de extração, sem passarem pelo processo de secagem comum ao preparo da TFSA. Os demais modos de preparo das amostras incluíram a secagem seguindo o processo de preparo da TFSA. Assim, os solos mantidos nos tubos falcon foram levados para a estufa de circulação de ar forçado a 45 °C e secos até peso constante.

Posteriormente, as amostras foram reumedecidas a 80 % da CC e os tubos foram fechados para manter a umidade constante ao longo do tempo. Após 1, 12, 48, 96 e 144 h de reumedecimento os tratamentos foram amostrados e então o Si foi extraído. Além disso, em todos os tratamentos foi determinando o pH do solo.

O cálculo da quantidade de água aplicada em cada solo para atingir a CC foi feita através do equivalente de umidade (EU) (Cassel; Nielsen, 1986) e do uso da equação recomendada por Ruiz, Ferreira e Pereira (2003) para Latossolos e Neossolos Quartzarênicos:

$$CC = 0,081 + 0,888 EU \quad R^2 = 0,910 \quad \text{Eq. 1}$$

A extração do Si foi realizada com o extrator CaCl_2 10 mmol L^{-1} , utilizado para refletir a força iônica e pH da solução do solo (Gibson, 1994), seguindo a metodologia sugerida por Snyder (1991, 2001), Korndörfer; Pereira e Nolla (2004) e Pereira et al. (2007). Assim sendo, em tubos falcon de polipropileno de 50 mL foram adicionados 4 cm^3 de solo e 40 mL de extrator (relação solo:extrator 1:10) que foram então agitados em agitador horizontal por 1 h a 50 rpm. Após a agitação, deixou-se a solução em repouso por 12 h para a decantação das argilas em suspensão. Em seguida, filtrou-se (filtração média) a suspensão e as amostras foram armazenadas em novos tubos falcon de 50 mL para posterior dosagem (quantificação em solução).

O pH das amostras foi quantificado em CaCl_2 10 mmol L^{-1} seguindo a metodologia detalhada pela EMBRAPA (2009). Assim, colocou-se 10 cm^3 do solo em um frasco de 50 mL e adicionaram-se 25,0 mL de CaCl_2 deixando a solução em repouso por 15 min. Após, agitaram-se as amostras em agitador horizontal por 10 min a 200 rpm. Finalmente, depois de um período de 30 min para o equilíbrio e a decantação, mergulhou-se o eletrodo na suspensão homogeneizada e procedeu-se à leitura do pH sem nova agitação.

3.2.2 Experimento 2 – Disponibilidade de Si no solo

Com o intuito de avaliar os extratores cloreto de cálcio (CaCl_2), ácido acético (AA), carbonato de amônio (CA) e Mehlich-3 (M3) para determinar Si disponível em solos brasileiros, foi conduzido um experimento em casa de vegetação e no Laboratório de Fertilidade do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa. Foi utilizado um esquema fatorial $12 \times 3 \times 2$ correspondente a doze tipos de solos contrastantes (Quadro 1), três níveis de Si (0, 300 e 600 mg dm^{-3}) e dois tipos de preparos das amostras (com e sem secagem), disposto em blocos casualizados (BC) com quatro repetições, totalizando 72 tratamentos e 288 unidades experimentais.

Para isso, amostras de doze tipos de solos (Quadros 1, 2 e 3) foram coletadas na camada de 0 a 20 cm de profundidade em diferentes regiões dos estados de Minas Gerais (11) e Espírito Santo (1). Depois de coletados, os solos foram destorroados, passados em peneiras de 2 mm, homogeneizados e deixados para secar à sombra.

Cada unidade experimental foi composta por um volume de solo de 4 dm^3 que foram colocados em vasos de 5 dm^3 . Foi realizada a calagem para cada solo para atingir pH próximo de 6,5 e, então, incubados por 30 d. O cálculo da necessidade de calagem (NC) foi feito pelos métodos da Saturação por Bases e da Neutralização do Al^{3+} e elevação dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} . A recomendação utilizada foi a menor dose recomendada dentre os dois métodos, mas que fosse igual ou maior que a exigência mínima da cultura (X) e menor que a acidez potencial (H+Al). As fórmulas usadas nos cálculos foram as seguintes (Ribeiro; Guimarães; Alvarez, 1999):

- 1) Método da neutralização do Al^{3+} e da elevação dos teores de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$

$$\text{NC} = [\text{Y Al}^{3+}] + [\text{X} - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})]$$

em que,

Y = valor variável em função da capacidade tampão da acidez do solo

Al^{3+} = acidez trocável, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$

X = exigência mínima da cultura, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$

2) Método da saturação por bases

$$NC = T(Ve - Va) / 100$$

em que,

T = CTC a pH 7 = SB + (H + Al), em $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$

SB = Soma de bases = $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+$, em $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$

Va = Saturação por bases atual do solo = $100 \text{ SB}/\text{T}$, em %.

Ve = Saturação por bases desejada ou esperada para a cultura

Durante a incubação, a umidade dos solos foi mantida constante e equivalente a 80 % da capacidade de campo (CC) adicionando-se, quando necessário, água deionizada (Novais; Neves; Barros, 1991) para evitar possíveis contaminações com Si (Asher, 1991).

Após o período de incubação da calagem, com o intuito de se obter solos com diferentes teores de Si disponível, foi feita uma nova incubação com doses de 0, 300 e 600 mg dm^{-3} de Si por mais 5 d, para permitir o equilíbrio entre a fase sólida e a solução. Como fonte de Si usou-se silicato de potássio líquido, com pH previamente corrigido como detalhado no experimento 1, para garantir que cada solo tivesse igual pH mesmo com teores de Si diferentes.

Posteriormente, quando o solo apresentou consistência friável foram coletadas amostras em duplicata de cada tratamento e colocadas em tubos plásticos falcon de 50 mL. A primeira amostra foi tampada e armazenada diretamente para evitar perda de umidade. Já a segunda, foi colocada em estufa com circulação de ar forçado a 45 °C até peso constante imitando a terra fina seca ao ar, TFSA. Tubos falcon de polipropileno foram utilizados para evitar possíveis contaminações com Si de recipientes de vidro (Miyake; Takahashi, 1983; Asher, 1991). Finalmente, foram feitas as extrações e dosagens do elemento disponível tanto em amostras úmidas como secas.

Então, em cada vaso foram cultivadas 12 plantas de arroz durante 35 d. A escolha da planta de arroz se deu por ser uma planta reconhecidamente acumuladora de Si e amplamente utilizada em experimentos para avaliar a disponibilidade de Si no solo (Makabe et al., 2009).

A aplicação dos demais nutrientes foi feita utilizando-se solução nutritiva preparada de acordo com a recomendação de Novais, Neves e Barros (1991) para ensaios em ambientes controlados. As quantidades utilizadas foram: 100 mg dm⁻³ de N (fosfato de amônio monobásico - NH₄H₂PO₄), 300 mg dm⁻³ de P (NH₄H₂PO₄ e fosfato de potássio monobásico - KH₂PO₄), 150 mg dm⁻³ de K (KH₂PO₄, silicato de potássio - K₂SiO₃ e Sulfato de Potássio - K₂SO₄), 40 mg dm⁻³ de S (K₂SO₄, sulfato de sódio anidro - Na₂SO₄ e sulfato de magnésio - MgSO₄), 0,81 mg dm⁻³ de B (ácido bórico - H₃BO₃), 1,33 mg dm⁻³ de Cu (sulfato de cobre pentahidratado - CuSO₄.5H₂O), 1,55 mg dm⁻³ de Fe (cloreto de Ferro hexahidratado - FeCl₃.6H₂O), 3,66 mg dm⁻³ de Mn (cloreto de manganês tetra hidratado - MnCl₂.4H₂O), 0,15 mg dm⁻³ de Mo (molibdato de sódio dihidratado - NaMoO₄.2H₂O) e 4,0 mg dm⁻³ de Zn (sulfato de zinco heptahidratado - ZnSO₄.7H₂O).

A irrigação do experimento foi diária para manter a umidade do solo o mais constante possível, entre 80 e 90 % da capacidade de campo (Novais; Neves; Barros, 1991), usando água deionizada que era periodicamente analisada com relação à concentração de Si.

Ao final do período de avaliação, seguindo a metodologia sugerida por Miyazawa et al. (2009), foi feita a colheita da parte aérea das plantas e posterior preparo das amostras, incluindo um pré-tratamento de secagem do tecido vegetal ao ar livre para retirar o excesso de umidade.

Após, as folhas foram lavadas em solução detergente, enxaguadas em água, colocadas em sacos de papel e secas em estufa de circulação forçada de ar a 60 °C até peso constante. Finalmente, as amostras foram trituradas em moinho tipo Wiley e armazenadas para posterior extração e dosagem de Si.

Quadro 2. Características físicas dos solos.

| Solo | Dp^{a/} | Ds^{b/} | EU^{c/} | Areia (A) | Silte (S) | Argila (Arg) | Classe textural^{d/} |
|-----------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------------|------------------|------------------|---------------------|-------------------------------------|
| | ----- kg dm⁻³ ----- | | kg kg⁻¹ | ----- | % ----- | | |
| 1-PVd | 2,39 | 1,02 | 0,30 | 36 | 8 | 56 | Argiloso |
| 2-LVAd1 | 2,51 | 1,29 | 0,07 | 82 | 1 | 17 | Franco-arenoso |
| 3-LAe | 2,47 | 1,33 | 0,07 | 78 | 1 | 21 | Franco-argilo-arenoso |
| 4-LVAd2 | 2,53 | 1,01 | 0,27 | 37 | 10 | 53 | Argiloso |
| 5-LVe | 2,30 | 1,00 | 0,24 | 21 | 22 | 57 | Argiloso |
| 6-CXd | 2,57 | 1,06 | 0,05 | 27 | 39 | 34 | Franco-argiloso |
| 7-RLe | 2,29 | 1,03 | 0,36 | 24 | 31 | 44 | Argiloso |
| 8-LVdf | 2,89 | 1,18 | 0,23 | 15 | 24 | 61 | Muito argiloso |
| 9-LAd | 2,35 | 0,98 | 0,30 | 10 | 20 | 69 | Muito argiloso |
| 10-LVj | 3,86 | 2,07 | 0,11 | 34 | 22 | 44 | Argiloso |
| 11-LVAd3 | 2,50 | 1,00 | 0,30 | 20 | 2 | 78 | Muito argiloso |
| 12-LVAh | 2,18 | 1,04 | 0,28 | 56 | 6 | 38 | Argilo-arenoso |

^{a/} Dp= Densidade de partículas; ^{b/} Ds= Densidade do solo; ^{c/}EU= Equivalente de unidade; ^{d/}Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.

Quadro 3. Características químicas dos solos.

| Solo | pH | P | K | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Al ³⁺ | H + Al | SB | t | T | V | m | CO | P-rem | S | B | Cu | Mn | Fe | Zn | |
|-----------------|------------------|---------------------|-----|--|------------------|------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------------|------|----------------------|--------------------|------|------|---------------------------------|--------|-------|--|
| | H ₂ O | mg dm ⁻³ | | ----- cmol _c dm ⁻³ ----- | | | | | | | | ---- % ---- | | dag kg ⁻¹ | mg L ⁻¹ | | | ----- mg dm ⁻³ ----- | | | |
| 1-PVd | 5,27 | 0,9 | 7 | 0,65 | 0,02 | 0,70 | 4,1 | 0,69 | 1,39 | 4,79 | 14,37 | 50,44 | 1,03 | 13,1 | 9,7 | 0,26 | 1,75 | 5,20 | 87,40 | 6,80 | |
| 2-LVAd1 | 4,36 | 1,0 | 15 | 0,42 | 0,03 | 0,50 | 3,5 | 0,49 | 0,99 | 3,99 | 12,24 | 50,59 | 0,59 | 32,4 | 12,7 | 0,10 | 0,52 | 3,70 | 121,20 | 0,84 | |
| 3-LAe | 5,77 | 6,8 | 67 | 3,17 | 0,97 | 0,10 | 2,0 | 4,31 | 4,41 | 6,31 | 68,31 | 2,27 | 0,88 | 42,8 | 0,1 | 0,61 | 0,62 | 7,50 | 71,10 | 5,07 | |
| 4-LVAd2 | 5,73 | 1,4 | 13 | 1,38 | 0,28 | 0,00 | 2,5 | 1,69 | 1,69 | 4,19 | 40,38 | 0,00 | 0,88 | 11,1 | 2,5 | 0,25 | 4,43 | 70,20 | 55,60 | 0,76 | |
| 5-LVe | 6,12 | 2,0 | 76 | 8,89 | 0,66 | 0,00 | 2,4 | 9,74 | 9,74 | 12,14 | 80,24 | 0,00 | 3,18 | 25,7 | 0,7 | 0,36 | 1,01 | 42,60 | 32,60 | 1,01 | |
| 6-CXd | 4,99 | 0,3 | 20 | 0,97 | 0,04 | 0,77 | 2,8 | 1,06 | 1,83 | 3,86 | 27,48 | 42,05 | 0,99 | 25,4 | 3,4 | 0,37 | 0,90 | 22,10 | 82,50 | 0,46 | |
| 7-RLe | 5,57 | 66,5 | 254 | 14,87 | 4,31 | 0,00 | 9,2 | 19,83 | 19,83 | 29,03 | 68,31 | 0,00 | 4,99 | 26,1 | 0,4 | 0,94 | 2,79 | 268,50 | 32,20 | 12,32 | |
| 8-LVdf | 5,19 | 7,4 | 20 | 0,57 | 0,09 | 0,00 | 5,1 | 0,71 | 0,71 | 5,81 | 12,24 | 0,00 | 1,14 | 7,6 | 6,7 | 0,32 | 7,78 | 85,50 | 46,40 | 0,61 | |
| 9-LAd | 5,29 | 5,5 | 45 | 2,80 | 0,58 | 0,00 | 5,5 | 3,50 | 3,50 | 9,00 | 38,86 | 0,00 | 3,10 | 11,9 | 4,7 | 0,70 | 1,48 | 9,80 | 39,70 | 3,91 | |
| 10-LVj | 6,05 | 1,4 | 11 | 2,59 | 0,13 | 0,00 | 1,6 | 2,75 | 2,75 | 4,35 | 63,20 | 0,00 | 0,91 | 9,1 | 4,7 | 0,32 | 0,40 | 43,80 | 44,20 | 5,21 | |
| 11-LVAd3 | 5,24 | 0,6 | 33 | 1,18 | 0,08 | 0,00 | 1,4 | 1,34 | 1,34 | 2,74 | 48,99 | 0,00 | 0,53 | 6,0 | 15,5 | 0,14 | 0,39 | 3,30 | 33,40 | 1,86 | |
| 12-LVAh | 4,92 | 1,1 | 32 | 1,74 | 0,58 | 1,15 | 13,9 | 2,40 | 3,55 | 16,30 | 14,73 | 32,38 | 5,30 | 11,2 | 19,5 | 0,29 | 0,38 | 10,80 | 46,20 | 2,67 | |

SB= Soma de bases trocáveis= Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺; t= Capacidade de Troca Catiônica Efetiva = SB + Al³⁺; T = Capacidade de Troca Catiônica a pH 7 = SB + (H + Al); V= Índice de saturação por bases= (SB/T) x 100; m= índice de saturação por alumínio= (Al³⁺ /t) x100; P-rem = Fósforo Remanescente; pH em água - Relação 1:2,5; P - Na - K - Fe - Zn -Mn - Cu - Extrator Mehlich-1; H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L⁻¹ - pH 7,0; B - Extrator água quente; Ca²⁺ - Mg²⁺ - Al³⁺- Extrator: KCl - 1 mol L⁻¹; MO (Matéria Orgânica) = C.Org x 1,724 -Walkley-Black; S - Extrator - Fosfato monocálcico em ácido acético.

3.3 Determinação de Si disponível no solo

Dos quatro extratores avaliados, o cloreto de cálcio 10 mmol L⁻¹ e o ácido acético 0,5 mol L⁻¹ foram escolhidos por serem mundialmente avaliados como possíveis extratores de Si disponível nos solos (Korndörfer et al., 1999; Snyder, 2001; Korndörfer; Pereira; Nolla, 2004; Crooks; Prentice, 2017).

Dos outros dois extratores, o Mehlich-3 foi escolhido por ser a aposta em várias partes do mundo, incluído o Brasil (Novais; Smith; Nunes, 2007), de um extrator multielementar com a consequente redução de custos nas análises (Mallarino, 2003; Bortolon; Gianello; Schlindwein, 2009; Reis, 2016) e o carbonato de amônio 9,6 g L⁻¹ por apresentar potencial para seu uso na determinação de Si disponível no solo (Pereira et al., 2007).

Para a extração, no caso do CaCl₂ 10 mmol L⁻¹ foi seguida a metodologia sugerida por Snyder (1991, 2001), Korndörfer; Pereira e Nolla (2004) e Pereira et al. (2007). Para o ácido acético 0,5 mol L⁻¹ a metodologia sugerida por Korndörfer Pereira e Nolla (2004). Para carbonato de amônio 9,6 g dm⁻³ a metodologia sugerida por Pereira et al. (2007) e para Mehlich-3 (NH₄F 15 mmol/L + CH₃COOH 200 mmol/L + NH₄NO₃ 250 mmol/L + HNO₃ 13 mmol/L + EDTA 1 mmol/L) a metodologia sugerida por Mehlich (1984).

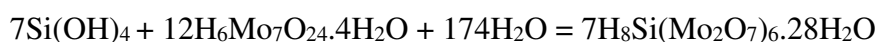
No preparo dos extratores e soluções sempre foi utilizada água ultrapura visando eliminar possíveis problemas de contaminação.

Sendo assim, subamostras de 4 cm³ de solo, tanto da amostra seca como da úmida, foram colocadas em tubos falcon plásticos de 50 mL e foram adicionados 40 mL do extrator (proporção solo:extrator de 1:10).

Essas suspensões foram então agitadas em agitador horizontal por 1 h a 50 rpm seguido de um período de repouso de 12 h para a decantação das argilas em suspensão. Filtrou-se usando papel filtro médio para o caso do CaCl₂ e lento para os outros três extratores. Essa diferença originou-se porque o uso de papel filtro médio para os extratores AA, CA e M3 não foi eficiente, dando extratos com quantidade elevada de argila em suspensão. Finalmente, as amostras foram armazenadas em novos tubos falcon para posterior dosagem.

Nos dois experimentos a dosagem do Si no solo foi feita por Espectrometria de Absorção Molecular UV- Visível (EAM) com comprimento de onda de 660 nm, de acordo com o método colorimétrico do azul de molibdênio, seguindo a metodologia detalhada por Kilmer (1965) e Hallmark, Wilding e Smeck (1982).

Este método estima exclusivamente Si monomérico (H_4SiO_4), ou ácido monossilícico, por reação direta com heptamolíbdate de amônio acidificado para formar o ácido silicomolíbico amarelo que contém apenas um átomo de silício como mostrado a seguir (Iler, 1979):



Assim, pipetou-se diretamente uma alíquota de 5 mL de extrato (CaCl_2 e CA) ou 5 mL de extrato diluído (2 mL de extrato + 3 mL de extrator para AA e 1 mL de extrato + 4 mL de extrator para M3) que foi colocada em um copo plástico de 50 mL e misturada com 0,5 mL da solução sulfo-molíbica 75 g L^{-1} . Para as amostras extraídas com CA foi necessária acidificação prévia para atingir pH entre 1,4 e 2, já que a formação do complexo Beta-molibdosilicato de coloração amarela só acontece em condições ácidas (Pereira et al., 2007).

Após 10 min acrescentou-se 1 mL da solução ácido tartárico 200 g L^{-1} e após mais 5 min adicionou-se 5 mL da solução de ácido ascórbico 3 g L^{-1} , completando assim um total de 6,5 mL de reagente de trabalho (RT). Finalmente, depois de 1 h foi feita a leitura.

3.4 Determinação do Silício na planta

Para a avaliação do Si na planta foi usado o método sugerido por Elliott e Snyder (1991), pelo qual a extração de Si é feita por meio da digestão do tecido vegetal com água oxigenada e NaOH.

Por tanto, em tubos de polipropileno de 50 mL pesou-se 0,100 g do material vegetal moído e foram adicionados 2 mL de H_2O_2 (300 g L^{-1}), com posterior agitação em agitador magnético por alguns segundos.

Posteriormente, foram adicionados mais 3 mL de NaOH (500 g L^{-1}) e agitou-se novamente no mesmo agitador. Como ao se adicionar NaOH a oxidação foi intensa, o processo de digestão foi controlado com agitação constante das amostras, usando um agitador para tubos do tipo Vortex para evitar seu vazamento.

Em seguida, os tubos foram colocados em banho-maria a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ por aproximadamente 1 h. Quando a oxidação das amostras havia terminado, evidenciada pelo término de liberação de gases, os tubos foram fechados e levados para autoclave por 1 h a $123 \text{ }^\circ\text{C}$ e 1,5 atm.

Depois do resfriamento das amostras, foram adicionados 45 mL de água ultrapura e transferiu-se o extrato para frascos plásticos devidamente identificados, deixando-os em repouso para decantação dos resíduos.

Para a dosagem do Si pelo método colorimétrico, foi usada uma alíquota de 1 mL de sobrenadante do extrato digerido mais 19 mL de água ultrapura que foram colocados em copo plástico de 50 mL. A essa solução adicionou-se 1 mL de HCl (500 g L^{-1}) e 2 mL de molibdato de amônio (100 g L^{-1}) e agitou-se levemente.

Decorridos 5 a 10 min, foram adicionados 2 mL de ácido oxálico agitando-se levemente a solução. Finalmente, depois de 2 min a dosagem foi realizada em espectrofotômetro de absorção molecular UV – Visível no comprimento de onda de 410 nm.

3.5 Análise estatística

Para o experimento 1, foram ajustadas equações de regressão linear do teor disponível de Si no solo ($tdSi$) em função do tempo de reumedecimento após secagem e sem secagem nas diferentes doses de Si (dSi). Os coeficientes das equações de regressão foram testados até o nível de significância de 5 %.

Para o experimento 2, os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Para a avaliação da capacidade preditiva dos extratores em relação à disponibilidade de Si no solo, foram feitas correlações lineares simples expressas por meio do coeficiente de correlação de Pearson (R) e do coeficiente de determinação (R^2),

relacionando o conteúdo de Si na parte aérea da planta em função do teor de Si disponível no solo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização mineralógica dos solos

Os difratogramas de raios X da fração argila são apresentados nas Figuras 1 e 2 e o resumo dos minerais de cada solo no Quadro 4. Os resultados mostram variabilidade entre solos, sendo que a composição mineral da fração argila é considerada um indicador do seu grau de desenvolvimento. Isso porque à medida que os solos evoluem, sua composição mineral começa depender mais do ambiente de intemperização do que da composição do seu material de origem (Kämpf; Curi; Marques, 2009).

Quadro 4. Minerais da fração argila determinados por difratometria de raios X.

| Solo | Minerais | | | | | | | | | |
|----------|------------|------------------|----------------|---------------------------------|----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-------------|
| | Ilita (Il) | Vermiculita (Vm) | Esmectita (Es) | Vermiculita (VHE) ^{1/} | Caulinita (Ct) | Gibbsita (Gb) | Goethita (Gt) | Hematita (Hm) | Maghemita (Mh) | Rutilo (Ru) |
| 1-PVd | | | | | X | X | X | | | |
| 2-LVAd1 | X | | | | X | X | X | | | |
| 3-LAe | | | | | X | | X | | | |
| 4-LVAd2 | | | | | X | X | X | X | | |
| 5-LVe | X | | | X | X | | X | X | | X |
| 6-CXd | X | | | X | X | X | X | | | X |
| 7-RLe | X | X | X | | X | | X | X | X | |
| 8-LVdf | | | | X | X | X | X | X | X | |
| 9-LAd | | | | | X | X | X | | | |
| 10-LVj | | | | | X | X | X | X | | |
| 11-LVAd3 | | | | | X | X | X | X | | |
| 12-LVAd4 | | | | | X | X | X | | | |

^{1/} VHE – Vermiculita com hidróxi-Al entrecamadas.

Assim, observa-se que os solos 1-PVd, 3-Lae, 4-LVAd2, 8-LVdf, 9-LAd, 10-LVj, 11-LVAd3 e 12-LVAd4 apresentam uma mineralogia onde predomina a caulinita, gibbsita e goethita e em menor grau hematita, maghemita e rutilo, que são comuns em solos de intemperismo avançado (Fontes, 2012). Já os solos 2-LVAd1, 5-LVe, 6-CXd e

7-RLe, além de apresentar alguns dos minerais já detalhados, possuem minerais como illita, vermiculita, esmectita e vermiculita com hidróxi-Al entrecamadas que refletem um menor grau de intemperismo (Novais; Mello, 2007; Mello; Pérez, 2009).

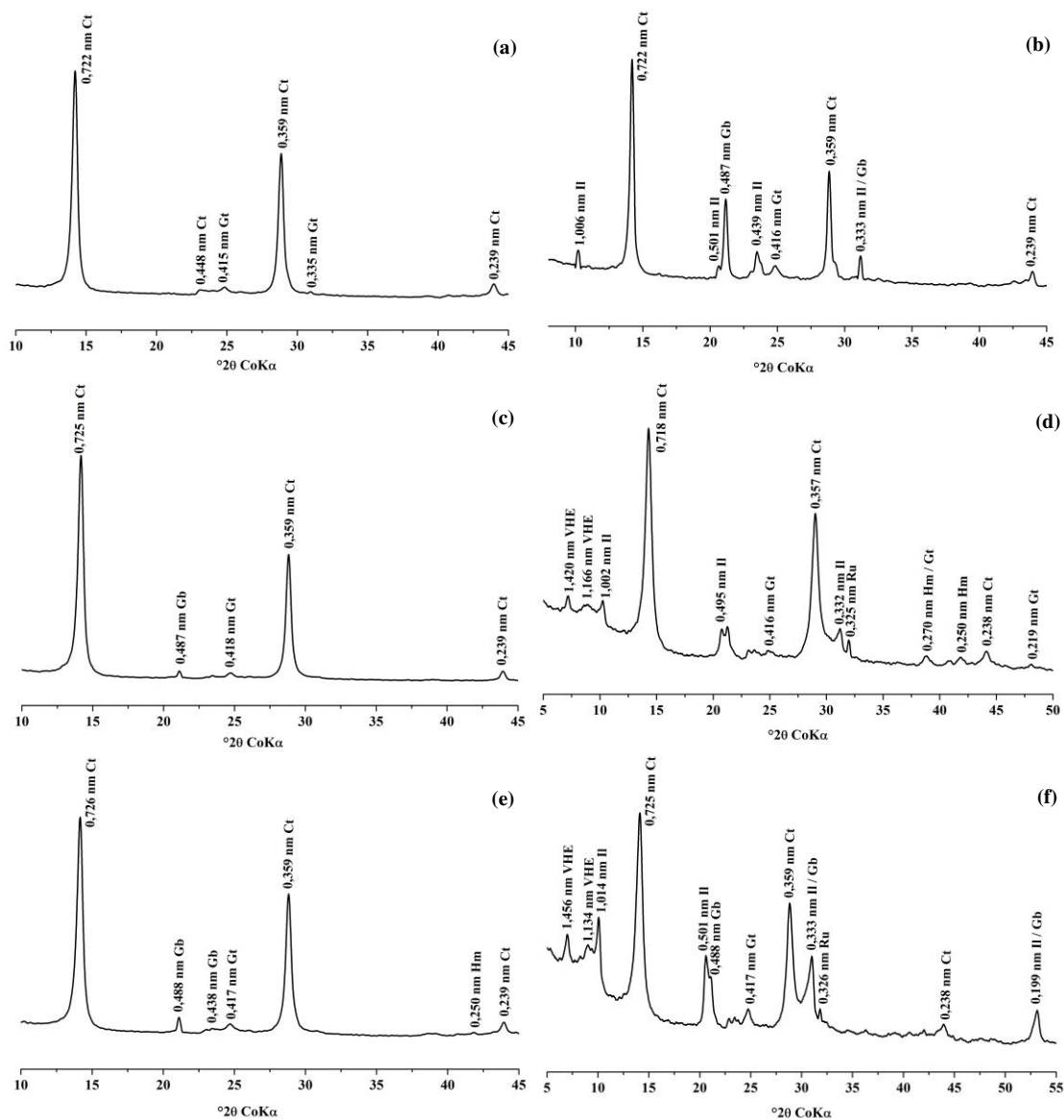


Figura 1. Difractometria de raios X representativa da fração argila natural para amostras dos solos (a) 1-PVd, (b) 2-LVAd1, (c) 3-Lae, (d) 4-LVAd2, (e) 5-LVe e (f) 6-CXd.

Em relação a isso, em uma sequência de estabilidade e índices de intemperismo para minerais da fração argila apresentada por Jackson (1968) e adaptada por Kämpf,

Curi e Marques (2009), a illita, vermiculita, esmectita e vermiculita com hidróxi-Al entrecamadas são minerais que intemperizam lentamente e estão presentes em ambientes com estágios intermediários de intemperismo. Já a caulinita, óxidos de Al (gibbsita) e óxidos de Fe (goethita, hematita, maghemita) são muito resistentes à intemperização e estão presentes em solos de avançado grau de intemperismo, sendo também os mais frequentes e exercendo uma marcada influencia nos atributos eletroquímicos dos solos (Alleoni et al., 2009; Fontes, 2012). Uma consequência disto é que no decorrer da intemperização os solos inicialmente apresentaram um incremento na sua fertilidade pela liberação de nutrientes dos silicatos, porém que vai diminuindo com o avanço do intemperismo até que em estágios avançados tem-se o esgotamento das fontes desses nutrientes (Kämpf; Curi; Marques, 2009; Kämpf; Marques; Curi, 2012).

Um aspecto importante a mencionar é que os óxidos de Fe e Al são típicos da fração argila da grande maioria dos solos brasileiros (Melo et al., 2001). Estes minerais são responsáveis de diversas propriedades físicas e químicas apresentadas por estes solos incluindo a adsorção de ânions, cátions e alguns metais pesados, assim como na sua estrutura, formando agregados pequenos e extremamente estáveis (Fontes, 2012; Kämpf; Marques; Curi, 2012). Nesse sentido, Kämpf, Marques e Curi (2012) mencionam que, por exemplo, a gibbsita dificulta o ajuste face a face das placas de caulinita permitindo assim a formação de uma estrutura granular muito pequena que ocasiona uma maior porosidade, menor densidade do solo e maior infiltração da água.

Por outra parte, de todos os minerais encontrados só a goethita e a caulinita estiveram presentes em todos os solos. Isso pode ser explicado pelo fato da goethita ser o óxido de Fe mais comum nos solos (Mello; Pérez; 2009; Kämpf; Marques; Curi, 2012) da mesma maneira que a caulinita é o argilomineral mais comum e abundante nos solos do mundo (Weil; Brady, 2017). A alta ocorrência desta última deve-se à possibilidade de se formar a partir de vários minerais, sempre que haja remoção parcial de Si e de cátions básicos, em condições mais intensas de intemperismo e drenagem mais eficiente (Kämpf; Curi; Marques, 2009; Fontes, 2012). Como essas condições são dominantes em regiões quentes e úmidas, a formação e estabilidade da caulinita são favorecidas sendo o argilomineral mais abundante, comum e predominante na fração argila dos solos brasileiros (Melo et al., 2001b), ocorrendo praticamente em todas as classes com

destaque para Argissolos, Cambissolos, Latossolos, Nitossolos e Plintossolos (Kämpf; Curi, 2003).

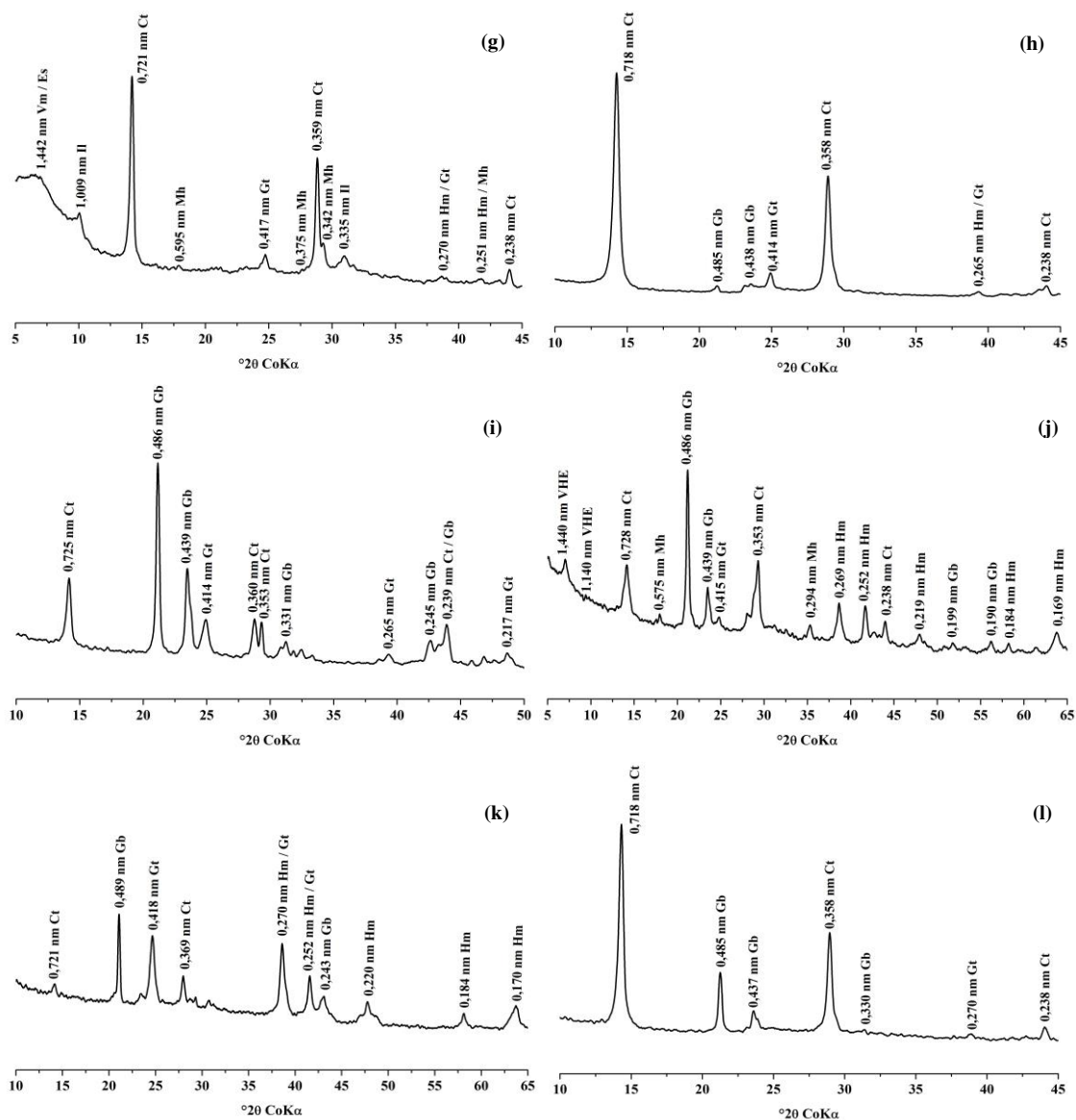


Figura 2. Difratometria de raios X representativa da fração argila natural para amostras dos solos (g) 7-RLe, (h) 8-LVdf, (i) 9-LAd, (j) 10-LVj, (k) 11-LVAd3 e (l) 12-LVAh.

Em relação à gibbsita, ela esteve presente em 9 dos 12 solos (Quadro 4). Este óxido de Al se produz nos estágios finais de intemperismo que normalmente ocorrem em

condições de substanciais taxas de precipitação e elevada temperatura por longos períodos (Fontes, 2012).

Falando dos minerais 2:1 (Quadro 4), a illita, denominada assim quando está na fração argila do solo, é a mica (dioctaedral) mais abundante no solo e fonte importante de K durante o processo de intemperismo. As vermiculitas têm um papel importante no ciclo do K pela sua capacidade de fixação do nutriente. Finalmente as esmectitas, por sua natureza expansiva e elevada área superficial específica e CTC, são muito reativas constituindo solos de elevada fertilidade, mas que podem apresentar dificuldades para a produção agrícola pela sua alta capacidade de expansão e contração (Kämpf; Marques; Curi, 2012). A sua formação e preservação é favorecida em pedoambientes com drenagem restrita, suprimento de soluções ricas em Si, Al, Fe e Mg e lixiviação mínima. Agora que, mesmo sendo as esmectitas argilominerais característicos de Vertissolos, podem também estar presentes em outros solos, como constatado neste estudo, conferindo ou não propriedades vérticas. Exemplo disso são os Planossolos, Plintossolos, Chernossolos, Luvisolos, Gleissolos, Neossolos Litólicos e Flúvicos, Espodossolos, Cambissolos e Latossolos Litólicos (Kämpf; Curi, 2003; Kämpf; Marques; Curi, 2012).

Por outro lado, minerais interestratificados incluindo a vermiculita com hidróxi-Al entrecamadas, ocorrem comumente em solos ácidos com estágios intermediários de intemperismo (Kämpf; Curi, 2003; Alleoni et al., 2009; Kämpf; Curi; Marques, 2009; Kämpf; Marques; Curi, 2012). Isso é possível pelo preenchimento parcial das regiões entrecamadas dos minerais 2:1 com ilhas de hidróxi-Al, de forma que, o mineral modifica suas propriedades físico-químicas permitindo maior estabilidade dos seus componentes e se tornando mais resistente ao intemperismo. Dessa forma, pode coexistir, por exemplo, com gibbsita na fração argila de Latossolos (Alleoni et al., 2009; Kämpf; Marques; Curi, 2012), fato que foi visto nos solos 6-CXd e 8-LVdf. Minerais estratificados encontrados em solos altamente intemperizados também foram reportados por Moura-Filho e Buol (1972) e Galhego e Espindola (1979).

Como a mineralogia e a textura são fatores que tem influência direta na disponibilidade de Si no solo (Beckwith; Reeve, 1963; van Raij; Camargo, 1973; Meyer; Keeping, 2001; Camargo et al., 2005), é importante destacar que os solos empregados no

estudo apresentaram grande variação (Quadros 2 e 4), representando de forma aceitável a variabilidade dos solos tropicais brasileiros. Isso conferiu maior confiabilidade e possibilidade de extrapolação dos dados gerados para os diferentes extratores avaliados.

4.2 Preparo da amostra na quantificação de Si disponível no solo

De forma geral os dois solos apresentaram resposta positiva à aplicação das doses de Si (*dSi*), aumentando os teores de Si disponível (*tdSi*) em qualquer um dos tratamentos (Quadro 5).

Quadro 5. Teores de Si disponível (*tdSi*) nos solos 11-LVAd3 e 2-LVAd1 sem secagem e nos diferentes tempos de reumedecimento após secagem.

| Dose | Sem secagem ^{a/} | Tempo de reumedecimento após secagem (h) | | | | | Média |
|---------------------------------------|---------------------------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|
| | | 1 | 12 | 48 | 96 | 144 | |
| 11 - LVAd3^{b/} | | | | | | | |
| ----- mg dm ⁻³ de Si ----- | | | | | | | |
| d0 (0) | 3,76 ± 0,26 | 4,77 ± 0,06 | 4,90 ± 0,51 | 3,66 ± 0,25 | 3,81 ± 0,17 | 3,34 ± 0,24 | 4,04 |
| d1 (75) | 20,04 ± 1,88 | 17,91 ± 1,46 | 20,67 ± 0,32 | 14,94 ± 0,92 | 15,48 ± 0,75 | 14,29 ± 0,96 | 17,22 |
| d2 (150) | 17,75 ± 0,50 | 21,33 ± 1,78 | 21,12 ± 1,04 | 18,00 ± 1,95 | 19,12 ± 2,44 | 14,42 ± 2,50 | 18,62 |
| d3 (300) | 28,67 ± 1,83 | 26,24 ± 0,69 | 32,19 ± 1,04 | 26,86 ± 0,94 | 31,56 ± 0,98 | 25,02 ± 1,65 | 28,42 |
| d4 (600) | 49,31 ± 1,24 | 44,41 ± 2,61 | 43,94 ± 2,67 | 39,14 ± 0,54 | 40,66 ± 0,48 | 34,38 ± 1,19 | 41,97 |
| 2-LVAd1^{c/} | | | | | | | |
| d0 (0) | 5,83 ± 0,07 | 5,84 ± 0,43 | 4,07 ± 0,40 | 3,27 ± 0,17 | 3,28 ± 0,28 | 2,92 ± 0,11 | 4,20 |
| d1 (75) | 21,03 ± 1,15 | 18,24 ± 2,44 | 16,28 ± 1,36 | 13,63 ± 0,62 | 14,25 ± 0,55 | 12,67 ± 0,44 | 16,02 |
| d2 (150) | 21,01 ± 0,54 | 21,15 ± 1,30 | 21,78 ± 0,47 | 17,56 ± 0,41 | 18,28 ± 0,81 | 15,61 ± 1,90 | 19,23 |
| d3 (300) | 39,91 ± 1,29 | 24,84 ± 0,69 | 24,70 ± 0,32 | 17,49 ± 0,15 | 19,10 ± 0,73 | 16,52 ± 0,50 | 23,76 |
| d4 (600) | 48,82 ± 2,38 | 30,94 ± 2,09 | 31,55 ± 1,70 | 23,21 ± 0,87 | 23,91 ± 0,97 | 19,76 ± 0,75 | 29,70 |

^{a/} Amostras com 80 % da Capacidade de Campo; ^{b/} Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico muito argiloso; ^{c/} Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico franco arenoso.

Por outra parte, o ácido monossilísico presente na solução do solo pode formar polímeros de dinâmica complexa por saída de água (Dietzel, 2002), limitando sua concentração em solução a 1,8 - 2 mmol L⁻¹ a 25 °C (Iler, 1979; Felmy et al., 2001; Karathanasis, 2002). Pelo exposto, acreditava-se que o processo de secagem das amostras, etapa comum para avaliação da fertilidade do solo, pudesse levar à diminuição dos *tdSi* e que o reumedecimento das mesmas pudesse contornar esse problema. Porém,

pelas regressões obtidas para $tdSi$ em função do tempo de reumedecimento após secagem e sem secagem nas diferentes dSi (Quadro 6), foi comprovado que existe influência do preparo da amostra na quantificação dos $tdSi$ e que quanto maior esse tempo de reumedecimento menores os $tdSi$ extraídos. Nos dois solos, com exceção da dose de 300 mg dm^{-3} para o solo 11-LVAd3, a regressão foi significativa e com coeficiente de regressão linear negativo para todas as doses, apesar dos coeficientes de determinação não serem elevados (Quadro 6). E esses coeficientes são mais negativos quanto maiores as doses de Si adicionadas ao solo. Ou seja, quanto maiores os $tdSi$ maior influência do preparo da amostra do solo na avaliação do Si disponível.

Quadro 6. Equações do teor disponível de Si no solo ($tdSi$) (\hat{y} , mg dm^{-3}) em função do tempo de reumedecimento após secagem e sem secagem (x , h) para os dois solos estudados.

| Dose | 11-LVAd3 ^{a/} | |
|---------------------------|----------------------------------|----------------|
| | $tdSi$ | |
| mg dm^{-3} de Si | Equação | R ² |
| 0 | $\hat{y} = 4,42 - 0,008^{**} x$ | 0,41 |
| 75 | $\hat{y} = 19,13 - 0,038^{**} x$ | 0,58 |
| 150 | $\hat{y} = 20,23 - 0,032^{**} x$ | 0,37 |
| 300 | $\hat{y} = \bar{y} = 28,42$ | - |
| 600 | $\hat{y} = 45,83 - 0,077^{**} x$ | 0,71 |
| Dose | 2-LVAd1 ^{b/} | |
| | $tdSi$ | |
| mg dm^{-3} de Si | Equação | R ² |
| 0 | $\hat{y} = 5,125 - 0,018^{**} x$ | 0,64 |
| 75 | $\hat{y} = 18,22 - 0,044^{**} x$ | 0,58 |
| 150 | $\hat{y} = 21,15 - 0,038^{**} x$ | 0,72 |
| 300 | $\hat{y} = 28,92 - 0,103^{**} x$ | 0,48 |
| 600 | $\hat{y} = 36,29 - 0,131^{**} x$ | 0,54 |

^{a/}Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico muito argiloso; ^{b/}Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico franco arenoso

Outros fatores principalmente o pH, mas também, matéria orgânica, potencial redox, tamanho das partículas, temperatura e força iônica influenciam nos valores dos $tdSi$ (Savant; Snyder; Dantnoff, 1997; Yates; Joyce; Heaney, 1998; Dol Hamid et al.,

2011; Prakash; Savant; Sonar, 2018). Para um mesmo pH do solo, a quantidade, tipo e cristalinidade de minerais silicatados e oxidróxidos de Fe e Al determinam a solubilidade e disponibilidade de Si por meio de reações de sorção e dessorção (Beckwith; Reeve, 1963, 1964, Jones; Handreck, 1963, 1965; McKeague; Cline, 1963a, 1963b; Luxton; Tadanier; Eick, 2006).

Em solos ricos em óxidos de Al a adsorção de Si é notavelmente maior (McKeague; Cline, 1963a; Jones; Handreck, 1963, 1965, 1967; Iler, 1979; Dietzel, 2000, 2002; Tubaña; Heckman, 2015), embora óxidos de Fe tenham uma participação importante em solos intemperizados dada sua ampla distribuição e presença, muitas vezes controlando a concentração de Si na solução (Cornell; Schwertmann, 2002; Opfergelt et al., 2010).

Nesse sentido, Dietzel (2002) detalha que a adsorção de formas monoméricas de Si em óxidos de Fe e de Al aumenta na seguinte ordem: hematita < goethita < magnetita < lepidocrocita < ferridrita < hidróxido de Fe amorfo < gibbsita.

No caso dos ácidos polissilícicos, sua dinâmica é mais complexa não sendo explicada apenas por complexação. Uma das razões é a própria complexidade das moléculas poliméricas e a sua variabilidade sendo mais estáveis em soluções alcalinas, mas em soluções neutras e ácidas sofrem despolimerização lenta liberando formas monoméricas à solução (Dietzel, 2002). Na solução do solo, o aumento das atividades de cátions oriundos de cloretos metálicos diminuem as taxas de despolimerização na ordem: $\text{Na}^+ = \text{K}^+ > \text{Mn}^{2+} = \text{Mg}^{2+} = \text{Ca}^{2+} = \text{Sr}^{2+} > \text{Zn}^{2+} = \text{Ni}^{2+} = \text{Ce}^{3+} = \text{Cu}^{2+}$, fato que acontece também na presença de HPO_4^{2-} , enquanto ânions de sais de sódio na ordem: $\text{NO}_3^- > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ aumentam a despolimerização (Dietzel; Usdowski, 1995).

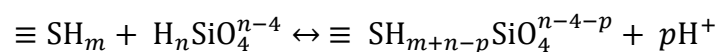
Em termos da adsorção de Si nos argilominerais, Iler (1955) foi um dos primeiros a sugerir a formação de uma ligação de H entre o ácido monossilícico e um átomo de O. Este mecanismo foi aceito por outros autores como Beckwith e Reeve (1963), Jones e Handreck (1963 e 1967) e van Raij e Camargo (1973).

No entanto, vários autores como Davis e Kent (1990), Morel e Hering (1993), Hansen et al. (1994), Doelsch et al. (2001) e Dietzel (2002) indicam que, na realidade, acontece um fenômeno de quimissorção entre os minerais e o Si com alta participação das espécies monoméricas. Contudo, formas polimerizadas também participam nestes

processos quando sua concentração é superior a 0,1 mmol L⁻¹ (Hiemstra; Barnett; van Riemsdijk, 2007).

Nesta reação são formadas ligações de esfera interna (ligações específicas) por troca de ligantes com grupos funcionais das superfícies dos minerais do solo (Hingston; Posner; Quirk, 1972; Rietra; Hiemstra; van Riemsdijk, 1999; Pokrovski et al., 2003). E esse processo é dependente do pH pela interação do ácido silícico com os prótons nas superfícies dos minerais resultando em co-adsorção de prótons (Hiemstra; Barnett; van Riemsdijk, 2007).

As ligações podem ser mono ou bidentadas. As primeiras são formadas por uma ligação com a superfície do mineral e são particularmente favorecidas a pH baixo, enquanto as segundas são menos favorecidas e formam duas ligações. As reações de adsorção atingem o máximo a pH ≈ 9 e diminuem nos valores de pH mais baixo e mais alto (Hingston; Posner; Quirk, 1972; Dietzel, 2002; Luxton; Tadanier; Eick, 2006; Hiemstra; Barnett; van Riemsdijk, 2007). Para Hiemstra, Barnett e van Riemsdijk (2007) como a pH < 9 apenas o ácido monossilícico está em concentrações significativas, não sendo dependente do pH, isso implica que a dependência de adsorção é devido unicamente à interação do Si com a superfície do mineral e não a possíveis variações das formas do elemento em solução. Termodinamicamente, a interação do Si com superfícies protonadas pode ser representada da seguinte forma:



em que: $\equiv \text{SH}_m$ é a superfície protonada do mineral, $\text{H}_n\text{SiO}_4^{n-4}$ é o status médio de protonação das espécies em solução e $\equiv \text{SH}_{m+n-p}\text{SiO}_4^{n-4-p}$ é o status médio de H da superfície após a adsorção.

Essa reação mostra que no processo de adsorção tem-se a liberação de uma quantidade líquida de prótons (p) por mol de Si ligado (p positivo). Assim, quando $p > 0$ o aumento da concentração de prótons levará à diminuição na adsorção de Si. O exposto ilustra que a quantidade relativa (p) de prótons liberados ou coadsorvidos por íons adsorvidos determinará a dependência do pH no processo de adsorção (Hiemstra; van Riemsdijk, 2006; Hiemstra; Barnett; van Riemsdijk, 2007).

Como a adsorção específica tem o poder de alterar o potencial de superfície dos coloides, ela também altera o pH da solução do solo como detalhado. Assim sendo, ao avaliar o pH dos tratamentos percebe-se que é menor quanto maior a *d*Si e quanto maior o tempo de reumedecimento para ambos os solos (Quadro 7). Então, como o pH das soluções de Si aplicadas foi ajustado e mantido igual para todos os tratamentos, essa alteração do pH do solo com o tempo de reumedecimento seria consequência da adsorção específica do Si.

Quadro 7. pH no solos estudados em função do tempo de reumedecimento após secagem e sem secagem.

| Dose - mg dm ⁻³ de Si | Sem secagem ^{a/} | Tempos de reumedecimento após secagem (h) | | | | |
|--|------------------------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 1 | 12 | 48 | 96 | 144 |
| pH | | | | | | |
| 11 - LVAd3^{b/} | | | | | | |
| 0 | 5,75 ± 0,10 | 6,22 ± 0,17 | 6,01 ± 0,02 | 5,86 ± 0,04 | 5,70 ± 0,07 | 5,69 ± 0,05 |
| 75 | 5,89 ± 0,15 | 5,83 ± 0,13 | 5,68 ± 0,10 | 5,74 ± 0,11 | 5,39 ± 0,04 | 5,39 ± 0,02 |
| 150 | 5,78 ± 0,04 | 5,70 ± 0,07 | 5,63 ± 0,08 | 5,63 ± 0,16 | 5,39 ± 0,04 | 5,38 ± 0,05 |
| 300 | 5,77 ± 0,06 | 5,36 ± 0,06 | 5,45 ± 0,11 | 5,60 ± 0,13 | 5,30 ± 0,05 | 5,32 ± 0,05 |
| 600 | 5,60 ± 0,09 | 5,24 ± 0,27 | 5,04 ± 0,12 | 5,09 ± 0,05 | 5,16 ± 0,07 | 5,15 ± 0,04 |
| 2-LVAd1^{c/} | | | | | | |
| 0 | 4,32 ± 0,02 | 4,34 ± 0,04 | 4,31 ± 0,03 | 4,44 ± 0,03 | 4,36 ± 0,09 | 4,35 ± 0,09 |
| 75 | 4,32 ± 0,05 | 4,30 ± 0,05 | 4,22 ± 0,02 | 4,32 ± 0,02 | 4,14 ± 0,02 | 4,13 ± 0,01 |
| 150 | 4,31 ± 0,01 | 4,27 ± 0,05 | 4,21 ± 0,04 | 4,12 ± 0,11 | 4,20 ± 0,14 | 4,19 ± 0,07 |
| 300 | 4,22 ± 0,06 | 4,21 ± 0,07 | 4,13 ± 0,03 | 4,12 ± 0,02 | 4,06 ± 0,04 | 4,06 ± 0,01 |
| 600 | 4,16 ± 0,04 | 4,12 ± 0,08 | 4,11 ± 0,04 | 4,04 ± 0,03 | 4,07 ± 0,07 | 4,07 ± 0,03 |

^{a/} Amostras com 80 % da Capacidade de Campo; ^{b/} Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico muito argiloso; ^{c/} Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico franco arenoso.

Outros autores já demonstraram esse efeito definidor de potencial de superfície do Si, causando alteração do ponto de carga zero (PCZ) das superfícies minerais onde é adsorvido (Hingston; Posner; Quirk, 1972; Davis; Chen; Edwards, 2002; Garman; Luxton; Eick, 2004; Luxton; Tadanier; Eick, 2006; Hiemstra; Barnett; van Riemsdijk, 2007).

Como o processo de secagem das amostras favorece fenômenos de adsorção, precipitação e polimerização, havia a expectativa de que o tempo de reumedecimento

favoreceria um novo equilíbrio, levando mais Si para a solução do solo e aumentando a extração de Si. Porém, o processo de secagem e reumedecimento levou à diminuição dos $tdSi$ provavelmente por favorecer processos de adsorção. Ou seja, ao invés de favorecer a manutenção de mais Si em solução, o processo de secagem e preparo da amostra provavelmente expôs novas superfícies dos minerais e o tempo de reumedecimento representou maior tempo de contato do Si com essas superfícies, favorecendo assim processos de adsorção específica de Si. Portanto, o reumedecimento de uma amostra de solo previamente seca e preparada (TFSA) desfavorece a extração de Si.

Com relação ao poder tampão (fator capacidade) dos solos, outros oxiânions como o fosfato, também passível de adsorção específica em solos tropicais, apresentam correlação inversa entre essa propriedade e sua concentração na solução do solo (Novais; Smith; Nunes, 2007). Porém, a relação do Si com o tamponamento do solo parece ser um pouco mais complicada. Na média, o solo mais tamponado (11-LVAd3, 78 % de argila) apresentou maiores teores de Si que o solo menos tamponado (2-LVAd1, 17 % de argila) (Quadro 5). Ao contrário do fosfato, alguns minerais presentes nesses solos são fontes de Si, em especial a caulinita que proporcionalmente é o mineral que domina a fração argila do solo 11-LVAd3. Assim, não apenas esse solo apresenta proporcionalmente mais caulinita em sua fração argila senão que também é um solo com 78 % de argila. Isso ajudaria a explicar a maior disponibilidade de Si no solo mais argiloso.

Nesse contexto, Camargo et al. (2005) obtiveram maiores extrações na seguinte ordem: solos muito argilosos > argilosos > texturas médias > arenosos quando avaliaram Si disponível em vários solos do Triângulo Mineiro brasileiro, atribuindo essa resposta a uma maior extração de Si da fração argila. Gibson (1994), estudando cinética de Si e liberação de Al em diferentes solos australianos, encontrou maiores teores de Si em extrações sucessivas com $CaCl_2$ 10 mmol L⁻¹ quanto mais finas eram as partículas do solo. Da mesma maneira, Babu et al. (2016) em solos de Louisiana, Estados Unidos, encontrou maiores extrações de Si em solos mais argilosos quando comparados com solos de texturas médias. Crusciol et al. (2018), avaliando solos de diferentes regiões de São Paulo, mostraram que o Si solúvel aumentou na seguinte ordem: solos arenosos < franco arenosos < argilosos. Contudo, nem sempre existe uma correlação positiva entre

os teores de argila e a disponibilidade de Si, sendo mais adequado analisar o tipo de solo e a sua mineralogia (Camargo et al., 2005; Crusciol et al., 2018).

Finalmente, além dos tempos de reumedecimento favorecerem a adsorção do Si e diminuírem sua disponibilidade, eles também levam à uma menor taxa de recuperação de Si pelo extrator (*trSi*). De acordo com as equações ajustadas para cada tempo de reumedecimento em função das *dSi*, quanto maior esse tempo menor é o coeficiente da regressão indicando menor recuperação (Quadro 8). Porém, é interessante notar que para o tratamento sem secagem a taxa de recuperação do Si (Quadro 8), assim como os próprios teores de Si extraídos (Quadro 5) são bastante semelhantes para os dois solos. Assim, parece que o poder de tamponamento do solo 2-LVAd1 começou a ser expresso apenas depois de passar pelo processo de secagem e preparo da amostra.

Quadro 8. Equações dos teores de Si recuperado pelo extrator Cloreto de Cálcio (*tdSi-CaCl₂*) (\hat{y} , mg dm⁻³) em função das doses de Si (*dSi*) (x, mg dm⁻³) aplicadas nos diferentes tempos de reumedecimento após secagem e sem secagem e taxa de recuperação de Si por Cloreto de Cálcio (*trSi-CaCl₂*).

| 11 - LVAd3 | | | |
|-------------------|-----------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| | Equação | R² | <i>trSi-CaCl₂</i> |
| Sem secagem | $y = 8,45 + 0,0687^{**} x$ | 0,94 | 0,069 |
| 1 h | $y = 9,67 + 0,0589^{**} x$ | 0,93 | 0,059 |
| 12 h | $y = 11,46 + 0,0582^{**} x$ | 0,89 | 0,058 |
| 48 h | $y = 8,24 + 0,0546^{**} x$ | 0,94 | 0,055 |
| 96 h | $y = 9,13 + 0,0578^{**} x$ | 0,91 | 0,058 |
| 144 h | $y = 7,50 + 0,0480^{**} x$ | 0,91 | 0,048 |
| 2-LVAd1 | | | |
| Sem secagem | $y = 12,06 + 0,0678^{**} x$ | 0,89 | 0,068 |
| 1 h | $y = 12,37 + 0,0348^{**} x$ | 0,76 | 0,035 |
| 12 h | $y = 10,99 + 0,0386^{**} x$ | 0,78 | 0,039 |
| 48 h | $y = 9,11 + 0,0263^{**} x$ | 0,71 | 0,026 |
| 96 h | $y = 9,61 + 0,0274^{**} x$ | 0,69 | 0,027 |
| 144 h | $y = 8,57 + 0,0219^{**} x$ | 0,64 | 0,022 |

Dessa maneira, parece ser necessário que se desenvolva uma medida para o poder tampão de Si dos solos, a exemplo do que se tem com o P-rem para fósforo (Alvarez V et al., 2000). Pode ser que o próprio P-rem tenha uma boa correlação com

uma possível medida de Si-rem, mas as diferenças apontadas neste trabalho sugerem que esse relação não seja tão simples e nem direta. Uma medida de Si-rem poderia ser muito útil para ajudar a compreender melhor a dinâmica do Si nos diferentes solos brasileiros e da sua própria disponibilidade.

4.3 Extratores para determinar disponibilidade de Si no solo

4.3.1 Teores de Si disponível no solo e taxas de recuperação pelos extratores Cloreto de Cálcio, Ácido Acético, Carbonato de Amônio e Mehlich-3

O teores de silício disponível (*tdSi*) em função das doses (*dSi*) aplicadas e os preparos de amostras (pA) são apresentados no Quadro 9.

Quadro 9. Teor de Si disponível (*tdSi*) pelos extratores Cloreto de Cálcio (*tdSi-CaCl₂*), Ácido Acético (*tdSi-AA*), Carbonato de Amônio (*tdSi-CA*) e Mehlich-3 (*tdSi-M3*) em função das doses de Si (*dSi*) aplicadas a cada solo e os dois preparos de amostra (pA).

| Solo | pA-SCC ^{a/} | | | | pA-SS ^{b/} | | | |
|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|--------|---------------------------------|--------|--------|--------|
| | d0 ^{c/} | d300 ^{d/} | d600 ^{e/} | Média | d0 | d300 | d600 | Média |
| <i>tdSi-CaCl₂</i> | | | | | | | | |
| mg dm ⁻³ | | | | | | | | |
| 1-PVd | 4,47 | 26,55 | 48,61 | 26,54 | 6,09 | 22,35 | 40,62 | 23,02 |
| 2-LVAd1 | 2,83 | 26,25 | 32,77 | 20,62 | 3,32 | 24,13 | 25,12 | 17,52 |
| 3-LAe | 8,74 | 21,36 | 21,93 | 17,35 | 8,10 | 15,52 | 15,65 | 13,09 |
| 4-LVAd2 | 13,34 | 26,82 | 46,49 | 28,89 | 13,46 | 27,68 | 40,33 | 27,15 |
| 5-LVe | 8,46 | 22,71 | 37,24 | 22,80 | 12,58 | 31,26 | 40,63 | 28,16 |
| 6-CXd | 3,42 | 13,29 | 19,95 | 12,22 | 4,89 | 15,92 | 21,66 | 14,16 |
| 7-RLe | 40,67 | 44,66 | 51,38 | 45,57 | 50,65 | 62,98 | 64,17 | 59,27 |
| 8-LVdf | 5,25 | 25,18 | 36,95 | 22,46 | 5,92 | 26,09 | 33,00 | 21,67 |
| 9-LAd | 6,28 | 25,67 | 45,14 | 25,70 | 9,66 | 33,69 | 43,57 | 28,97 |
| 10-LVj | 2,89 | 21,30 | 36,09 | 20,09 | 2,71 | 20,96 | 29,24 | 17,64 |
| 11-LVAd3 | 4,72 | 26,80 | 51,86 | 27,79 | 4,76 | 18,61 | 33,13 | 18,83 |
| 12-LVAh | 15,35 | 26,09 | 31,40 | 24,28 | 21,57 | 34,32 | 37,14 | 31,01 |
| <i>tdSi-AA</i> | | | | | | | | |
| mg dm ⁻³ | | | | | | | | |
| 1-PVd | 46,47 | 129,46 | 166,95 | 114,29 | 85,26 | 179,90 | 222,69 | 162,62 |
| 2-LVAd1 | 25,78 | 96,93 | 100,30 | 74,34 | 47,11 | 130,41 | 134,95 | 104,15 |
| 3-LAe | 17,46 | 38,35 | 34,01 | 29,94 | 42,15 | 60,18 | 63,70 | 55,35 |

| | | | | | | | | |
|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 4-LVAd2 | 69,66 | 116,95 | 149,43 | 112,01 | 135,92 | 193,79 | 215,90 | 181,87 |
| 5-LVe | 48,77 | 89,22 | 119,15 | 85,71 | 107,68 | 157,88 | 188,63 | 151,40 |
| 6-CXd | 23,95 | 58,93 | 70,17 | 51,01 | 54,77 | 98,38 | 114,16 | 89,10 |
| 7-RLe | 79,16 | 112,71 | 125,33 | 105,73 | 158,50 | 179,79 | 208,60 | 182,30 |
| 8-LVdf | 19,60 | 69,61 | 90,70 | 59,97 | 49,51 | 126,58 | 152,37 | 109,48 |
| 9-LAd | 17,61 | 55,71 | 86,05 | 53,13 | 46,19 | 116,97 | 143,38 | 102,18 |
| 10-LVj | 30,02 | 124,25 | 164,14 | 106,14 | 52,57 | 131,33 | 179,84 | 121,25 |
| 11-LVAd3 | 64,19 | 164,04 | 212,51 | 146,91 | 123,20 | 190,57 | 259,11 | 190,96 |
| 12-LVAh | 42,18 | 73,13 | 76,70 | 64,00 | 96,24 | 126,52 | 142,10 | 121,62 |
| tdSi-CA | | | | | | | | |
| mg dm ⁻³ | | | | | | | | |
| 1-PVd | 3,41 | 28,31 | 64,19 | 31,97 | 4,55 | 22,11 | 57,61 | 28,09 |
| 2-LVAd1 | 4,52 | 38,38 | 40,07 | 27,65 | 5,36 | 30,36 | 30,03 | 21,92 |
| 3-LAe | 6,36 | 32,65 | 30,48 | 23,16 | 6,06 | 21,91 | 22,18 | 16,72 |
| 4-LVAd2 | 9,26 | 33,76 | 54,55 | 32,52 | 9,80 | 30,59 | 46,41 | 28,93 |
| 5-LVe | 3,76 | 18,09 | 40,42 | 20,76 | 5,83 | 18,50 | 33,34 | 19,22 |
| 6-CXd | 2,37 | 11,30 | 18,04 | 10,57 | 3,59 | 10,81 | 16,41 | 10,27 |
| 7-RLe | 16,91 | 25,51 | 37,80 | 26,74 | 21,63 | 30,41 | 44,77 | 32,27 |
| 8-LVdf | 4,92 | 22,23 | 30,23 | 19,13 | 7,63 | 23,88 | 31,57 | 21,02 |
| 9-LAd | 7,44 | 18,55 | 34,47 | 20,15 | 5,30 | 19,69 | 28,42 | 17,80 |
| 10-LVj | 6,59 | 32,60 | 51,20 | 30,13 | 6,84 | 27,18 | 34,12 | 22,71 |
| 11-LVAd3 | 4,57 | 31,77 | 69,36 | 35,23 | 6,09 | 23,88 | 49,61 | 26,52 |
| 12-LVAh | 8,00 | 14,08 | 17,61 | 13,23 | 9,95 | 15,17 | 15,35 | 13,49 |
| tdSi-M3 | | | | | | | | |
| mg dm ⁻³ | | | | | | | | |
| 1-PVd | 270,21 | 516,12 | 580,49 | 455,60 | 322,23 | 557,94 | 723,54 | 534,57 |
| 2-LVAd1 | 98,77 | 273,19 | 310,90 | 227,62 | 155,36 | 329,46 | 343,16 | 275,99 |
| 3-LAe | 460,56 | 661,11 | 716,56 | 612,74 | 580,25 | 779,94 | 768,90 | 709,69 |
| 4-LVAd2 | 444,31 | 611,08 | 675,24 | 576,87 | 482,10 | 671,28 | 711,96 | 621,78 |
| 5-LVe | 366,02 | 460,24 | 493,70 | 439,99 | 405,09 | 554,01 | 584,28 | 514,46 |
| 6-CXd | 213,81 | 332,35 | 385,14 | 310,43 | 267,95 | 414,54 | 444,92 | 375,80 |
| 7-RLe | 408,73 | 477,98 | 608,85 | 498,52 | 502,81 | 575,78 | 529,47 | 536,02 |
| 8-LVdf | 63,29 | 218,91 | 229,95 | 170,72 | 129,44 | 277,09 | 311,82 | 239,45 |
| 9-LAd | 39,82 | 128,72 | 225,71 | 131,42 | 106,92 | 218,03 | 275,18 | 200,04 |
| 10-LVj | 59,26 | 224,43 | 359,44 | 214,37 | 117,44 | 299,50 | 387,98 | 268,31 |
| 11-LVAd3 | 361,78 | 503,16 | 744,39 | 536,44 | 368,44 | 605,63 | 690,18 | 554,75 |
| 12-LVAh | 201,91 | 279,45 | 323,85 | 268,41 | 287,92 | 356,01 | 402,00 | 348,65 |

^{a/} pA-SCC= Amostras de solo em capacidade de campo; ^{b/} pA-SS= Amostras de solo seco; ^{c/}0 mg dm⁻³; ^{d/}300 mg dm⁻³; ^{e/}600 mg dm⁻³ de Si.

Pelo observado, houve grande variabilidade entre os *tdSi* obtidos por cada extrator seguindo a seguinte ordem: M3 > AA > CA \cong CaCl₂, indicando que a

quantidade de Si extraído varia dependendo do extrator utilizado para solubilizar o Si do solo (Berthelsen; Kordorfer, 2005). Grande variação em extrações de Si usando diversos extratores também foram obtidas por Berthelsen, Noble e Garside (2001) e Miles et al. (2014) trabalhando com solos dedicados à produção de cana-de-açúcar na Austrália e na África do Sul, respectivamente. Estas diferenças provavelmente refletem a capacidade diferenciada que tem cada extrator de atuar e extrair Si nos diferentes componentes da matriz do solo (Berthelsen; Kordorfer, 2005; Pereira et al., 2007; Crusciol et al., 2018).

Os menores *tdSi* obtidos utilizando CaCl_2 (Quadro 9) e maiores extrações com soluções extratoras ácidas também foram constatados em outras pesquisas. Por exemplo, van Raij e Camargo (1973) procurando avaliar sílica solúvel, trabalharam com 44 perfis de solo do estado de São Paulo no Brasil usando como extrator água, CaCl_2 2,5 mmol L^{-1} e CaCl_2 10 mmol L^{-1} . Eles constataram que a extração de Si seguiu a ordem: água destilada > CaCl_2 2,5 mmol L^{-1} > CaCl_2 10 mmol L^{-1} em uma relação 100:92:86, indicando que o segundo e terceiro extrator obtiveram um 8 e 14 % menos de Si respectivamente, quando comparados com a água. Porém, os autores não recomendaram o uso da água como um possível extrator porque provocava a dispersão das partículas de argila pela baixa força iônica da solução (Iler, 1979; Berthelsen; Kordorfer, 2005), razão pela qual seria necessária uma centrifugação para a separação dos extratos.

Pereira et al. (2004) em estudo desenvolvido no Brasil, avaliaram CaCl_2 2,5 mmol L^{-1} e ácido acético 0,5 mol L^{-1} para determinar Si em um Neossolo Quartzarênico depois da aplicação de diferentes fontes incluindo escórias, silicatos, termofosfatos e wollastonita (como padrão), reportando superestimções do segundo. Esse resultado foi atribuído ao fato de que, por exemplo, no tratamento com escoria que liberou mais Si quando foi usado ácido acético como extrator, as plantas não apresentaram a mesma resposta. Isso devido à solubilidade do Si na própria fonte pelo ácido acético, que na realidade, não está disponível para a planta. Porém, eles indicaram que quando foi usada wollastonita o problema não se apresentou, já que essa fonte é praticamente insolúvel em ácido fraco, resultado também corroborado por Babu et al. (2016).

Camargo et al. (2005), também no Brasil, em estudo desenvolvido em casa de vegetação avaliaram água destilada, ácido acético 0,5 mol L^{-1} e CaCl_2 10 mmol L^{-1} como extratores de Si disponível em seis solos coletados de áreas sob vegetação nativa

do Triângulo Mineiro. Eles determinaram que o ácido acético $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ extraía muito mais Si do que a água destilada e o CaCl_2 , atribuindo esse resultado a maiores extrações da fração argila principalmente nos solos argilosos. Da mesma forma, Camargo, Korndörfer e Pereira (2007) estudaram a solubilidade de Si em solos incubados com doses de calcário e Si. Para isso, trabalharam em casa de vegetação com oito solos do Triângulo Mineiro. A avaliação do Si disponível no solo foi feita utilizando três extratores cuja ordem de extração foi: ácido acético $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ > água destilada > CaCl_2 10 mmol L^{-1} , sendo que, similar ao reportado por van Raij e Camargo (1973) e Crusciol et al. (2018), a água destilada apresentou problemas de dispersão. A maior extração pelo ácido acético quando comparado com o CaCl_2 , foi relacionado pelos autores com a mudança de pH, porque contrariamente ao CaCl_2 que tem um pH mais próximo à solução do solo, o ácido acético promove uma diminuição do pH até valores de 1,0 - 2,0. Este fato provavelmente favorece uma maior formação do complexo silico-molibdico na determinação do Si disponível pelo método do azul de molibdênio, que só acontece em meio ácido, aumentando assim a concentração de Si extraído. Sendo assim, os autores consideraram ao CaCl_2 com potencial de utilização para avaliar o silício disponível no solo. No caso do ácido acético, sugeriram que não seja usado tanto pela influencia do pH nos teores extraídos, assim como por sua capacidade de extrair Si de silicatos e escórias de baixa solubilidade aplicados ao solo, como comprovado por Pereira et al. (2004) e Haynes, Belyaeva e Kingston (2013).

Neste contexto, Xu et al. (2001) com os objetivos de determinar os efeitos da aplicação de fertilizantes de Si sobre trigo cultivado em solos calcários na China e selecionar um método adequado para avaliar a disponibilidade de Si, além do estabelecimento dos níveis críticos, avaliaram quatro extratores. A ordem de extração de Si do solo foi: ácido cítrico $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ > tampão de acetato de sódio (pH4) > acetato de sódio $0,19 \text{ mol L}^{-1}$ > bicarbonato de sódio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$. A maior extração de Si pelos extratores ácidos também foi atribuída a que em solos calcários há uma grande quantidade de silicatos de cálcio que são solúveis em soluções ácidas, mas dificilmente absorvidos pelas plantas.

Por outra parte, Babu et al. (2016) avaliaram os extratores ácido acético $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, CaCl_2 10 mmol L^{-1} , acetato de sódio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, água deionizada, acetato de amônio

0,5 mol L⁻¹ e ácido cítrico 0,1 mol L⁻¹ em seis solos de Louisiana nos Estados Unidos. Seus resultados mostraram que a quantidade de Si extraído pelos extratores nem sempre foi proporcional à taxa de Si aplicada. Além disso, as soluções ácidas extraíram maior quantidade de Si do solo do que a água deionizada e o cloreto de cálcio, resultado também atribuído à capacidade, por exemplo, do ácido acético de extrair o Si presente em alguns materiais como silicatos de Ca e Mg. Assim a ordem de extração foi: ácido cítrico > ácido acético > acetato de sódio > acetato de amônio > água deionizada > CaCl₂.

Como visto, enquanto não existe informação a respeito da atuação dos extratores M3 e CA com relação às formas de Si extraídas do solo por não serem estudados para esse fim, existe vasta informação com relação ao CaCl₂ e AA. Assim, o CaCl₂ que é uma solução salina diluída, tem a capacidade de extrair as formas mais solúveis fornecendo uma medida do Si na solução do solo e que está prontamente disponível para as plantas (Haysom; Chapman, 1975; Berthelsen; Noble; Garside, 2001; Berthelsen; Kordorfer, 2005). Já o AA atua provavelmente extraíndo tanto o Si em solução quanto parte do Si trocável (Berthelsen; Noble; Garside, 2001; Tubaña; Heckman, 2015), além de solubilizar os polímeros mais simples que são formados por pequenas cadeias de Si como consequência das mudanças no pH do solo promovidas pelo extrator (Hallmark; Wilding; Smeck, 1982; Snyder, 2001; Berthelsen; Kordorfer, 2005).

Pelo exposto e como no presente estudo foi utilizado silicato de potássio solúvel com pH estabilizado para evitar sua influência na disponibilidade do elemento (Iler, 1955, 1979), as maiores taxas de extração dos extratores ácidos podem estar relacionadas a diferentes razões. No caso do AA já foi detalhado, entanto que para M3 que obteve as maiores extrações, sendo em alguns casos até superiores do que a maior dose aplicada (600 mg dm⁻³ de Si), parece que o extrator tem capacidade de extrair parte do Si adsorvido e estrutural dos minerais da fração argila do solo, principalmente da caulinita. Assim, por exemplo, no solo 3-LAe com presença expressiva de caulinita (Figura 1), a extração foi muito maior quando comparada com o resto de solos, parecendo ser uma forma preferencial de Si para M3. Nessa linha, Berthelsen, Noble e Garside (2001) e Berthelsen e Kordorfer (2005) indicam que extratores muito ácidos

como o ácido cítrico e ácido sulfúrico, podem extrair o Si adsorvido de hidróxidos e, em alguma extensão, o Si estrutural de alguns minerais do solo.

Com relação à *trSi* foram obtidas diferentes declividades das curvas de *tdSi* em função das *dSi* para cada solo estudado, sendo que o modelo linear foi o que apresentou o melhor ajuste (Quadro 10). As maiores taxas de recuperação foram obtidas pelo extrator M3 e as menores pelo CaCl₂.

Quadro 10. Equações dos teores de Si recuperado pelos extratores CaCl₂ (*tdSi*- CaCl₂), AA (*tdSi*-AA), CA (*tdSi*-CA) e M3 (*tdSi*-M3) em função das doses de Si (*dSi*) (x, mg dm⁻³) aplicadas a cada solo e os dois preparos de amostra (pA) e taxa de recuperação de Si por CaCl₂ (*trSi*- CaCl₂), AA (*trSi*-AA), CA (*trSi*-CA) e M3 (*trSi*-M3).

| Solo |pA-SCC ^{a/} | | | pA-SS ^{b/} | | |
|---|-----------------------------------|----------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------|------------------------------------|
| | Equação | R ² | <i>trSi</i> - CaCl ₂ | Equação | R ² | <i>trSi</i> - CaCl ₂ |
| Cloreto de Cálcio (CaCl₂) | | | | | | |
| 1-PVd | $\hat{y} = 4,47 + 0,0736^{**} x$ | 1,00 | 0,074 | $\hat{y} = 5,76 + 0,0575^{**} x$ | 0,95 | 0,058 |
| 2-LVAd1 | $\hat{y} = 5,64 + 0,0499^{**} x$ | 0,87 | 0,050 | $\hat{y} = 6,63 + 0,0363^{**} x$ | 0,78 | 0,036 |
| 3-LAe | $\hat{y} = 10,75 + 0,022^{**} x$ | 0,76 | 0,022 | $\hat{y} = 9,31 + 0,0126^{**} x$ | 0,72 | 0,013 |
| 4-LVAd2 | $\hat{y} = 12,31 + 0,0552^{**} x$ | 0,98 | 0,055 | $\hat{y} = 13,72 + 0,0448^{**} x$ | 0,97 | 0,045 |
| 5-LVe | $\hat{y} = 8,41 + 0,048^{**} x$ | 0,99 | 0,048 | $\hat{y} = 14,13 + 0,0468^{**} x$ | 0,96 | 0,047 |
| 6-CXd | $\hat{y} = 3,95 + 0,0275^{**} x$ | 0,95 | 0,028 | $\hat{y} = 5,77 + 0,0280^{**} x$ | 0,95 | 0,028 |
| 7-RLe | $\hat{y} = 40,22 + 0,0178^{**} x$ | 0,91 | 0,018 | $\hat{y} = 52,51 + 0,0225^{**} x$ | 0,73 | 0,023 |
| 8-LVdf | $\hat{y} = 6,61 + 0,0528^{**} x$ | 0,96 | 0,053 | $\hat{y} = 8,13 + 0,0451^{**} x$ | 0,90 | 0,045 |
| 9-LAd | $\hat{y} = 6,27 + 0,0648^{**} x$ | 0,94 | 0,065 | $\hat{y} = 12,02 + 0,0565^{**} x$ | 0,91 | 0,057 |
| 10-LVj | $\hat{y} = 3,49 + 0,0553^{**} x$ | 0,99 | 0,055 | $\hat{y} = 4,37 + 0,0442^{**} x$ | 0,92 | 0,044 |
| 11-LVAd3 | $\hat{y} = 4,22 + 0,0786^{**} x$ | 0,91 | 0,079 | $\hat{y} = 4,64 + 0,0473^{**} x$ | 0,88 | 0,047 |
| 12-LVAh | $\hat{y} = 16,25 + 0,0268^{**} x$ | 0,95 | 0,027 | $\hat{y} = 23,22 + 0,0260^{**} x$ | 0,85 | 0,026 |
| Média | | | 0,048 | | | 0,039 |
| Ácido Acético (AA) | | | | | | |
| | pA-SCC ^a | | | pA-SS ^b | | |
| 1-PVd | $\hat{y} = 54,05 + 0,2008^{**} x$ | 0,93 | 0,201 | $\hat{y} = 93,90 + 0,2291^{**} x$ | 0,94 | 0,229 |
| 2-LVAd1 | $\hat{y} = 37,08 + 0,1242^{**} x$ | 0,76 | 0,124 | $\hat{y} = 60,23 + 0,1464^{**} x$ | 0,75 | 0,146 |
| 3-LAe | $\hat{y} = 21,67 + 0,0276^{**} x$ | 0,52 | 0,028 | $\hat{y} = 44,57 + 0,0359^{**} x$ | 0,72 | 0,036 |
| 4-LVAd2 | $\hat{y} = 72,13 + 0,1330^{**} x$ | 0,82 | 0,133 | $\hat{y} = 141,88 + 0,1333^{**} x$ | 0,80 | 0,133 |
| 5-LVe | $\hat{y} = 50,52 + 0,1173^{**} x$ | 0,94 | 0,117 | $\hat{y} = 110,92 + 0,1349^{**} x$ | 0,96 | 0,135 |
| 6-CXd | $\hat{y} = 27,90 + 0,0770^{**} x$ | 0,91 | 0,077 | $\hat{y} = 59,41 + 0,0990^{**} x$ | 0,89 | 0,099 |
| 7-RLe | $\hat{y} = 82,65 + 0,0769^{**} x$ | 0,82 | 0,077 | $\hat{y} = \bar{y} = 182,30$ | - | - |
| 8-LVdf | $\hat{y} = 24,42 + 0,1185^{**} x$ | 0,90 | 0,119 | $\hat{y} = 58,05 + 0,1714^{**} x$ | 0,90 | 0,171 |
| 9-LAd | $\hat{y} = 18,91 + 0,1141^{**} x$ | 0,96 | 0,114 | $\hat{y} = 53,58 + 0,1620^{**} x$ | 0,91 | 0,162 |
| 10-LVj | $\hat{y} = 39,08 + 0,2235^{**} x$ | 0,94 | 0,224 | $\hat{y} = 57,61 + 0,2121^{**} x$ | 0,92 | 0,212 |

| | | | | | | |
|-----------------|-----------------------------------|------|-------|------------------------------------|------|-------|
| 11-LVAd3 | $\hat{y} = 72,76 + 0,2472^{**} x$ | 0,90 | 0,247 | $\hat{y} = 123,01 + 0,2265^{**} x$ | 0,81 | 0,227 |
| 12-LVAh | $\hat{y} = 46,74 + 0,0575^{**} x$ | 0,78 | 0,058 | $\hat{y} = 98,69 + 0,0764^{**} x$ | 0,92 | 0,076 |
| Média | | | 0,126 | | | 0,148 |

Carbonato de Amônio (CA)

| | pA-SCC ^a | | | pA-SS ^b | | |
|-----------------|-----------------------------------|------|-------|------------------------------------|------|-------|
| 1-PVd | $\hat{y} = 1,58 + 0,1013^{**} x$ | 0,96 | 0,101 | $\hat{y} = 1,56 + 0,0884^{**} x$ | 0,94 | 0,088 |
| 2-LVAd1 | $\hat{y} = 9,88 + 0,0593^{**} x$ | 0,78 | 0,059 | $\hat{y} = 9,58 + 0,0411^{**} x$ | 0,70 | 0,041 |
| 3-LAe | $\hat{y} = 11,10 + 0,0402^{**} x$ | 0,67 | 0,040 | $\hat{y} = 8,66 + 0,0269^{**} x$ | 0,65 | 0,027 |
| 4-LVAd2 | $\hat{y} = 9,88 + 0,0755^{**} x$ | 0,94 | 0,076 | $\hat{y} = 10,63 + 0,0610^{**} x$ | 0,95 | 0,061 |
| 5-LVe | $\hat{y} = 2,43 + 0,0611^{**} x$ | 0,94 | 0,061 | $\hat{y} = 5,4731 + 0,0458^{**} x$ | 0,98 | 0,046 |
| 6-CXd | $\hat{y} = 2,74 + 0,0261^{**} x$ | 0,95 | 0,026 | $\hat{y} = 3,86 + 0,0214^{**} x$ | 0,93 | 0,021 |
| 7-RLe | $\hat{y} = 16,29 + 0,0348^{**} x$ | 0,92 | 0,035 | $\hat{y} = 20,70 + 0,0386^{**} x$ | 0,92 | 0,039 |
| 8-LVdf | $\hat{y} = 6,47 + 0,0422^{**} x$ | 0,92 | 0,042 | $\hat{y} = 9,05 + 0,0399^{**} x$ | 0,93 | 0,040 |
| 9-LAd | $\hat{y} = 6,64 + 0,0450^{**} x$ | 0,80 | 0,045 | $\hat{y} = 6,25 + 0,0385^{**} x$ | 0,79 | 0,039 |
| 10-LVj | $\hat{y} = 7,82 + 0,0743^{**} x$ | 0,98 | 0,074 | $\hat{y} = 9,08 + 0,0455^{**} x$ | 0,86 | 0,046 |
| 11-LVAd3 | $\hat{y} = 2,84 + 0,1080^{**} x$ | 0,92 | 0,108 | $\hat{y} = 4,76 + 0,0725^{**} x$ | 0,90 | 0,073 |
| 12-LVAh | $\hat{y} = 8,42 + 0,0160^{**} x$ | 0,92 | 0,016 | $\hat{y} = 10,79 + 0,0090^{**} x$ | 0,72 | 0,009 |
| Média | | | 0,057 | | | 0,044 |

Mehlich-3 (M3)

| | pA-SCC ^a | | | pA-SS ^b | | |
|-----------------|------------------------------------|------|-------|------------------------------------|------|-------|
| 1-PVd | $\hat{y} = 300,47 + 0,5171^{**} x$ | 0,85 | 0,517 | $\hat{y} = 333,92 + 0,6688^{**} x$ | 0,96 | 0,669 |
| 2-LVAd1 | $\hat{y} = 121,55 + 0,3535^{**} x$ | 0,87 | 0,354 | $\hat{y} = 182,09 + 0,3130^{**} x$ | 0,71 | 0,313 |
| 3-LAe | $\hat{y} = 484,74 + 0,4267^{**} x$ | 0,77 | 0,427 | $\hat{y} = 615,37 + 0,3144^{**} x$ | 0,51 | 0,314 |
| 4-LVAd2 | $\hat{y} = 461,41 + 0,3849^{**} x$ | 0,73 | 0,385 | $\hat{y} = 506,85 + 0,3831^{**} x$ | 0,74 | 0,383 |
| 5-LVe | $\hat{y} = 376,15 + 0,2128^{**} x$ | 0,63 | 0,213 | $\hat{y} = 424,86 + 0,2987^{**} x$ | 0,69 | 0,299 |
| 6-CXd | $\hat{y} = 224,77 + 0,2856^{**} x$ | 0,89 | 0,286 | $\hat{y} = 287,32 + 0,2949^{**} x$ | 0,80 | 0,295 |
| 7-RLe | $\hat{y} = 398,46 + 0,3335^{**} x$ | 0,68 | 0,334 | $\hat{y} = \bar{y} = 536,02$ | - | - |
| 8-LVdf | $\hat{y} = 87,387 + 0,2778^{**} x$ | 0,73 | 0,278 | $\hat{y} = 148,26 + 0,3040^{**} x$ | 0,86 | 0,304 |
| 9-LAd | $\hat{y} = 38,47 + 0,3098^{**} x$ | 0,98 | 0,310 | $\hat{y} = 115,91 + 0,2804^{**} x$ | 0,95 | 0,280 |
| 10-LVj | $\hat{y} = 64,28 + 0,5003^{**} x$ | 0,99 | 0,500 | $\hat{y} = 133,03 + 0,4509^{**} x$ | 0,96 | 0,451 |
| 11-LVAd3 | $\hat{y} = 345,13 + 0,6377^{**} x$ | 0,83 | 0,638 | $\hat{y} = 393,88 + 0,5362^{**} x$ | 0,81 | 0,536 |
| 12-LVAh | $\hat{y} = 207,44 + 0,2032^{**} x$ | 0,88 | 0,203 | $\hat{y} = 291,61 + 0,1901^{**} x$ | 0,87 | 0,190 |
| Média | | | 0,370 | | | 0,367 |

** , ** significativo a 5 e 1 %; ns não significativo até 5 %; dSi; d0=0; d1=300 e d2=600 mg dm⁻³; ^{a/} pA-SCC= Amostras de solo em capacidade de campo; ^{b/} pA-SS= Amostras de solo seco.*

Por outra parte, os solos apresentaram respostas lineares em alguns casos e quadráticas em outros com o aumento das dSi adicionadas, independentemente do extrator usado, tanto em amostras úmidas (pA-SCC) como secas (pA-SS) (Quadro 11).

Nesse sentido, com exceção do solo 3-LAe (pA-SCC e extração por AA), 7-RLe (pA-SS e extração por M3) e 12-LVAh (pA-SS e extração por CA), todos os solos responderam à adubação (Quadro 11).

Quadro 11. Contrastes ortogonais para teor de Si disponível (*tdSi*) pelos extratores Cloreto de Cálcio (CaCl₂), Ácido Acético (AA), Carbonato de Amônio (CA) e Mehlich-3 (M3) por efeito das doses de Si dentro dos diferentes solos com e sem preparo de amostra (*dSi d/ Solo com/sem-prep*).

| Solo | <i>dSi d/ Solo com/sem-prep</i> | C dl Si ^{a/} | | C dq Si ^{b/} | | C dl Si ^{a/} | | C dq Si ^{b/} | |
|----------|--|--|----|-----------------------|----|-----------------------|----|-----------------------|----|
| | | Cloreto de Cálcio (CaCl ₂) | | | | Ácido Acético (AA) | | | |
| 1-PVd | <i>dSi d/ S1 sem-prep^{c/}</i> | 44,14 | ** | 0,01 | ns | 120,48 | ** | 22,75 | ** |
| | <i>dSi d/ S1 com-prep^{d/}</i> | 34,52 | ** | -1,00 | ns | 137,44 | ** | 25,92 | ** |
| 2-LVAd1 | <i>dSi d/ S2 sem-prep</i> | 29,94 | ** | 5,63 | ** | 74,52 | ** | 22,59 | ** |
| | <i>dSi d/ S2 com-prep</i> | 21,79 | ** | 6,60 | ** | 87,85 | ** | 26,25 | ** |
| 3-LAe | <i>dSi d/ S3 sem-prep</i> | 13,19 | ** | 4,01 | ** | 16,55 | ns | 8,41 | ns |
| | <i>dSi d/ S3 com-prep</i> | 7,56 | ** | 2,43 | * | 21,55 | * | 4,83 | ns |
| 4-LVAd2 | <i>dSi d/ S4 sem-prep</i> | 33,15 | ** | -2,07 | ns | 79,78 | ** | 4,94 | ns |
| | <i>dSi d/ S4 com-prep</i> | 26,87 | ** | 0,52 | ns | 79,98 | ** | 11,92 | * |
| 5-LVe | <i>dSi d/ S5 sem-prep</i> | 28,78 | ** | -0,09 | ns | 70,38 | ** | 3,51 | ns |
| | <i>dSi d/ S5 com-prep</i> | 28,05 | ** | 3,10 | ** | 80,95 | ** | 6,49 | ns |
| 6-CXd | <i>dSi d/ S6 sem-prep</i> | 16,53 | ** | 1,07 | ns | 46,22 | ** | 7,92 | ns |
| | <i>dSi d/ S6 com-prep</i> | 16,78 | ** | 1,76 | ns | 59,40 | ** | 9,28 | ns |
| 7-RLe | <i>dSi d/ S7 sem-prep</i> | 10,71 | ** | -1,36 | ns | 46,17 | ** | 10,47 | ns |
| | <i>dSi d/ S7 com-prep</i> | 13,51 | ** | 5,57 | ** | 50,10 | ** | -3,75 | ns |
| 8-LVdf | <i>dSi d/ S8 sem-prep</i> | 31,70 | ** | 2,72 | * | 71,09 | ** | 9,64 | ns |
| | <i>dSi d/ S8 com-prep</i> | 27,08 | ** | 4,42 | ** | 102,86 | ** | 17,09 | ** |
| 9-LAd | <i>dSi d/ S9 sem-prep</i> | 38,86 | ** | -0,03 | ns | 68,44 | ** | 2,59 | ns |
| | <i>dSi d/ S9 com-prep</i> | 33,91 | ** | 4,71 | ** | 97,19 | ** | 14,79 | ** |
| 10-LVj | <i>dSi d/ S10 sem-prep</i> | 33,21 | ** | 1,21 | ns | 134,12 | ** | 18,11 | ** |
| | <i>dSi d/ S10 com-prep</i> | 26,53 | ** | 3,32 | ** | 127,27 | ** | 10,08 | ns |
| 11-LVAd3 | <i>dSi d/ S11 sem-prep</i> | 47,14 | ** | -0,99 | ns | 148,32 | ** | 17,13 | ** |
| | <i>dSi d/ S11 com-prep</i> | 28,38 | ** | -0,22 | ns | 135,91 | ** | -0,39 | ns |
| 12-LVAh | <i>dSi d/ S12 sem-prep</i> | 16,05 | ** | 1,81 | ns | 34,53 | ** | 9,13 | ns |
| | <i>dSi d/ S12 com-prep</i> | 15,57 | ** | 3,31 | ** | 45,86 | ** | 4,90 | ns |
| | | Carbonato de Amônio (CA) | | | | Mehlich-3 (M3) | | | |
| 1-PVd | <i>dSi d/ S1 sem-prep</i> | 60,78 | ** | -5,49 | * | 310,27 | ** | 90,77 | ** |
| | <i>dSi d/ S1 com-prep</i> | 53,06 | ** | -8,97 | ** | 401,31 | ** | 35,05 | ns |
| 2-LVAd1 | <i>dSi d/ S2 sem-prep</i> | 35,55 | ** | 10,72 | ** | 212,12 | ** | 45,57 | ** |
| | <i>dSi d/ S2 com-prep</i> | 24,68 | ** | 8,44 | ** | 187,80 | ** | 53,46 | ** |

| | | | | | | | | | |
|-----------------|----------------------------|-------|----|-------|----|--------|----|--------|----|
| 3-LAe | <i>dSi d/ S3 sem-prep</i> | 24,12 | ** | 9,49 | ** | 255,99 | ** | 48,37 | ** |
| | <i>dSi d/ S3 com-prep</i> | 16,12 | ** | 5,19 | ** | 188,65 | ** | 70,25 | ** |
| 4-LVAd2 | <i>dSi d/ S4 sem-prep</i> | 45,29 | ** | 1,24 | ns | 230,93 | ** | 34,20 | * |
| | <i>dSi d/ S4 com-prep</i> | 36,61 | ** | 1,66 | ns | 229,86 | ** | 49,50 | ** |
| 5-LVe | <i>dSi d/ S5 sem-prep</i> | 36,66 | ** | -2,67 | ns | 127,68 | ** | 20,25 | ns |
| | <i>dSi d/ S5 com-prep</i> | 27,50 | ** | -0,72 | ns | 179,20 | ** | 39,55 | * |
| 6-CXd | <i>dSi d/ S6 sem-prep</i> | 15,67 | ** | 0,73 | ns | 171,34 | ** | 21,92 | ns |
| | <i>dSi d/ S6 com-prep</i> | 12,82 | ** | 0,54 | ns | 176,97 | ** | 38,74 | * |
| 7-RLe | <i>dSi d/ S7 sem-prep</i> | 20,89 | ** | -1,84 | ns | 200,12 | ** | -30,80 | ns |
| | <i>dSi d/ S7 com-prep</i> | 23,14 | ** | -2,79 | ns | 26,66 | ns | 59,64 | * |
| 8-LVdf | <i>dSi d/ S8 sem-prep</i> | 25,31 | ** | 3,10 | ns | 166,66 | ** | 48,19 | ** |
| | <i>dSi d/ S8 com-prep</i> | 23,94 | ** | 2,85 | ns | 182,38 | ** | 37,64 | * |
| 9-LAd | <i>dSi d/ S9 sem-prep</i> | 27,02 | ** | -1,61 | ns | 185,89 | ** | -2,69 | ns |
| | <i>dSi d/ S9 com-prep</i> | 23,11 | ** | 1,88 | ns | 168,26 | ** | 17,99 | ns |
| 10-LVj | <i>dSi d/ S10 sem-prep</i> | 44,61 | ** | 2,47 | ns | 300,18 | ** | 10,06 | ns |
| | <i>dSi d/ S10 com-prep</i> | 27,28 | ** | 4,47 | ** | 270,55 | ** | 31,19 | ns |
| 11-LVAd3 | <i>dSi d/ S11 sem-prep</i> | 64,79 | ** | -3,47 | * | 382,61 | ** | -33,28 | * |
| | <i>dSi d/ S11 com-prep</i> | 43,52 | ** | -2,65 | ns | 321,75 | ** | 50,88 | ** |
| 12-LVAh | <i>dSi d/ S12 sem-prep</i> | 9,61 | ** | 0,85 | ns | 121,94 | ** | 11,05 | ns |
| | <i>dSi d/ S12 com-prep</i> | 5,40 | ns | 1,68 | ns | 114,08 | ** | 7,36 | ns |

*, ** significativo a 5 e 1%; ns não significativo até 5%; ^aContraste para dose linear de Si; ^bContraste para dose quadrática de Si; ^cpA-SCC= Amostras de solo em capacidade de campo; ^dpA-SS = Amostras de solo seco.

Estes resultados indicam a capacidade que tiveram todos os extratores para discriminar os diferentes teores de Si no solo como consequência da adubação. Porém, isso só é um indicativo da sua eficiência, não definindo se são bons para a estimação de Si disponível para as plantas (Pereira et al., 2004, 2007). Para isso, é necessário estabelecer as respectivas correlações entre o *tdSi* obtido por cada extrator e o conteúdo de Si da parte aérea da planta (*cSi-PA*) e que será detalhado na seção 4.3.4.

4.3.2 Teores de Si disponível no solo com e sem preparo de amostra

Os resultados evidenciaram que o preparo das amostras de solo influenciou nos *tdSi* obtidos pelos quatro extratores avaliados (Figura 3).

Para o CaCl_2 maiores *tdSi* foram observados em amostras em capacidade de campo (pA-SCC) correspondentes aos solos 1-PVd, 2-LVAd1, 3-Lae, 10-LVj e 11-

LVAd3 (Figura 3a), mostrando a capacidade que tem o extrator de extrair as formas monoméricas de Si da solução do solo. Isso porque quando as amostras foram secas provavelmente a polimerização do elemento foi favorecida diminuindo os *tdSi* obtidos pelo extrator. Já para os solos 5-LVe, 7-RL, 9-LAd e 12-LVAh a resposta foi contrária com maiores *tdSi* em amostras secas (pA-SS) (Figura 3a). Porém, isso poderia estar relacionado aos maiores teores de carbono de compostos orgânicos (CO) desses solos com 3,18, 4,19, 3,10 e 5,30 dag kg⁻¹ respectivamente (Quadro 3), que por sua vez sugerem maiores teores de matéria orgânica, permitindo assim, manter maiores *tdSi* na solução do solo por ser uma das principais fontes de Si em solos intemperizados (Matichenkov; Bocharnikova, 2001; Korndörfer, 2006).

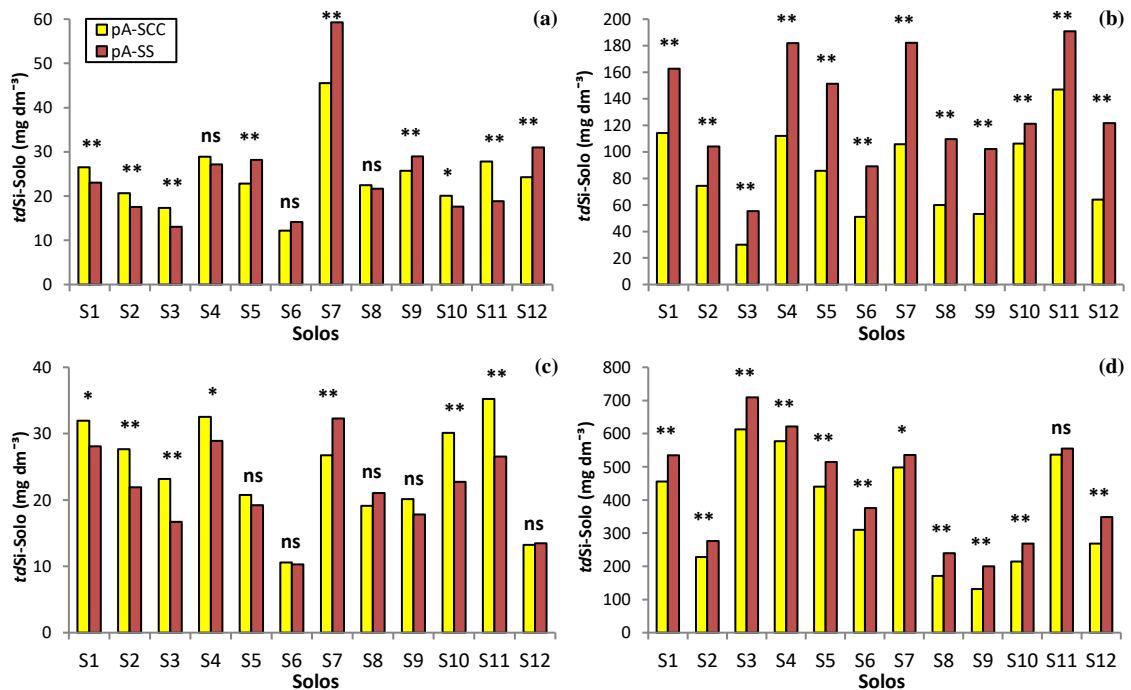


Figura 3. Teores de Si disponível (*tdSi*) pelos extratores (a) Cloreto de Cálcio (CaCl₂), (b) Ácido Acético (AA), (c) Carbonato de Amônio (CA) e (d) Mehlich-3 (M3). S1 = 1-PVd, S2 = 2-LVAd1, S3 = 3-Lae, S4 = 4-LVAd2, S5 = 5-LVe, S6 = 6-CXd, S7 = 7-RLe, S8 = 8-LVdf, S9 = 9-LAd, S10 = 10-LVj, S11 = 11-LVAd3 e S12 = 12-LVAh. pA-SCC= Amostras de solo em capacidade de campo; pA-SS = Amostras de solo seco. *, ** significativo a 5 e 1 %; ns não significativo até 5 %.

No caso do CA os maiores *tdSi* foram obtidos em amostras em capacidade de campo (pA-SCC), sendo a exceção o solo 7-RLe que apresentou maiores *tdSi* em amostras de solo seco (pA-SS) (Figura 3c). O exposto sugere que este extrator teve um comportamento similar ao CaCl_2 em relação à extração preferencial de formas monoméricas da solução do solo.

Finalmente, os extratores AA e M3 mostraram um padrão de comportamento similar entre eles e contrário ao CaCl_2 e CA. Sendo assim, maiores *tdSi* sempre foram observados em amostras secas (pA-SS) (Figura 3b e 3d), evidenciando assim a capacidade que têm esses extratores ácidos de extrair, além das formas monoméricas, algumas formas polimerizadas que seriam formadas por saída de água (Dietzel, 2002) quando as amostras de solo são secas.

4.3.3 Resposta da cultura de arroz à aplicação de Si

A resposta das plantas de arroz às *dSi* aplicadas nos diferentes solos não seguiu um padrão definido. No caso dos solos 5-LVe e 11-LVAd3 a resposta foi negativa, com o controle ($d0 - 0\text{mg dm}^{-3}$) produzindo maior *mMS-PA* que as doses *d1* e *d2*. Para o resto de solos, houve resposta em pelo menos uma das doses de Si aplicadas (Quadro 12). Variabilidade de resposta da cultura de arroz à fertilização silicatada também foi encontrado por Babu et al. (2016).

Contudo, comparando o crescimento das plantas em todos os solos o maior ocorreu no solo 7-RLe que produziu, em média, 541,35 mg/planta, o que representa 99,63 % mais *mMS-PA* do que a média do restante das plantas. A produtividade do arroz no solo 7-RLe provavelmente deve-se à boa disponibilidade de nutrientes desse solo (Quadro 3), apresentando condições adequadas para o crescimento da cultura. Pati et al. (2016) trabalhando com a mesma cultura na Índia, encontraram aumento na concentração e absorção de outros nutrientes devido a aplicação de Si. Assim, eles encontraram um aumento de 33,78 % de Si, 44,4 % de N, 29,3 % de P e 16,5 % de K em grão e 56,6% de Si, 17,3% de N, 48,1% de P e 11,8% de K em palha respectivamente, associando diretamente estes incrementos com a obtenção de um maior rendimento da cultura.

Quadro 12. Produção de matéria seca (*mMS-PA*), teor total de Si (*ttSi-PA*) e conteúdo de Si da parte aérea (*cSi-PA*) de plantas de arroz em função das doses de Si (*dSi*) aplicadas.

| Solo | <i>dSi</i> | | | Média |
|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------|
| | <i>d0^{a/}</i> | <i>d300^{b/}</i> | <i>d600^{c/}</i> | |
| <i>mMS-PA</i> | | | | |
| mg / planta | | | | |
| 1-PVd | 267,93 | 270,16 | 270,47 | 269,52 |
| 2-LVAd1 | 233,78 | 242,58 | 246,87 | 241,08 |
| 3-LAe | 139,69 | 125,35 | 159,44 | 141,49 |
| 4-LVAd2 | 246,03 | 286,48 | 250,92 | 261,14 |
| 5-LVe | 334,11 | 257,70 | 253,76 | 281,86 |
| 6-CXd | 198,63 | 222,34 | 218,41 | 213,13 |
| 7-RLe | 498,91 | 589,71 | 535,42 | 541,35 |
| 8-LVdf | 292,62 | 330,35 | 340,09 | 321,02 |
| 9-LAd | 362,26 | 390,78 | 299,63 | 350,89 |
| 10-LVj | 236,51 | 254,10 | 165,08 | 218,56 |
| 11-LVAd3 | 382,72 | 286,53 | 265,09 | 311,45 |
| 12-LVAh | 378,14 | 348,74 | 391,66 | 372,84 |
| <i>ttSi-PA</i> | | | | |
| g kg⁻¹ | | | | |
| 1-PVd | 4,28 | 11,60 | 12,52 | 9,47 |
| 2-LVAd1 | 3,37 | 9,33 | 9,99 | 7,56 |
| 3-LAe | 5,25 | 5,27 | 6,61 | 5,71 |
| 4-LVAd2 | 7,29 | 12,73 | 12,33 | 10,78 |
| 5-LVe | 8,78 | 11,03 | 13,29 | 11,03 |
| 6-CXd | 2,57 | 6,63 | 7,36 | 5,52 |
| 7-RLe | 16,17 | 20,48 | 20,78 | 19,14 |
| 8-LVdf | 3,15 | 10,67 | 12,32 | 8,72 |
| 9-LAd | 3,54 | 13,33 | 10,91 | 9,26 |
| 10-LVj | 1,65 | 7,44 | 7,73 | 5,61 |
| 11-LVAd3 | 4,71 | 10,19 | 10,16 | 8,35 |
| 12-LVAh | 8,66 | 12,49 | 14,00 | 11,72 |
| <i>cSi-PA</i> | | | | |
| mg / planta | | | | |
| 1-PVd | 1,17 | 3,14 | 3,38 | 2,56 |
| 2-LVAd1 | 0,79 | 2,27 | 2,49 | 1,85 |
| 3-LAe | 0,77 | 0,67 | 1,06 | 0,83 |
| 4-LVAd2 | 1,79 | 3,68 | 3,09 | 2,85 |
| 5-LVe | 2,95 | 2,84 | 3,40 | 3,06 |

| | | | | |
|-----------------|------|-------|-------|-------|
| 6-CXd | 0,52 | 1,47 | 1,63 | 1,21 |
| 7-RLe | 8,05 | 12,07 | 11,14 | 10,42 |
| 8-LVdf | 0,93 | 3,53 | 4,21 | 2,89 |
| 9-LAd | 1,29 | 5,18 | 3,27 | 3,25 |
| 10-LVj | 0,39 | 1,90 | 1,70 | 1,33 |
| 11-LVAd3 | 1,81 | 2,92 | 2,70 | 2,48 |
| 12-LVAh | 3,30 | 4,35 | 5,48 | 4,38 |

^{a/} $d0 = 0 \text{ mg dm}^{-3}$; ^{b/} $d1 = 300 \text{ mg dm}^{-3}$; ^{c/} $d2 = 600 \text{ mg dm}^{-3}$.

Da mesma forma, outros estudos têm sido feitos para estabelecer a resposta do arroz à fertilização silicatada. Barbosa Filho et al. (2001), em um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico (LEd) de textura argilosa, avaliaram três cultivares de arroz e seis doses de Si cuja fonte foi wollastonita (silicato de cálcio) usando como extrator de Si ácido acético $0,5 \text{ mol L}^{-1}$. Assim, todos os cultivares de arroz aumentaram a sua produção de grãos com o aumento da dose de Si. Este resultado foi atribuído ao aumento de pH pela ação corretiva da wollastonita que cria melhores condições de crescimento para as plantas, assim como à maior disponibilidade de Si, Ca e Mg. Outros autores como Korndörfer et al. (1999) trabalhando com solos intemperizados e representativos do cerrado brasileiro e Snyder, Jones e Gascho (1986) trabalhando com Histossolos (solos orgânicos) dos Everglades no sul da Flórida, também atribuíram aumentos na produção de grãos de arroz aos efeitos positivos mencionados.

4.3.4 Correlação entre o teor de Si disponível por cada extrator e o conteúdo de Si na parte aérea das plantas de arroz

Foi feita uma correlação linear entre o $tdSi$ de amostras úmidas (pA-SCC) e secas (pA-SS) e o cSi -PA para cada extrator, como sugerido por Alvarez V. (1996). Os resultados mostraram diferentes R^2 para os quatro extratores. O extrator $CaCl_2$ mostrou os maiores valores de R^2 com 0,39 para amostras úmidas (pA-SCC) e 0,73 para amostras secas (pA-SS). Com menores respostas, foram obtidos R^2 de 0,11 e 0,25 para o AA, 0,04 e 0,15 para CA e 0,05 e 0,06 para M3 em amostras úmidas (pA-SCC) e secas (pA-SS), respectivamente (Figuras 4 e 5).

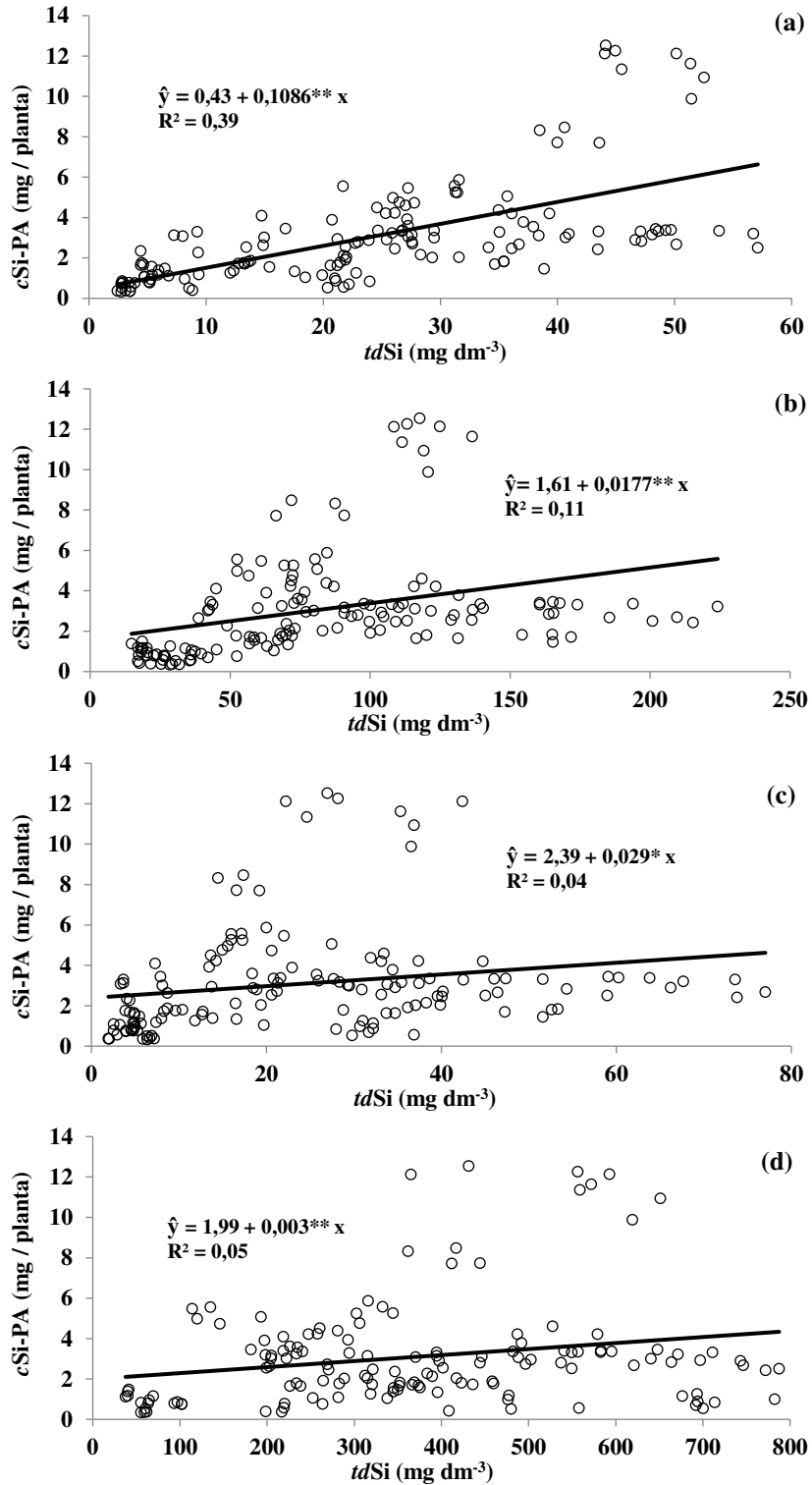


Figura 4. Correlação linear simples entre o conteúdo de Si da parte aérea ($cSi-PA$) de plantas de arroz e o teor de Si disponível pelos extratores (a) Cloreto de Cálcio ($tdSi - CaCl_2$), (b) Ácido Acético ($tdSi - AA$), (c) Carbonato de Amônio ($tdSi - CA$) e (d) Mehlich-3 ($tdSi - M3$) em amostras úmidas (pA-SCC) dos solos com todas as doses de Si (dSi). *, ** significativo a 5 e 1 %.

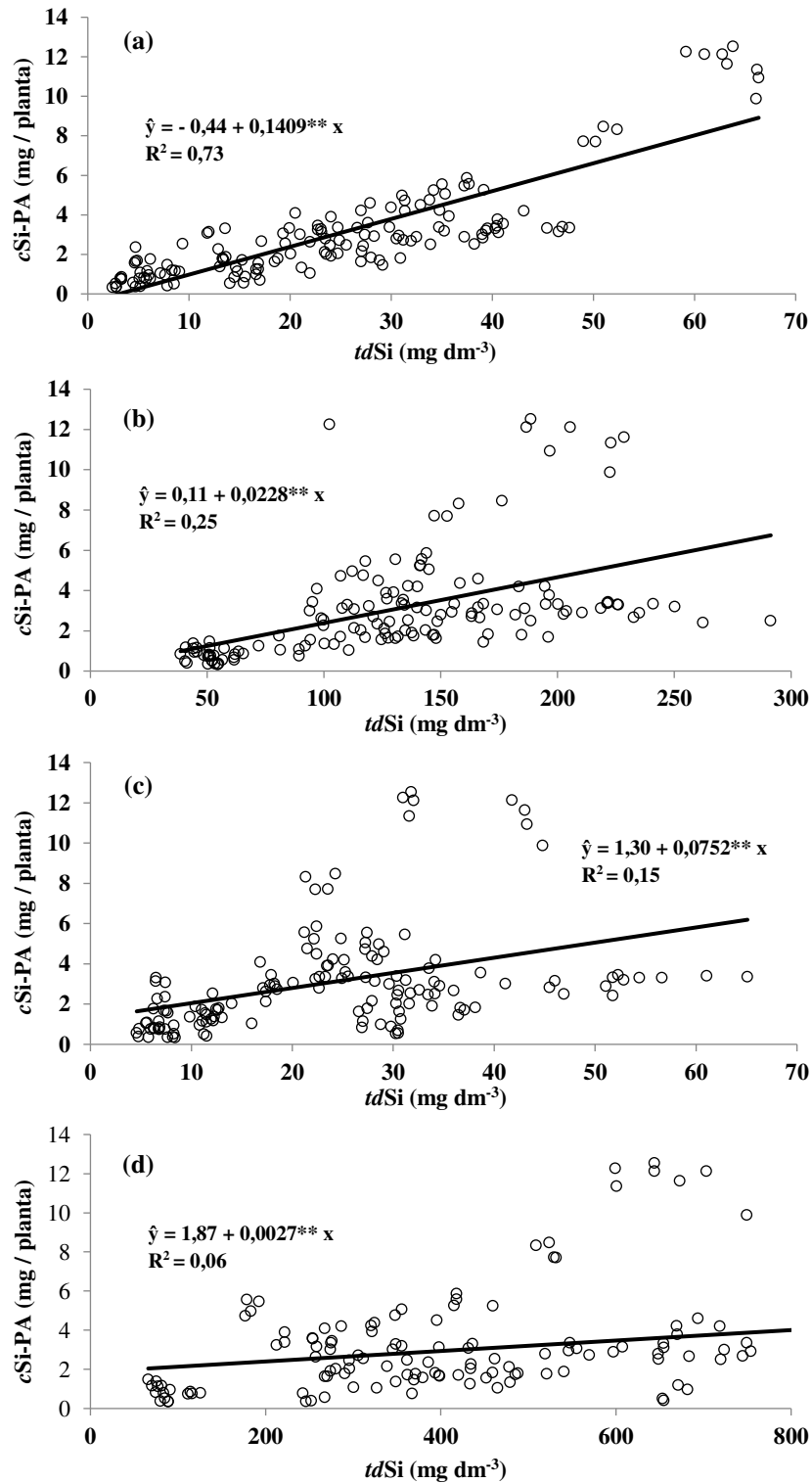


Figura 5. Correlação linear simples entre o conteúdo de Si da parte aérea (*cSi-PA*) de plantas de arroz e o teor de Si disponível pelos extratores (a) Cloreto de Cálcio (*tdSi- CaCl₂*), (b) Ácido Acético (*tdSi-AA*), (c) Carbonato de Amônio (*tdSi-CA*) e (d) Mehlich-3 (*tdSi-M3*) em amostras secas (*pA-SS*) dos solos com todas as doses de Si (*dSi*). *, ** significativo a 5 e 1 %.

Com o objetivo de obter extratores confiáveis, vários trabalhos utilizando CaCl_2 e ácido acético tem sido desenvolvidos com variados resultados.

Haysom e Chapman (1975) encontraram que o Si extraído por CaCl_2 10 mmol L^{-1} teve alta capacidade preditiva ($R^2 = 0,90$) com rendimentos de cana de açúcar em estudos feitos em solos ácidos do norte de Queensland, Austrália, onde é o método oficial usado para determinar a disponibilidade de Si no solo (Crooks; Prentice, 2017).

Korndörfer et al. (1999) em um trabalho desenvolvido em casa de vegetação com solos do Triângulo Mineiro, incluindo Latossolo Vermelho-Escuro álico, Latossolo Vermelho-Amarelo álico e Latossolo Roxo distrófico cultivados com arroz de sequeiro, avaliaram quatro extratores incluindo CaCl_2 $2,5 \text{ mmol L}^{-1}$ e ácido acético $0,5 \text{ mol L}^{-1}$. Eles encontraram que o ácido acético foi o extrator que mais extraiu Si do solo sendo 108 % superior ao CaCl_2 . Porém, os dois apresentaram boa capacidade preditiva (R^2 de 0,70 para CaCl_2 e 0,88 para ácido acético). Contudo, foi recomendado o uso do ácido acético por considerá-lo de preparo simples e de menor custo. Boas capacidades preditivas usando ácido acético também foram encontradas por Snyder (1991, 2001) e Barbosa Filho, Zimmermann e Silva (2004).

Pereira et al. (2007) desenvolveram um trabalho em casa de vegetação com um Neossolo Quartzarênico órtico típico, avaliando 25 fontes de Si e sete extratores que incluíam CaCl_2 10 mmol L^{-1} e ácido acético $0,5 \text{ mol L}^{-1}$. Os autores concluíram que o CaCl_2 foi o melhor extrator de Si disponível no solo ($R^2 = 0,81$), mesmo com as suas limitações pela estreita faixa de determinação obtida. Este último fato não foi observado no presente estudo, já que para o extrator CaCl_2 10 mmol L^{-1} se obtiveram $td\text{Si}$ entre 2,83 e 51,86 mg dm^{-3} para amostras de solo em capacidade de campo (pA-SCC) e 2,71 e 64,17 mg dm^{-3} para amostras de solo seco (pA-SS) (Quadro 9). Enquanto ao ácido acético, mencionaram que não é um extrator confiável ($R^2 = 0,02$) principalmente quando uma fonte de Si de baixa solubilidade é utilizada, uma vez que o extrator tem capacidade de extrair o elemento dessa fonte gerando problemas de superestimação. Da mesma forma, autores como Pereira et al. (2004) e Camargo et al. (2007) não recomendaram o uso desse extrator por também apresentar problemas de superestimação nos seus respectivos estudos, assim como pelas baixas capacidades preditivas obtidas com R^2 de 0,01 e 0,30, respectivamente. Outros autores como Korndörfer; Pereira e Nolla

(2004) e Camargo et al. (2005) indicam que em solos que receberam calcários pouco tempo antes da extração por ácido acético, o teor de Si disponível também pode ser superestimado.

Ramos, Korndörfer e Nolla (2008) avaliando três fontes de Si em um Neossolo Quartzarênico órtico típico, com o objetivo de determinar o fertilizante que melhor disponibilidade apresentava para a cultura de arroz, usaram CaCl_2 10 mmol L^{-1} e ácido acético 0,5 mol L^{-1} para determinar disponibilidade de Si no solo. Sendo assim, eles encontraram uma boa capacidade preditiva tanto para o CaCl_2 ($R^2= 0,76$) como para o ácido acético ($R^2 = 0,87$), obtendo sempre maior extração desde último. Isso foi atribuído pelos autores ao fato do ácido acético extrair formas não disponíveis para as plantas, incluindo polímeros e até Si presente nos argilominerais, além de dissolver o Si da fontes aplicadas ao solo superestimando as concentrações de Si disponível.

Inocêncio, Gutierrez e Novelino (2010) trabalhando em casa de vegetação com um Latossolo Vermelho Distroférico de textura muito argilosa e um Latossolo Vermelho Distrófico de textura média, avaliaram extratores para Si (CaCl_2 10 mmol L^{-1} e ácido acético 0,5 mol L^{-1}) e P (Olsen e Mehlich-1) para estimação dos elementos no solo para plantas de sorgo e milho. Eles determinaram que o CaCl_2 e o ácido acético eram recomendáveis para extração de Si, sendo que o CaCl_2 era melhor quando se tinha textura argilosa ou elevados teores de Si no solo.

Gutierrez, Inocêncio e Novelino (2011) estudando cinco níveis de P na presença e ausência de Si em um Latossolo Vermelho distroférico muito argiloso cultivado com milho em casa de vegetação, usaram CaCl_2 10 mmol L^{-1} e ácido acético 0,5 mol L^{-1} como extratores de Si no solo. Mesmo sem chegar a recomendar um extrator para esse fim, eles indicaram que o ácido acético não deveria ser usado principalmente pela sua capacidade de solubilizar Si de fontes de baixa solubilidade. Além disso, eles indicaram que ao ser aplicada uma fonte rica em aluminossilicatos como escórias de alto-forno, também podem ocorrer problemas de superestimação. Isso porque o Si ligado ao Al é mais solúvel em meio ácido e como o ácido acético acidifica o pH isso faz com que maior quantidade do elemento seja liberado.

Miles et al. (2014) trabalharam com 112 solos coletados em campos produtores de cana-de-açúcar na África do Sul, selecionados com base nos tipos de solo dominantes

incluindo Inceptissolos, Alfissolos, Mollissolos, Vertissolos, Latossolos, Neossolos e Argissolos e que variavam amplamente nas propriedades químicas, textura e nível de intemperismo. Desses solos, selecionaram 28 que foram correlacionados com o conteúdo de Si na planta, encontrando que o CaCl_2 10 mmol L^{-1} foi um extrator com boa capacidade preditiva ($R^2 = 0,77$) para a estimação de Si disponível para a cultura.

Babu et al. (2016) trabalhando com solos de Louisiana, Estados Unidos, para estabelecer extratores e níveis críticos para arroz também determinaram, dentre sete extratores avaliados, que o ácido acético junto com o CaCl_2 apresentaram a melhor capacidade preditiva ($R^2 > 0,45$) para estimação de Si disponível.

Crusciol et al. (2018) avaliando cinco extratores e dois modos de extração (com e sem aquecimento), encontraram baixa capacidade preditiva para avaliar a disponibilidade de Si em solos com cana de açúcar quando foi usado CaCl_2 10 mmol L^{-1} . Assim mesmo, esses autores reportaram que em solos argilosos com altos teores de Fe_2O_3 e Al_2O_3 e com alta afinidade para adsorver o elemento, o ácido acético 0,5 mol L^{-1} superestimou a disponibilidade de Si quando a temperatura foi aumentada. Eles associaram o aumento da temperatura de extração à solubilização de formas não solúveis de Si no solo. Porém, quando se usaram métodos convencionais de extração a superestimação não foi constatada obtendo-se boas correlações.

Para o caso do extrator CA, poucos estudos têm sido feitos sendo mais dirigidos para estimação de Si disponível em fertilizantes (Pereira et al., 2003). Assim, Pereira et al. (2007), em ensaio em casa de vegetação trabalhando com um Neossolo Quartzarênico órtico típico com baixo teor de Si, acharam potencial de uso deste extrator como estimador de disponibilidade de Si no solo. Quando correlacionado com o conteúdo de Si na planta o extrator apresentou boa capacidade preditiva ($R^2 = 0,72$). Porém, os resultados obtidos na presente pesquisa foram contrários com R^2 baixos (Figura 4 e 5), sugerindo que quando se trabalha com vários solos diferentes seu uso não seria recomendado. Além disso, o uso deste extrator apresenta inconvenientes no seu manejo. Isto porque quando é misturado com o solo, o pH da solução aumenta até valores de 8 aproximadamente o que faz que grande quantidade de argila fique dispersa dificultando sua decantação e filtração.

O uso de M3 como possível extrator de Si disponível no solo não tem sido reportado. Dessa forma e pelos menores R^2 obtidos dentre os quatro extratores (Figura 4 e 5), não seria recomendado o uso deste extrator, tido como universal, para avaliar a disponibilidade de Si no solo.

Vale salientar que pelas diferenças apresentadas por diferentes extratores, muitos pesquisadores sugerem o uso de dois métodos de extração. O primeiro seria o CaCl_2 , por exemplo, para ter ideia da disponibilidade imediata de Si no solo (fator intensidade). Já o segundo extrator deveria ser mais ácido, por exemplo, ácido cítrico ou ácido sulfúrico para avaliar o compartimento de Si de menor solubilidade (fator capacidade) (Berthelsen et al., 2003).

Depois do exposto e sendo que um dos principais objetivos do estudo foi avaliar os diferentes extratores, o uso do extrator CaCl_2 com amostras secas (pA-SS) se mostrou a alternativa mais viável para estimativa de Si disponível no solo. Este extrator apresentou boa capacidade preditiva ($R^2 = 0,73$) para os 12 solos avaliados, além apresentar boa distribuição de pontos ao longo de toda a faixa de determinação. Neste sentido, Berthelsen e Kordorfer (2005) indicam que é possível que nenhuma medida isolada seja adequada para determinar o Si disponível, porém se fosse necessário escolher uma o CaCl_2 parece ser a opção mais confiável.

5. CONCLUSÕES

O preparo da amostra influenciou na dosagem de Si disponível no solo. O processo de secagem e posterior reumedecimento levou à diminuição da recuperação de Si. Porém, foi justamente em amostras de solo secas que se encontrou a melhor correlação entre os teores disponíveis de Si no solo e a recuperação pelas plantas.

O extrator Cloreto de Cálcio 10 mmol L^{-1} usado em amostras secas, apresentou as melhores correlações entre o teor de Si disponível no solo e conteúdo de Si na planta. Sendo assim, ele poder ser usado como extrator para estimar a disponibilidade de Si de solos brasileiros, seguindo a metodologia convencional de secagem da amostra para análise. Ainda, os resultados sugerem que a possível separação dos solos por uma medida semelhante ao P-rem, o Si-rem, poderia melhorar a correlação dos extratores.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABE, S. S.; YAMASAKI, Y.; WAKATSUKI, T. Assessing Silicon Availability in Soils of Rice-Growing Lowlands and Neighboring Uplands in Benin and Nigeria. **Rice Science**, v. 23, n. 4, p. 196–202, 2016.
- ALLEONI, L. R. F. et al. Química dos solos altamente intemperizados. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). **Química e Mineralogia do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira da Ciência do Solo, 2009. p. 381–448.
- ALVAREZ V, V. H. Correlação e calibração de métodos de análises de solo. In: ALVAREZ V, V.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. (Eds.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. p. 615–646.
- ALVAREZ V, V. H. et al. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 27–33, 2000.
- ASHER, C. J. Beneficial Elements, Functional Nutrients, and Possible New Essential Elements. In: MORTVEDT, J. J. et al. (Eds.). **Micronutrients in Agriculture**. 2nd Ed ed. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1991. p. 703–723.
- BABU, T. et al. Establishing Soil Silicon Test Procedure and Critical Silicon Level for Rice in Louisiana Soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 47, n. 12, p. 1578–1597, 2016.
- BALASTA, M. L. F. C. et al. Effects of silica level on some properties of *Oryza sativa* straw and hull. **Canadian Journal of Botany**, v. 67, p. 2356–2363, 1989.
- BARBOSA FILHO, M. P. et al. Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 325–330, 2001.
- BARBOSA FILHO, M. P.; ZIMMERMANN, F. J. P.; SILVA, O. F. Influência da escória silicatada na acidez do solo e na produtividade de grãos do arroz de terras altas. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 28, n. 2, p. 323–331, 2004.
- BARKER, A. V.; PILBEAM., D. J. **Handbook of Plant Nutrition**. Taylor & Francis Group, 2007.
- BECKWITH, R. S.; REEVE, R. Studies on soluble silica in soils: I. The sorption of silicic acid by soils and minerals. **Australian Journal of Soil Research**, v. 1, n. 2, p. 157–168, 1963.
- BECKWITH, R. S.; REEVE, R. Studies on soluble silica in soils: II. The release of monosilicic acid from soils. **Australian Journal of Soil Research**, v. 2, p. 33–45, 1964.
- BERTHELSEN, S. et al. **Improving yield and ccs in sugarcane through the application of silicon based amendments**. Final Report, Sugar Research and Development Corporation Project CLW009, 2003.
- BERTHELSEN, S.; KORDORFER, G. H. Methods for silicon analysis in soil, plant, and fertilizers. **Proceedings of the Third International Conference on Silicon in Agriculture**, p. 85–91, 2005.
- BERTHELSEN, S.; NOBLE, A. D.; GARSIDE, A. L. Silicon research down under: Past, present, and future. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Eds.). **Silicon in Agriculture**. New York, NY: Elsevier Science, 2001. v. 8p. 241–255.

- BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; SCHLINDWEIN, J. A. Soil Phosphorus Availability Evaluation for Corn By Mehlich-1 and Mehlich-3 Soil Test Methods. **Scientia Agraria**, v. 10, n. 4, p. 305–312, 2009.
- BRASIL. DECRETO Nº 4.954, DE 14 DE JANEIRO DE 2004. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, p. 1–13, 2004.
- BROADLEY, M. et al. Beneficial Elements. In: MARSCHNER, H. (Ed.). **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3rd Ed. London: Academic Press, 2012. p. 249–269.
- CAMARGO, M. S. et al. Extratores De Silício Solúvel em Solos: Influência Calcário e Fósforo. **Biosci. J., Uberlândia**, v. 21, n. 9, p. 9–19, 2005.
- CAMARGO, M. S. et al. Soil reaction and absorption of silicon by rice. **Scientia Agricola**, v. 64, n. 2, p. 176–180, 2007.
- CAMARGO, M. S. DE; KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S. Solubilidade do Silício em solos : Influência do calcário e ácido silícico aplicados. **Bragantia**, v. 66, n. 4, p. 637–647, 2007.
- CASEY, W. H. et al. Aqueous silicate complexes in wheat, *Triticum aestivum* L. **Plant, Cell and Environment**, v. 27, n. 1, p. 51–54, 2004.
- CASSEL, D. K.; NIELSEN, D. R. Field capacity and available water capacity. In: KLUTTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods**. 2nd Ed. Madison, WI: American Society of Agronomy, Soil Science Society of Agronomy, 1986. p. 901–926.
- COCKER, K. M.; EVANS, D. E.; HODSON, M. J. The amelioration of aluminium toxicity by silicon in higher plants: Solution chemistry or an in planta mechanism?. **Physiologia Plantarum**, v. 104, n. 4, p. 608–614, 1998.
- CORNELIS, J. T. et al. Tracing the origin of dissolved silicon transferred from various soil-plant systems towards rivers: A review. **Biogeosciences**, v. 8, n. 1, p. 89–112, 2011.
- CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrence and uses**. 2nd Ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2002.
- CORRALES, I.; POSCHENRIEDER, C.; BARCELÓ, J. Influence of silicon pretreatment on aluminium toxicity in maize roots. **Plant and Soil**, v. 190, n. 2, p. 203–209, 1997.
- COSTA, L. M. et al. Ocorrência de corpos silicosos em horizontes superficiais de solos de diferentes ecossistemas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 871–879, 2010.
- CROOKS, R.; PRENTICE, P. Extensive Investigation Into Field Based Responses to a Silica Fertiliser. **Silicon**, v. 9, n. 2, p. 301–304, 2017.
- CRUSCIOL, C. A. C. et al. Methods and extractants to evaluate silicon availability for sugarcane. **Scientific Reports**, v. 8, p. 916, 2018.
- DAVIS, C. C.; CHEN, H.-W.; EDWARDS, M. Modeling Silica Sorption to Iron Hydroxide. **Environmental Science & Technology**, v. 36, n. 4, p. 582–587, 2002.
- DAVIS, J. A.; KENT, D. B. Surface complexation modeling in aqueous geochemistry. In: M. F. HOCELLA; WHILE, A. F. (Eds.). **Mineral / water interface geochemistry**, 1990. p. 177–260.

- DAYANANDAN, P.; KAUFMAN, P. B.; FRANKLIN, C. I. Detection of silica in plants. **American Journal of Botany**, v. 70, n. 7, p. 1079, 1983.
- DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 91–132.
- DIETZEL, M. Dissolution of silicates and the stability of polysilicic acid. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 64, n. 19, p. 3275–3281, 2000.
- DIETZEL, M. Interaction of polysilicic and mono silicic acid with mineral surfaces. In: STOBER, I.; BUCHER, K. (Eds.). **Water-Rock Interaction**. Kluwer Academic Publishers, 2002. p. 207–235.
- DIETZEL, M.; USDOWSKI, E. Depolymerization of soluble silicate in dilute aqueous solutions. **Colloid and Polymer Science**, v. 273, p. 590–597, 1995.
- DING, T. P. et al. Silicon isotope fractionation in bamboo and its significance to the biogeochemical cycle of silicon. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 72, n. 5, p. 1381–1395, 2009.
- DOELSCH, E. et al. Speciation and Crystal Chemistry of Fe(III) Chloride Hydrolyzed in the Presence of SiO₄ Ligands. 2. Characterization of Si-Fe Aggregates by FTIR and ²⁹Si Solid-State NMR. **Langmuir**, v. 17, p. 1399–1405, 2001.
- DOL HAMID, R. et al. Ionic strength effects on silicic acid (H₄SiO₄) sorption and oligomerization on an iron oxide surface: An interesting interplay between electrostatic and chemical forces. **Langmuir**, v. 27, n. 21, p. 12930–12937, 2011.
- ELLIOTT, C. L.; SNYDER, G. H. Autoclave-Induced Digestion for the Colorimetric Determination of Silicon in Rice Straw. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 39, n. 6, p. 1118–1119, 1991.
- EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2a Ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2009.
- EMBRAPA. **Padronização de métodos para análise granulométrica no Brasil**. EMBRAPA, p. 1–11, 2012.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3a Ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017.
- EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 91, n. 1, p. 11–17, 1994.
- EPSTEIN, E. SILICON. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 50, p. 641–664, 1999.
- EPSTEIN, E. Silicon in plants: Facts vs. concepts. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Eds.). **Silicon in Agriculture**. New York, NY: Elsevier Science Publishing, 2001. v. 8p. 185–196.
- FELMY, A. R. et al. An aqueous thermodynamic model for polymerized silica species to high ionic strength. **Journal of Solution Chemistry**, v. 30, n. 6, p. 509–525, 2001.
- FONTES, M. P. F. Intemperismo de rochas e minerais. In: KER, J. C. et al. (Eds.). **Pedologia Fundamentos**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira da Ciência do Solo, 2012. p. 171–206.
- FURLANI, A. M. C. Nutrição mineral. In: **Fisiologia vegetal**. Rio de Janeiro, RJ: Guanabara Koogan, 2004. p. 40–75.

GALHEGO, H. R.; ESPINDOLA, C. R. Mineralogia da argila de solos desenvolvidos de produtos de alteração das rochas erutivas básicas em Botucatu - SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 3, p. 131–135, 1979.

GARMAN, S. M.; LUXTON, T. P.; EICK, M. J. Kinetics of Arsenic Adsorption on Goethite in the Presence of Sorbed Silicic Acid. **Journal of Environmental Quality**, v. 33, p. 1703–1708, 2004.

GÉRARD, F.; FRANÇOIS, M.; RANGER, J. Processes controlling silica concentration in leaching and capillary soil solutions of an acidic brown forest soil (Rhône, France). **Geoderma**, v. 107, n. 3–4, p. 197–226, 2002.

GIBSON, J. A. E. Kinetics of silicon and aluminium release from soils during extraction with 0.01M calcium chloride. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 25, n. 19–20, p. 3393–3403, 1994.

GUNTZER, F.; KELLER, C.; MEUNIER, J. D. Benefits of plant silicon for crops: A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 32, n. 1, p. 201–213, 2012.

GUTIERREZ, R. S.; INOCÊNCIO, M. F.; NOVELINO, J. O. Extração de silício em solos fertilizados com fosfato e silicato. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, v. 41, n. 1, p. 1–7, 2011.

HALLMARK, C. T.; WILDING, L. P.; SMECK, N. E. Silicon. Methods of Soil Analysis, Chemical and Microbiological Properties. **Agronomy Monograph**, v. 2, n. 9, p. 263–273, 1982.

HANSEN, H. C. B. et al. Stability constants for silicate adsorbed to ferrihydrite. **Clay Minerals**, v. 29, p. 341–350, 1994.

HAYNES, R. J. A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 177, n. 6, p. 831–844, 2014.

HAYNES, R. J. Significance and Role of Si in Crop Production. **Advances in Agronomy**, v. 146, p. 83–166, 2017.

HAYNES, R. J.; BELYAEVA, O. N.; KINGSTON, G. Evaluation of industrial wastes as sources of fertilizer silicon using chemical extractions and plant uptake. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 176, n. 2, p. 238–248, 2013.

HAYSOM, M. B. C.; CHAPMAN, L. S. Some aspects of the calcium silicate trials at Mackay. **Proc Aus Sugar Cane Technol**, v. 42, p. 117–122, 1975.

HENRIET, C. et al. Effects, distribution and uptake of silicon in banana (*Musa* spp.) under controlled conditions. **Plant and Soil**, v. 287, p. 359–374, 2006.

HIEMSTRA, T.; BARNETT, M. O.; VAN RIEMSDIJK, W. H. Interaction of silicic acid with goethite. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 310, n. 1, p. 8–17, 2007.

HIEMSTRA, T.; VAN RIEMSDIJK, W. H. On the relationship between charge distribution, surface hydration, and the structure of the interface of metal hydroxides. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 301, n. 1, p. 1–18, 2006.

HINGSTON, F. .; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. Anion adsorption by goethite and gibbsite. 1. The role of the proton in determining adsorption envelopes. **European Journal of Soil Science**, v. 23, n. 2, p. 177–192, 1972.

HOSSAIN, K. A.; HORIUCHI, T.; MIYAGAWA, S. Effects of silicate materials on growth and grain yield of rice plants grown in clay loam and sandy loam soils. **Journal**

of **Plant Nutrition**, v. 21, n. 1, p. 1–12, 2001.

ILER, R. K. **Colloid chemistry of silica and silicates**. Ithaca, NY: Cornell University Press, 1955.

ILER, R. K. **THE CHEMISTRY OF SILICA. Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties, and Biochemistry**. New York, NY: A Wiley-Interscience Publication, 1979.

IMAIZUMI, K.; YOSHIDA, S. Edaphological studies on silicon supplying power of paddy field. **Bull Natl Inst Agric Sci**, v. B8, p. 261–304, 1958.

INOCÊNCIO, M. F.; GUTIERREZ, R. S.; NOVELINO, J. O. Avaliação de métodos de extração de Silício e Fósforo em amostras de solos. **Caatinga**, v. 23, n. 4, p. 75–83, 2010.

JACKSON, M. L. **Weathering of primary and secondary minerals in solis**. International Congress of Soil Science, 9. Anais. Adelaide: 1968.

JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Effects of iron and aluminium oxides on silica in solution in soils. **Nature**, v. 198, p. 852–853, 1963.

JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Studies of silica in the oat plant - III. Uptake of silica from soils by the plant. **Plant and Soil**, v. 23, n. 1, p. 79–96, 1965.

JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Silica in soils, plants, and animals. **Advances in Agronomy**, v. 19, p. 107–149, 1967.

KÄMPF, N.; CURI, N. Argilominerías em solos brasileiros. In: CURI, N. et al. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo III**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira da Ciência do Solo, 2003. p. 1–54.

KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). **Química e Mineralogia do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira da Ciência do Solo, 2009. p. 333–380.

KÄMPF, N.; MARQUES, J. J.; CURI, N. Mineralogia de solos brasileiros. In: KER, J. C. et al. (Eds.). **Pedologia Fundamentos**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira da Ciência do Solo, 2012. p. 81–146.

KARATHANASIS, A. D. Mineral Equilibria in Environmental Soil Systems. In: **Soil Mineralogy with Environmental Applications**. Madison, WI: Soil Science Society of America, Inc., 2002. p. 109–151.

KATO, N.; OWA, N. Evaluation of Si availability in slag fertilizers by an extraction method using a cation exchange resin. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 43, n. 2, p. 351–359, 1997.

KILMER, V. J. Silicon, Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. **Agronomy Monograph**, v. 9, n. 2, p. 959–962, 1965.

KIRKBY, E. Introduction, Definition and Classification of Nutrients. In: MARSCHNER, H. (Ed.). **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3rd Ed. London: Academic Press, 2012. p. 3–5.

KORNDÖRFER, G. H. et al. Avaliação de métodos de extração de silício para solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 101–106, 1999.

KORNDÖRFER, G. H. Elementos Benéficos. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira da Ciência do Solo, 2006. p.

355–374.

KORNDÖRFER, G. H.; LEPSCH, I. Effect of silicon on plant growth and crop yield. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Eds.). **Silicon in Agriculture**. New York, NY: Elsevier Science Publishing, 2001. v. 8p. 133–147.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Papel do Silício na Produção de Cana-de-Açúcar. **Stab**, v. 21, n. 2, p. 6–9, 2002.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. Análise de silício: solo, planta e fertilizante. **Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU (Boletim técnico, 2)**, p. 34, 2004.

LIANG, Y. Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. **Plant and Soil**, v. 209, n. 2, p. 217–224, 1999.

LUXTON, T. P.; TADANIER, C. J.; EICK, M. J. Mobilization of Arsenite by Competitive Interaction with Silicic Acid. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 1, p. 204, 2006.

MA, J. F. Silicon. In: BARKER, A. V.; PILBEAM, D. J. (Eds.). **Handbook of plant nutrition**. 2nd Ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, 2015. p. 681–695.

MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Eds.). **Silicon in Agriculture**. New York, NY: Elsevier Science Publishing, 2001. v. 8p. 17–39.

MA, J. F.; TAKAHASHI, E. **Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in Japan**. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science, 2002.

MAKABE, S. et al. Relationship between mineral composition or soil texture and available silicon in alluvial paddy soils on the Shounai Plain, Japan. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 55, p. 300–308, 2009.

MALLARINO, A. P. Field Calibration for Corn of the Mehlich-3 Soil Phosphorus Test with Colorimetric and Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy Determination Methods. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, p. 1928–1934, 2003.

MATICHENKOV, V.; AMMOSOVA, Y. Effects of amorphous silica on some properties of Sody-Podzolic soils. **Soil Science**, v. 7, p. 52–61, 1994.

MATICHENKOV, V.; BOCHARNIKOVA, E.; CALVERT, D. Response of citrus to silicon soil amendments. **Proceedings of the Florida State Horticultural Society**, v. 114, p. 94–97, 2001.

MATICHENKOV, V. V.; BOCHARNIKOVA, E. A. The relationship between silicon and soil physical and chemical properties. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Eds.). **Silicon in Agriculture**. New York, NY: Elsevier Science Publishing, 2001. p. 209–219.

MATICHENKOV, V. V.; CALVERT, D. V. Silicon as a Beneficial Element for Sugarcane. **Journal American Society of Sugarcane Technologists**, v. 22, p. 21–30, 2002.

MCKEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soil solutions II. The adsorption of monosilic acid by soil and by other substances. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 43, p. 83–96, 1963a.

MCKEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soil solutions I. The form and concentration of dissolved silica in aqueous extracts of some soils. **Canadian Journal of**

Soil Science, v. 43, p. 70–82, 1963b.

MEHLICH, A. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 15, n. 12, p. 1409–1416, 1984.

MELLO, J. W. V.; PÉREZ, D. V. Equilíbrio químico das reações no solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). **Química e Mineralogia do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira da Ciência do Solo, 2009. p. 151–249.

MELO, V. F. et al. Características dos óxidos de ferro e de Alumínio de diferentes classes de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 19–32, 2001a.

MELO, V. F. et al. Chemical and Mineralogical Properties of Kaolinite-Rich Brazilian Soils. **Soil Sci. Soc. Am. J**, v. 65, p. 1324–1333, 2001b.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of Plant Nutrition**. 5th Ed. Kluwer Academic Publishers, 2001.

MEYER, J. H.; KEEPING, M. G. Past, present and future research of the role of silicon for sugarcane in southern africa. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Eds.). **Silicon in agriculture**. New York, NY: Elsevier Science Publishing, 2001. p. 257–275.

MILES, N. et al. Extractable Silicon in Soils of the South African Sugar Industry and Relationships with Crop Uptake. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 45, n. 22, p. 2949–2958, 2014.

MITANI, N.; MA, J. F. Uptake of Silicon in Different Plant Species. **Journal of Experimental Botany**, v. 56, n. 414, p. 1255–1261, 2005.

MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Soil Science and Plant Nutrition Effect of silicon on the growth of solution-cultured cucumber plant. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 29, n. 1, p. 71–83, 1983.

MIYAZAWA, M. et al. Análise química de tecido vegetal. In: SILVA, F. C. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2a Ed ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2009. p. 191–233.

MOREL, F. M. M.; HERING, J. G. **Principles and Applications of Aquatic Chemistry**. New York, NY, 1993.

MOTOMURA, H.; MITA, N.; SUZUKI, M. Silica accumulation in long-lived leaves of *Sasa veitchii* (Carrière) rehd. (Poaceae-Bambusoideae). **Annals of Botany**, v. 90, n. 1, p. 149–152, 2002.

MOURA-FILHO, W.; BUOL, S. W. Studies os Latossol Roxo (Eustrustox) in Brazil. **Clay Mineralogy**, v. 13, p. 201–217, 1972.

NASCIMENTO, C. W. A.; CUNHA, K. P. V.; RODRIGUES, F. DE Á. Silício e Tolerância de Plantas a Metais Pesados e Doenças. In: RIBEIRO, M. R. et al. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira da Ciência do Solo, 2009. p. 273–318.

NEUMANN, D.; DE FIGUEIREDO, C. A novel mechanism of silicon uptake. **Protoplasma**, v. 220, n. 1–2, p. 59–67, 2002.

NONAKA, K.; TAKAHASHI, K. A Method of Measuring Available Silicates in Paddy Soils. **Jarq**, v. 22, n. 2, p. 91–95, 1988.

NORTON, L. D. Micromorphology of silica cementation in soils. In: RINGROSE-

- VOASE, A. J.; HUMPHREYS, G. S. (Eds.). **Developments in Soil Science. Soil Micromorphology: Studies in Management and Genesis**. Townsville, QLD: 1993. p. 811–824.
- NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V. Relação Solo-Planta. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 133–204.
- NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A. J. DE et al. (Eds.). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília, DF: EMBRAPA, 1991. p. 189–253.
- NOVAIS, R. F.; SMITH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira da Ciência do Solo, 2007. p. 471–550.
- OPFERGELT, S. et al. Variations of $\delta^{30}\text{Si}$ and Ge / Si with weathering and biogenic input in tropical basaltic ash soils under monoculture. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 74, p. 225–240, 2010.
- PAIM, L. A. et al. Estudo dos efeitos do silício e do fósforo na redução da disponibilidade de metais pesados em área de mineração. **Química Nova**, v. 29, n. 1, p. 28–33, 2006.
- PATI, S. et al. Effect of Silicon Fertilization on Growth, Yield, and Nutrient Uptake of Rice. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 47, n. 3, p. 284–290, 2016.
- PEREIRA, H. S. et al. Extratores de silício disponível em escórias e fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 1, p. 265–274, 2003.
- PEREIRA, H. S. et al. Silicon sources for rice crop. **Scientia Agricola**, v. 61, n. 5, p. 522–528, 2004.
- PEREIRA, H. S. et al. Avaliação de fontes e de extratores de silício no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 2, p. 239–247, 2007.
- POKROVSKI, G. S. et al. Iron (III)-silica interactions in aqueous solution: Insights from X-ray absorption fine structure spectroscopy. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 67, n. 19, p. 3559–3573, 2003.
- PRAKASH, N. B.; SAVANT, N. K.; SONAR, K. R. **Silicon in Indian Agriculture**. New Delhi: Westville Publishing House, 2018.
- RAMOS, L. A.; KORNDÖRFER, G. H.; NOLLA, A. Acúmulo de Silício em plantas de arroz do ecossistema de várzea submetido à aplicação de diferentes fontes. **Bragantia**, v. 67, n. 3, p. 751–757, 2008.
- RAVEN, J. A. The Transport and Function of Silicon in Plants. **Biological Reviews**, v. 58, n. 2, p. 179–207, 1983.
- REIS, J. V. **Potencial do extrator Mehlich-3 na avaliação da disponibilidade de fósforo de diferentes solos**. [Dissertação]. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2016.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5a aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG, 1999.
- RIBEIRO, M. R.; BARROS, M. DE F. C.; FREIRE, M. B. G. DOS S. Química dos

solos salinos e sódicos. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). **Química e Mineralogia do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira da Ciência do Solo, 2009. p. 449–484.

RICHMOND, K. E.; SUSSMAN, M. Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 6, n. 3, p. 268–272, 2003.

RIETRA, R. P. J. J.; HIEMSTRA, T.; VAN RIEMSDIJK, W. H. The relationship between molecular structure and ion adsorption on variable charge minerals. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 63, n. 19–20, p. 3009–3015, 1999.

RODRIGUES, F. Á. et al. Silício: um elemento benéfico de importante para as plantas. **Informações agrônômicas**, v. 134, p. 14–20, 2011.

RUIZ, H. A.; FERREIRA, G. B.; PEREIRA, J. B. M. Estimativa da capacidade de campo de Latossolos e Neossolos Quartzarênicos pela determinação do equivalente de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 389–393, 2003.

SAVANT, N. K.; SNYDER, G. H.; DANTNOFF, L. E. Silicon Management Sustainable. **Advances in Agronomy**, v. 58, p. 151–199, 1997.

SEBASTIAN, D. et al. A 5-day method for determination of soluble silicon concentrations in nonliquid fertilizer materials using a sodium carbonate-ammonium nitrate extractant followed by visible spectroscopy with heteropoly blue analysis: Single-laboratory validation. **Journal of AOAC International**, v. 96, n. 2, p. 251–259, 2013.

SNYDER, G. H. **Development of a silicon soil test for Histosol-grown rice**. Belle Glade, FL: University of Florida, 1991.

SNYDER, G. H. Methods for silicon analysis in plants, soils, and fertilizers. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Eds.). **Silicon in Agriculture**. New York, NY: Elsevier Science Publishing, 2001. p. 185–196.

SNYDER, G. H.; MATICHENKO, V. V.; DATNOFF, L. E. Silicon. In: BARKER, A. V.; PILBEAM, D. J. (Eds.). **Handbook of plant nutrition**. Taylor & Francis Group, 2007. p. 613.

SNYDER, G.; JONES, D.; GASCHO, G. Silicon fertilization of rice on Everglades Histosols. **Soil Sci. Soc. Am. J**, v. 50, n. 19, p. 1259–1263, 1986.

SOMMER, M. et al. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes - A review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 169, n. 3, p. 310–329, 2006.

TAKAHASHI, E.; MA, J. F.; MIYAKE, Y. The possibility of silicon as an essential element for higher plants. **Comments on Agricultural and Food Chemistry**, v. 2, n. 2, p. 99–102, 1990.

TSUJIMOTO, Y. et al. Limited Si-nutrient status of rice plants in relation to plant-available Si of soils, nitrogen fertilizer application, and rice-growing environments across Sub-Saharan Africa. **Field Crops Research**, v. 155, p. 1–9, 2014.

TUBAÑA, B. S.; BABU, T.; DATNOFF, L. E. A review of silicon in soils and plants and its role in us agriculture: History and future perspectives. **Soil Science**, v. 181, n. 9–10, p. 393–411, 2016.

TUBAÑA, B. S.; HECKMAN, J. R. Silicon in Soils and Plants. In: RODRIGUES, F. A.; DATNOFF, L. E. (Eds.). **Silicon and Plant Diseases**. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. p. 7–51.

VAN RAIJ, B.; CAMARGO, O. A. Sílica solúvel em solos. **Bragantia**, v. 32, n. 11, p.

223–236, 1973.

WEIL, R. R.; BRADY, N. C. **The Nature and Properties of Soils**. 15th Ed. Harlow, UK: Pearson Education Limited, 2017.

XU, G. et al. Assessing methods of available silicon in calcareous soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 32, n. 5–6, p. 787–801, 2001.

YATES, D. M.; JOYCE, K. J.; HEANEY, P. J. Complexation of copper with polymeric silica in aqueous solution. **Applied Geochemistry**, v. 13, p. 235–241, 1998.

YEO, A. R. et al. Silicon reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions and this is accounted for by a reduction in the transpirational bypass flow. **Plant, Cell and Environment**, v. 22, n. 5, p. 559–565, 1999.

YOSHIDA, S. **The Physiology of Silicon in Rice**. Asian and Pacific Council, Food and Fertilizer Technology Center, 1975.

APÊNDICES

Apêndice A - ANOVA geral para teor de Si pelo extrator CaCl₂ 10 mmol L⁻¹.

| Fonte da variação | G.L. | S.Q. | Q.M. | F. calculado | F. esperado | | |
|------------------------------|------|---------------|---------------------------------|--------------|-------------|-------------|--|
| | | | | | 0,05 | 0,01 | |
| Total | 287 | 68959,329 | | | | | |
| Blocos | 3 | 31,213 | 10,404 | 1,481 | ns | 2,648 3,877 | |
| Tratamentos | 71 | 67432,006 | 949,747 | 135,215 | ** | 1,359 1,541 | |
| Fator A ^{a/} | 11 | 26222,605 | 2383,873 | 339,390 | ** | 1,829 2,337 | |
| Fator B ^{b/} | 1 | 19,196 | 19,196 | 2,733 | ns | 3,888 6,756 | |
| A x B | 11 | 2417,081 | 219,735 | 31,283 | ** | 1,829 2,337 | |
| Fator C ^{c/} | 2 | 32957,917 | 16478,959 | 2346,097 | ** | 3,039 4,707 | |
| A x C | 22 | 4908,133 | 223,097 | 31,762 | ** | 1,593 1,922 | |
| B x C | 2 | 435,400 | 217,700 | 30,994 | ** | 3,039 4,707 | |
| A x B x C | 22 | 471,673 | 21,440 | 3,052 | ** | 1,593 1,922 | |
| Resíduo | 213 | 1496,110 | 7,024 | | | | |
| CV= | | 10,694 | % | | | | |
| Média= | | 24,784 | mg dm⁻³ de Si | | | | |

^{a/} Tipos de solo; ^{b/} Preparo de amostra; Fator; ^{c/} Doses de Si

Apêndice B - ANOVA geral para teor de Si pelo extrator Ácido Acético 0,5 mol L⁻¹.

| Fonte da variação | G.L. | S.Q. | Q.M. | F. calculado | F. esperado | | |
|------------------------------|------|----------------|---------------------------------|--------------|-------------|-------------|--|
| | | | | | 0,05 | 0,01 | |
| Total | 287 | 991154,552 | | | | | |
| Blocos | 3 | 394,360 | 131,453 | 0,767 | ns | 2,648 3,877 | |
| Tratamentos | 71 | 954232,740 | 13439,898 | 78,371 | ** | 1,359 1,541 | |
| Fator A ^{a/} | 11 | 368362,802 | 33487,527 | 195,273 | ** | 1,829 2,337 | |
| Fator B ^{b/} | 1 | 161930,306 | 161930,306 | 944,253 | ** | 3,888 6,756 | |
| A x B | 11 | 22412,260 | 2037,478 | 11,881 | ** | 1,829 2,337 | |
| Fator C ^{c/} | 2 | 327789,412 | 163894,706 | 955,708 | ** | 3,039 4,707 | |
| A x C | 22 | 68459,778 | 3111,808 | 18,146 | ** | 1,593 1,922 | |
| B x C | 2 | 1126,366 | 563,183 | 3,284 | * | 3,039 4,707 | |
| A x B x C | 22 | 4151,817 | 188,719 | 1,100 | ns | 1,593 1,922 | |
| Resíduo | 213 | 36527,453 | 171,490 | | | | |
| CV= | | 12,203 | % | | | | |
| Média= | | 107,311 | mg dm⁻³ de Si | | | | |

^{a/} Tipos de solo; ^{b/} Preparo de amostra; Fator; ^{c/} Doses de Si

Apêndice C - ANOVA geral para teor de Si pelo extrator Carbonato de Amônio 9,6 g L⁻¹.

| Fonte da variação | G.L. | S.Q. | Q.M. | F. calculado | F. esperado | | |
|------------------------------|------|---------------|---------------|---------------------------------|-------------|-------------|--|
| | | | | | 0,05 | 0,01 | |
| Total | 287 | 75216,959 | | | | | |
| Blocos | 3 | 23,843 | 7,948 | 0,514 | ns | 2,648 3,877 | |
| Tratamentos | 71 | 71901,079 | 1012,691 | 65,523 | ** | 1,359 1,541 | |
| Fator A ^{a/} | 11 | 12543,532 | 1140,321 | 73,781 | ** | 1,829 2,337 | |
| Fator B ^{b/} | 1 | 521,029 | 521,029 | 33,711 | ** | 3,888 6,756 | |
| A x B | 11 | 1131,675 | 102,880 | 6,656 | ** | 1,829 2,337 | |
| Fator C ^{c/} | 2 | 44352,323 | 22176,161 | 1434,833 | ** | 3,039 4,707 | |
| A x C | 22 | 11997,429 | 545,338 | 35,284 | ** | 1,593 1,922 | |
| B x C | 2 | 722,814 | 361,407 | 23,384 | ** | 3,039 4,707 | |
| A x B x C | 22 | 632,277 | 28,740 | 1,860 | * | 1,593 1,922 | |
| Resíduo | 213 | 3292,037 | 15,456 | | | | |
| | | CV= | 17,148 | % | | | |
| | | Média= | 22,926 | mg dm⁻³ de Si | | | |

^{a/}Tipos de solo; ^{b/}Preparo de amostra; ^{c/}Doses de Si

Apêndice D - ANOVA geral para teor de Si pelo extrator Mehlich-3.

| Fonte da variação | G.L. | S.Q. | Q.M. | F. calculado | F. esperado | | |
|------------------------------|------|---------------|----------------|---------------------------------|-------------|-------------|--|
| | | | | | 0,05 | 0,01 | |
| Total | 287 | 10818140,502 | | | | | |
| Blocos | 3 | 4809,692 | 1603,231 | 0,967 | ns | 2,648 3,877 | |
| Tratamentos | 71 | 10460071,925 | 147324,957 | 88,831 | ** | 1,359 1,541 | |
| Fator A ^{a/} | 11 | 7428567,491 | 675324,317 | 407,192 | ** | 1,829 2,337 | |
| Fator B ^{b/} | 1 | 271124,503 | 271124,503 | 163,476 | ** | 3,888 6,756 | |
| A x B | 11 | 30870,701 | 2806,427 | 1,692 | ns | 1,829 2,337 | |
| Fator C ^{c/} | 2 | 2302390,507 | 1151195,253 | 694,122 | ** | 3,039 4,707 | |
| A x C | 22 | 332141,259 | 15097,330 | 9,103 | ** | 1,593 1,922 | |
| B x C | 2 | 15644,514 | 7822,257 | 4,716 | ** | 3,039 4,707 | |
| A x B x C | 22 | 79332,951 | 3606,043 | 2,174 | ** | 1,593 1,922 | |
| Resíduo | 213 | 353258,885 | 1658,492 | | | | |
| | | CV= | 10,157 | % | | | |
| | | Média= | 400,944 | mg dm⁻³ de Si | | | |

^{a/}Tipos de solo; ^{b/}Preparo de amostra; ^{c/}Doses de Si

Apêndice E - Teor de Si total (*ttSi*) pelos extratores Cloreto de Cálcio (*ttSi*- CaCl₂), Ácido Acético (*ttSi*-AA), Carbonato de Amônio (*ttSi*-CA) e Mehlich-3 (*ttSi*-M3) em função das doses de Si (*dSi*) aplicadas a cada solo e os dois preparos de amostra (*pA*). Leituras feitas por Espectrometria de Emissão em Plasma Induzido (ICP-OES).

| Solo | pA-SCC ^{a/} | | | | pA-SS ^{b/} | | | |
|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|--------|---------------------------------|--------|--------|--------|
| | d0 ^{c/} | d300 ^{d/} | d600 ^{e/} | Média | d0 | d300 | d600 | Média |
| <i>tdSi</i>-CaCl₂ | | | | | | | | |
| mg dm ⁻³ | | | | | | | | |
| 1-PVd | 28,72 | 38,67 | 58,91 | 42,10 | 7,39 | 26,54 | 39,52 | 24,48 |
| 2-LVAd1 | 9,41 | 31,00 | 36,70 | 25,71 | 2,66 | 25,86 | 21,64 | 16,72 |
| 3-LAe | 19,56 | 41,72 | 26,16 | 29,15 | 12,00 | 19,17 | 12,83 | 14,67 |
| 4-LVAd2 | 19,95 | 40,91 | 61,36 | 40,74 | 15,92 | 30,60 | 39,57 | 28,69 |
| 5-LVe | 12,05 | 26,41 | 44,23 | 27,56 | 13,44 | 30,58 | 38,51 | 27,51 |
| 6-CXd | 7,92 | 15,42 | 22,50 | 15,28 | 4,61 | 13,75 | 17,86 | 12,07 |
| 7-RLe | 51,03 | 50,65 | 63,38 | 55,02 | 64,27 | 66,02 | 66,09 | 65,46 |
| 8-LVdf | 6,16 | 28,38 | 41,39 | 25,31 | 6,42 | 26,11 | 32,15 | 21,56 |
| 9-LAd | 7,89 | 29,67 | 52,95 | 30,17 | 10,65 | 32,69 | 39,61 | 27,65 |
| 10-LVj | 2,81 | 23,69 | 38,92 | 21,81 | 1,66 | 18,90 | 24,81 | 15,12 |
| 11-LVAd3 | 31,67 | 35,01 | 64,59 | 43,76 | 6,02 | 17,49 | 31,57 | 18,36 |
| 12-LVAh | 19,71 | 30,06 | 34,83 | 28,20 | 26,21 | 32,29 | 34,79 | 31,10 |
| <i>tdSi</i>-AA | | | | | | | | |
| mg dm ⁻³ | | | | | | | | |
| 1-PVd | 51,00 | 157,16 | 227,06 | 145,07 | 93,89 | 171,91 | 291,00 | 185,60 |
| 2-LVAd1 | 28,60 | 115,01 | 126,22 | 89,94 | 45,83 | 126,44 | 167,22 | 113,16 |
| 3-LAe | 57,10 | 47,44 | 50,11 | 51,55 | 37,49 | 51,27 | 73,09 | 53,95 |
| 4-LVAd2 | 77,59 | 148,30 | 207,47 | 144,45 | 136,96 | 198,71 | 316,03 | 217,23 |
| 5-LVe | 44,16 | 110,19 | 147,25 | 100,54 | 108,86 | 144,15 | 240,13 | 164,38 |
| 6-CXd | 70,24 | 71,22 | 89,35 | 76,94 | 49,96 | 84,34 | 141,64 | 91,98 |
| 7-RLe | 64,64 | 138,40 | 155,66 | 119,57 | 162,63 | 199,74 | 293,63 | 218,67 |
| 8-LVdf | 23,11 | 83,94 | 114,87 | 73,97 | 39,40 | 119,91 | 197,73 | 119,01 |
| 9-LAd | 31,93 | 65,81 | 109,80 | 69,18 | 38,28 | 115,04 | 186,30 | 113,21 |
| 10-LVj | 61,68 | 147,64 | 202,77 | 137,36 | 72,41 | 122,50 | 226,91 | 140,61 |
| 11-LVAd3 | 68,64 | 196,87 | 255,86 | 173,79 | 104,12 | 190,96 | 356,46 | 217,18 |
| 12-LVAh | 51,99 | 84,51 | 86,86 | 74,45 | 95,80 | 122,16 | 174,16 | 130,71 |
| <i>tdSi</i>-CA | | | | | | | | |
| mg dm ⁻³ | | | | | | | | |
| 1-PVd | 7,36 | 33,26 | 69,45 | 36,69 | 5,84 | 23,20 | 50,08 | 26,37 |
| 2-LVAd1 | 8,57 | 41,73 | 40,76 | 30,35 | 6,97 | 32,12 | 29,15 | 22,75 |
| 3-LAe | 14,12 | 46,15 | 42,65 | 34,30 | 11,44 | 30,27 | 28,37 | 23,36 |
| 4-LVAd2 | 12,26 | 34,72 | 65,34 | 37,44 | 11,66 | 30,43 | 50,68 | 30,93 |
| 5-LVe | 7,36 | 21,20 | 41,69 | 23,42 | 6,76 | 17,92 | 34,00 | 19,56 |
| 6-CXd | 6,71 | 13,65 | 18,82 | 13,06 | 4,98 | 11,46 | 15,12 | 10,52 |
| 7-RLe | 20,64 | 31,36 | 40,91 | 30,97 | 22,86 | 31,60 | 43,23 | 32,56 |

Continuação Apêndice E

| | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 8-LVdf | 7,46 | 25,03 | 32,06 | 21,52 | 6,92 | 24,13 | 27,90 | 19,65 |
| 9-LAd | 9,39 | 30,55 | 48,82 | 29,59 | 11,59 | 28,60 | 47,72 | 29,30 |
| 10-LVj | 10,06 | 38,14 | 51,98 | 33,39 | 8,12 | 29,10 | 37,08 | 24,76 |
| 11-LVAd3 | 8,24 | 35,84 | 66,41 | 36,83 | 7,48 | 23,54 | 46,89 | 25,97 |
| 12-LVAh | 14,78 | 20,03 | 20,79 | 18,53 | 17,59 | 22,88 | 22,65 | 21,04 |

tdSi-M3

| | mg dm ⁻³ | | | | | | | |
|-----------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1-PVd | 269,76 | 448,73 | 620,67 | 446,39 | 341,58 | 601,38 | 846,50 | 596,49 |
| 2-LVAd1 | 53,38 | 198,84 | 248,24 | 166,82 | 116,80 | 288,89 | 336,30 | 247,33 |
| 3-LAe | 443,30 | 647,66 | 663,23 | 584,73 | 665,33 | 884,66 | 846,63 | 798,87 |
| 4-LVAd2 | 415,93 | 606,98 | 670,13 | 564,35 | 508,82 | 710,18 | 886,97 | 701,99 |
| 5-LVe | 340,04 | 461,01 | 487,60 | 429,55 | 425,18 | 558,11 | 673,07 | 552,12 |
| 6-CXd | 174,10 | 280,69 | 349,44 | 268,08 | 252,16 | 399,08 | 464,17 | 371,80 |
| 7-RLe | 428,36 | 527,30 | 596,50 | 517,39 | 523,43 | 622,07 | 736,07 | 627,19 |
| 8-LVdf | 13,85 | 169,98 | 210,37 | 131,40 | 82,64 | 227,53 | 330,47 | 213,55 |
| 9-LAd | 3,09 | 94,09 | 173,97 | 90,38 | 72,24 | 182,80 | 283,06 | 179,36 |
| 10-LVj | 24,30 | 206,76 | 316,68 | 182,58 | 85,67 | 285,13 | 410,66 | 260,49 |
| 11-LVAd3 | 345,95 | 533,57 | 686,04 | 521,85 | 390,58 | 625,72 | 780,67 | 598,99 |
| 12-LVAh | 174,82 | 247,63 | 261,80 | 228,09 | 268,69 | 346,47 | 427,79 | 347,65 |

^{a/} pA-SCC= Amostras de solo em capacidade de campo; ^{b/} pA-SS= Amostras de solo seco; ^{c/}0 mg dm⁻³; ^{d/}300 mg dm⁻³; ^{e/}600 mg dm⁻³ de Si.

Apêndice F - Equações dos teores de Si total recuperado pelos extratores CaCl₂ (*trSi*-CaCl₂), AA (*trSi*-AA), CA (*trSi*-CA) e M3 (*trSi*-M3) em função das doses de Si (*dSi*) (*x*, mg dm⁻³) aplicadas a cada solo e os dois preparos de amostra (*pA*) e taxa de recuperação de Si por CaCl₂ (*trSi*-CaCl₂), AA (*trSi*-AA), CA (*trSi*-CA) e M3 (*trSi*-M3). Leituras feitas por Espectrometria de Emissão em Plasma Induzido (ICP-OES).

| Solo |pA-SCC ^{a/} | | | pA-SS ^{b/} | | |
|---|-----------------------------------|----------------|--------------------------------|------------------------------------|----------------|--------------------------------|
| | Equação | R ² | <i>trSi</i> -CaCl ₂ | Equação | R ² | <i>trSi</i> -CaCl ₂ |
| Cloreto de Cálcio (CaCl₂) | | | | | | |
| 1-PVd | $\hat{y} = 27,00 + 0,0503^{**} x$ | 0,77 | 0,050 | $\hat{y} = 8,42 + 0,0536^{**} x$ | 0,95 | 0,054 |
| 2-LVAd1 | $\hat{y} = 12,06 + 0,0455^{**} x$ | 0,82 | 0,046 | $\hat{y} = 7,23 + 0,0316^{**} x$ | 0,57 | 0,032 |
| 3-LAe | $\hat{y} = \bar{y} = 29,15$ | - | - | $\hat{y} = \bar{y} = 14,67$ | - | - |
| 4-LVAd2 | $\hat{y} = 20,04 + 0,0690^{**} x$ | 0,87 | 0,069 | $\hat{y} = 16,87 + 0,0394^{**} x$ | 0,94 | 0,039 |
| 5-LVe | $\hat{y} = 11,48 + 0,0536^{**} x$ | 0,97 | 0,054 | $\hat{y} = 14,98 + 0,0418^{**} x$ | 0,92 | 0,042 |
| 6-CXd | $\hat{y} = 7,99 + 0,0243^{**} x$ | 0,91 | 0,024 | $\hat{y} = 5,44 + 0,0221^{**} x$ | 0,88 | 0,022 |
| 7-RLe | $\hat{y} = 48,84 + 0,0206^{*} x$ | 0,34 | 0,021 | $\hat{y} = \bar{y} = 65,46$ | - | - |
| 8-LVdf | $\hat{y} = 7,69 + 0,0587^{**} x$ | 0,95 | 0,059 | $\hat{y} = 8,70 + 0,0429^{**} x$ | 0,86 | 0,043 |
| 9-LAd | $\hat{y} = 7,64 + 0,0751^{**} x$ | 0,94 | 0,075 | $\hat{y} = 13,17 + 0,0483^{**} x$ | 0,86 | 0,048 |
| 10-LVj | $\hat{y} = 3,75 + 0,0602^{**} x$ | 0,99 | 0,060 | $\hat{y} = 3,55 + 0,0386^{**} x$ | 0,80 | 0,039 |
| 11-LVAd3 | $\hat{y} = 27,30 + 0,0549^{**} x$ | 0,51 | 0,055 | $\hat{y} = 5,58 + 0,0426^{**} x$ | 0,82 | 0,043 |
| 12-LVAh | $\hat{y} = 20,64 + 0,0252^{**} x$ | 0,94 | 0,025 | $\hat{y} = 26,81 + 0,0143^{*} x$ | 0,49 | 0,014 |
| Média | | | 0,049 | | | 0,038 |
| Ácido Acético (AA) | | | | | | |
| | pA-SCC ^{a/} | | | pA-SS ^{b/} | | |
| 1-PVd | $\hat{y} = 57,05 + 0,2934^{**} x$ | 0,88 | 0,293 | $\hat{y} = 87,05 + 0,3285^{**} x$ | 0,96 | 0,329 |
| 2-LVAd1 | $\hat{y} = 41,13 + 0,1627^{**} x$ | 0,81 | 0,163 | $\hat{y} = 52,47 + 0,2023^{**} x$ | 0,90 | 0,202 |
| 3-LAe | $\hat{y} = \bar{y} = 51,55$ | - | - | $\hat{y} = 36,16 + 0,0593^{**} x$ | 0,89 | 0,059 |
| 4-LVAd2 | $\hat{y} = 79,51 + 0,2165^{**} x$ | 0,96 | 0,217 | $\hat{y} = 127,70 + 0,2984^{**} x$ | 0,93 | 0,298 |
| 5-LVe | $\hat{y} = 48,99 + 0,1718^{**} x$ | 0,92 | 0,172 | $\hat{y} = 98,75 + 0,2188^{**} x$ | 0,91 | 0,219 |
| 6-CXd | $\hat{y} = \bar{y} = 76,94$ | - | - | $\hat{y} = 46,14 + 0,1528^{**} x$ | 0,95 | 0,153 |
| 7-RLe | $\hat{y} = 74,06 + 0,1517^{**} x$ | 0,65 | 0,152 | $\hat{y} = 153,17 + 0,2183^{**} x$ | 0,89 | 0,218 |
| 8-LVdf | $\hat{y} = 28,09 + 0,1529^{**} x$ | 0,92 | 0,153 | $\hat{y} = 39,85 + 0,2639^{**} x$ | 0,96 | 0,264 |
| 9-LAd | $\hat{y} = 30,24 + 0,1298^{**} x$ | 0,87 | 0,130 | $\hat{y} = 39,19 + 0,2467^{**} x$ | 0,97 | 0,247 |
| 10-LVj | $\hat{y} = 66,82 + 0,2351^{**} x$ | 0,93 | 0,235 | $\hat{y} = 63,36 + 0,2575^{**} x$ | 0,81 | 0,258 |
| 11-LVAd3 | $\hat{y} = 80,18 + 0,3120^{**} x$ | 0,88 | 0,312 | $\hat{y} = 91,01 + 0,4206^{**} x$ | 0,90 | 0,421 |
| 12-LVAh | $\hat{y} = 57,02 + 0,0581^{**} x$ | 0,71 | 0,058 | $\hat{y} = 91,53 + 0,1306^{**} x$ | 0,92 | 0,131 |
| Média | | | 0,188 | | | 0,233 |
| Carbonato de Amônio (CA) | | | | | | |
| | pA-SCC ^{a/} | | | pA-SS ^{b/} | | |
| 1-PVd | $\hat{y} = 5,64 + 0,1035^{**} x$ | 0,97 | 0,104 | $\hat{y} = 4,25 + 0,0737^{**} x$ | 0,86 | 0,074 |
| 2-LVAd1 | $\hat{y} = 14,26 + 0,0536^{**} x$ | 0,70 | 0,054 | $\hat{y} = 11,66 + 0,0370^{**} x$ | 0,63 | 0,037 |
| 3-LAe | $\hat{y} = 20,04 + 0,0476^{**} x$ | 0,62 | 0,048 | $\hat{y} = 14,90 + 0,0282^{**} x$ | 0,66 | 0,028 |

Continuação Apêndice F

| | | | | | | |
|-----------------|-----------------------------------|------|-------|-----------------------------------|------|-------|
| 4-LVAd2 | $\hat{y} = 10,90 + 0,0885^{**} x$ | 0,98 | 0,089 | $\hat{y} = 11,41 + 0,0650^{**} x$ | 0,98 | 0,065 |
| 5-LVe | $\hat{y} = 6,25 + 0,0572^{**} x$ | 0,98 | 0,057 | $\hat{y} = 5,94 + 0,0454^{**} x$ | 0,99 | 0,045 |
| 6-CXd | $\hat{y} = 7,00 + 0,0202^{**} x$ | 0,93 | 0,020 | $\hat{y} = 5,45 + 0,0169^{**} x$ | 0,90 | 0,017 |
| 7-RLe | $\hat{y} = 20,83 + 0,0338^{**} x$ | 0,94 | 0,034 | $\hat{y} = 22,38 + 0,0340^{**} x$ | 0,98 | 0,034 |
| 8-LVdf | $\hat{y} = 9,21 + 0,0410^{**} x$ | 0,91 | 0,041 | $\hat{y} = 9,16 + 0,0350^{**} x$ | 0,85 | 0,035 |
| 9-LAd | $\hat{y} = 9,87 + 0,0657^{**} x$ | 0,78 | 0,066 | $\hat{y} = 11,24 + 0,0602^{**} x$ | 0,85 | 0,060 |
| 10-LVj | $\hat{y} = 12,43 + 0,0699^{**} x$ | 0,96 | 0,070 | $\hat{y} = 10,29 + 0,0483^{**} x$ | 0,93 | 0,048 |
| 11-LVAd3 | $\hat{y} = 7,74 + 0,0969^{**} x$ | 0,91 | 0,097 | $\hat{y} = 6,27 + 0,0657^{**} x$ | 0,88 | 0,066 |
| 12-LVAh | $\hat{y} = 15,52 + 0,0100^{**} x$ | 0,79 | 0,010 | $\hat{y} = 18,51 + 0,0084^{**} x$ | 0,61 | 0,008 |
| Média | | | 0,057 | | | 0,043 |

Mehlich-3 (M3)

| | pA-SCC ^{a/} | | | pA-SS ^{b/} | | |
|-----------------|------------------------------------|------|-------|------------------------------------|------|-------|
| 1-PVd | $\hat{y} = 270,93 + 0,5849^{**} x$ | 0,87 | 0,585 | $\hat{y} = 344,03 + 0,8415^{**} x$ | 0,97 | 0,842 |
| 2-LVAd1 | $\hat{y} = 69,39 + 0,3248^{**} x$ | 0,85 | 0,325 | $\hat{y} = 137,58 + 0,3658^{**} x$ | 0,88 | 0,366 |
| 3-LAe | $\hat{y} = 474,77 + 0,3665^{**} x$ | 0,78 | 0,367 | $\hat{y} = 708,23 + 0,3022^{**} x$ | 0,56 | 0,302 |
| 4-LVAd2 | $\hat{y} = 437,25 + 0,4237^{**} x$ | 0,85 | 0,424 | $\hat{y} = 512,92 + 0,6303^{**} x$ | 0,97 | 0,630 |
| 5-LVe | $\hat{y} = 355,77 + 0,2459^{**} x$ | 0,86 | 0,246 | $\hat{y} = 428,17 + 0,4132^{**} x$ | 0,94 | 0,413 |
| 6-CXd | $\hat{y} = 180,41 + 0,2922^{**} x$ | 0,96 | 0,292 | $\hat{y} = 265,80 + 0,3534^{**} x$ | 0,86 | 0,353 |
| 7-RLe | $\hat{y} = 433,32 + 0,2802^{**} x$ | 0,94 | 0,280 | $\hat{y} = 520,87 + 0,3544^{**} x$ | 0,86 | 0,354 |
| 8-LVdf | $\hat{y} = 33,15 + 0,3275^{**} x$ | 0,81 | 0,328 | $\hat{y} = 89,63 + 0,4131^{**} x$ | 0,96 | 0,413 |
| 9-LAd | $\hat{y} = 4,95 + 0,2848^{**} x$ | 0,96 | 0,285 | $\hat{y} = 73,95 + 0,3514^{**} x$ | 0,94 | 0,351 |
| 10-LVj | $\hat{y} = 36,39 + 0,4873^{**} x$ | 0,98 | 0,487 | $\hat{y} = 97,99 + 0,5417^{**} x$ | 0,96 | 0,542 |
| 11-LVAd3 | $\hat{y} = 351,81 + 0,5668^{**} x$ | 0,91 | 0,567 | $\hat{y} = 403,95 + 0,6501^{**} x$ | 0,83 | 0,650 |
| 12-LVAh | $\hat{y} = 184,60 + 0,1450^{**} x$ | 0,81 | 0,145 | $\hat{y} = 268,10 + 0,2652^{**} x$ | 0,91 | 0,265 |
| Média | | | 0,361 | | | 0,457 |

*, ** significativo a 5 e 1 %; ^{ns} não significativo até 5 %; dSi; d0=0; d1=300 e d2=600 mg dm⁻³; ^{a/} pA-SCC= Amostras de solo em capacidade de campo; ^{b/} pA-SS= Amostras de solo seco.

Apêndice G - Contrastes ortogonais para teor de Si total (*t*Si) pelos extratores Cloreto de Cálcio (CaCl₂), Ácido Acético (AA), Carbonato de Amônio (CA) e Mehlich-3 (M3) por efeito das doses de Si dentro dos diferentes solos com e sem preparo de amostra (*d*Si d/ Solo com/sem-prep). Leituras feitas por Espectrometria de Emissão em Plasma Induzido (ICP-OES).

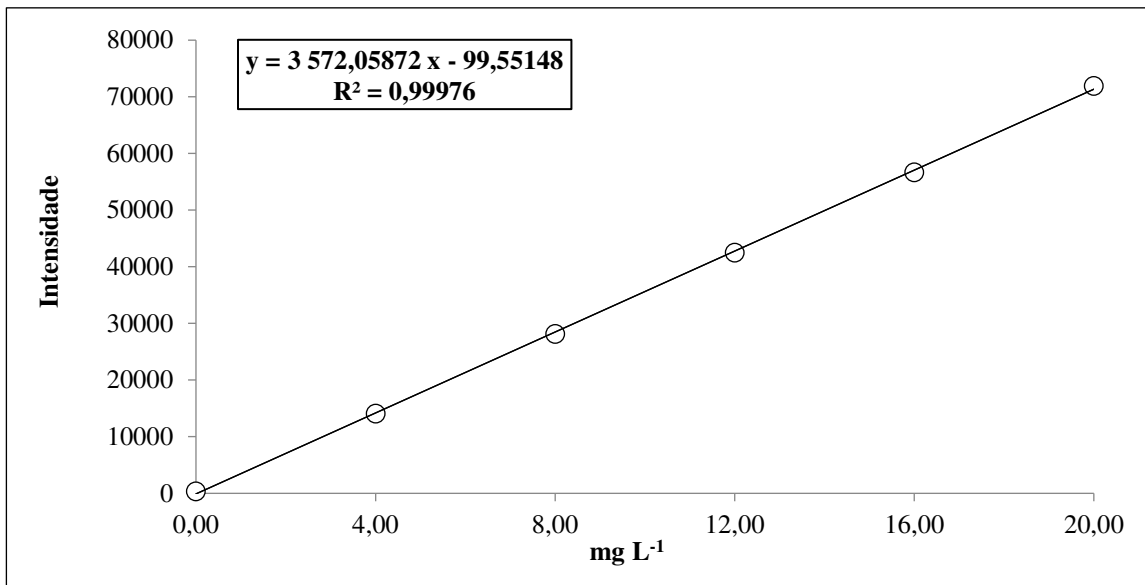
| Solo | dSi d/ Solo com/sem-prep | C dl Si ^{a/} | | C dq Si ^{b/} | | C dl Si ^{a/} | | C dq Si ^{b/} | |
|----------|----------------------------------|--|----|-----------------------|----|-----------------------|----|-----------------------|----|
| | | Cloreto de Cálcio (CaCl ₂) | | | | Ácido Acético (AA) | | | |
| 1-PVd | dSi d/ S1 sem-prep ^{c/} | 30,20 | ** | -5,15 | ns | 176,05 | ** | 18,13 | ns |
| | dSi d/ S1 com-prep ^{d/} | 32,13 | ** | 3,09 | ns | 197,11 | ** | -20,54 | ns |
| 2-LVAd1 | dSi d/ S2 sem-prep | 27,29 | ** | 5,30 | * | 97,62 | ** | 25,07 | ** |
| | dSi d/ S2 com-prep | 18,98 | ** | 9,14 | ** | 121,39 | ** | 13,28 | ns |
| 3-LAe | dSi d/ S3 sem-prep | 6,61 | ns | 12,57 | ** | -6,99 | ns | -4,11 | ns |
| | dSi d/ S3 com-prep | 0,84 | ns | 4,50 | * | 35,60 | ** | -2,68 | ns |
| 4-LVAd2 | dSi d/ S4 sem-prep | 41,41 | ** | 0,17 | ns | 129,88 | ** | 3,85 | ns |
| | dSi d/ S4 com-prep | 23,66 | ** | 1,90 | ns | 179,07 | ** | -18,52 | * |
| 5-LVe | dSi d/ S5 sem-prep | 32,17 | ** | -1,16 | ns | 103,09 | ** | 9,65 | ns |
| | dSi d/ S5 com-prep | 25,06 | ** | 3,07 | ns | 131,27 | ** | -20,23 | ** |
| 6-CXd | dSi d/ S6 sem-prep | 14,59 | ** | 0,14 | ns | 19,11 | ns | -5,72 | ns |
| | dSi d/ S6 com-prep | 13,26 | ** | 1,67 | ns | 91,68 | ** | -7,64 | ns |
| 7-RLe | dSi d/ S7 sem-prep | 12,36 | ** | -6,56 | ns | 91,02 | ** | 28,25 | * |
| | dSi d/ S7 com-prep | 1,82 | ns | 0,84 | ns | 131,00 | ** | -28,39 | * |
| 8-LVdf | dSi d/ S8 sem-prep | 35,24 | ** | 3,07 | ns | 91,76 | ** | 9,97 | ns |
| | dSi d/ S8 com-prep | 25,72 | ** | 4,55 | * | 158,33 | ** | 0,90 | ns |
| 9-LAd | dSi d/ S9 sem-prep | 45,05 | ** | -0,50 | ns | 77,87 | ** | -3,37 | ns |
| | dSi d/ S9 com-prep | 28,96 | ** | 5,04 | * | 148,03 | ** | 1,83 | ns |
| 10-LVj | dSi d/ S10 sem-prep | 36,10 | ** | 1,89 | ns | 141,09 | ** | 10,28 | ns |
| | dSi d/ S10 com-prep | 23,15 | ** | 3,78 | ns | 154,49 | ** | -18,11 | * |
| 11-LVAd3 | dSi d/ S11 sem-prep | 32,92 | ** | -8,74 | ** | 187,22 | ** | 23,08 | ** |
| | dSi d/ S11 com-prep | 25,55 | ** | -0,87 | ns | 252,33 | ** | -26,22 | ** |
| 12-LVAh | dSi d/ S12 sem-prep | 15,12 | ** | 1,86 | ns | 34,87 | ** | 10,05 | ns |
| | dSi d/ S12 com-prep | 8,57 | * | 1,19 | ns | 78,36 | ** | -8,55 | ns |
| | | Carbonato de Amônio (CA) | | | | Mehlich-3 (M3) | | | |
| 1-PVd | dSi d/ S1 sem-prep | 62,10 | ** | -5,15 | ns | 350,91 | ** | 3,51 | ns |
| | dSi d/ S1 com-prep | 44,24 | ** | -4,76 | ns | 504,91 | ** | 7,34 | ns |
| 2-LVAd1 | dSi d/ S2 sem-prep | 32,19 | ** | 11,38 | ** | 194,86 | ** | 32,02 | * |
| | dSi d/ S2 com-prep | 22,18 | ** | 9,38 | ** | 219,49 | ** | 41,56 | ** |
| 3-LAe | dSi d/ S3 sem-prep | 28,53 | ** | 11,85 | ** | 219,92 | ** | 62,93 | ** |
| | dSi d/ S3 com-prep | 16,93 | ** | 6,91 | ** | 181,30 | ** | 85,79 | ** |
| 4-LVAd2 | dSi d/ S4 sem-prep | 53,07 | ** | -2,72 | ns | 254,19 | ** | 42,63 | ** |
| | dSi d/ S4 com-prep | 39,02 | ** | -0,49 | ns | 378,15 | ** | 8,19 | ns |
| 5-LVe | dSi d/ S5 sem-prep | 34,33 | ** | -2,22 | ns | 147,56 | ** | 31,46 | * |

Continuação Apêndice G

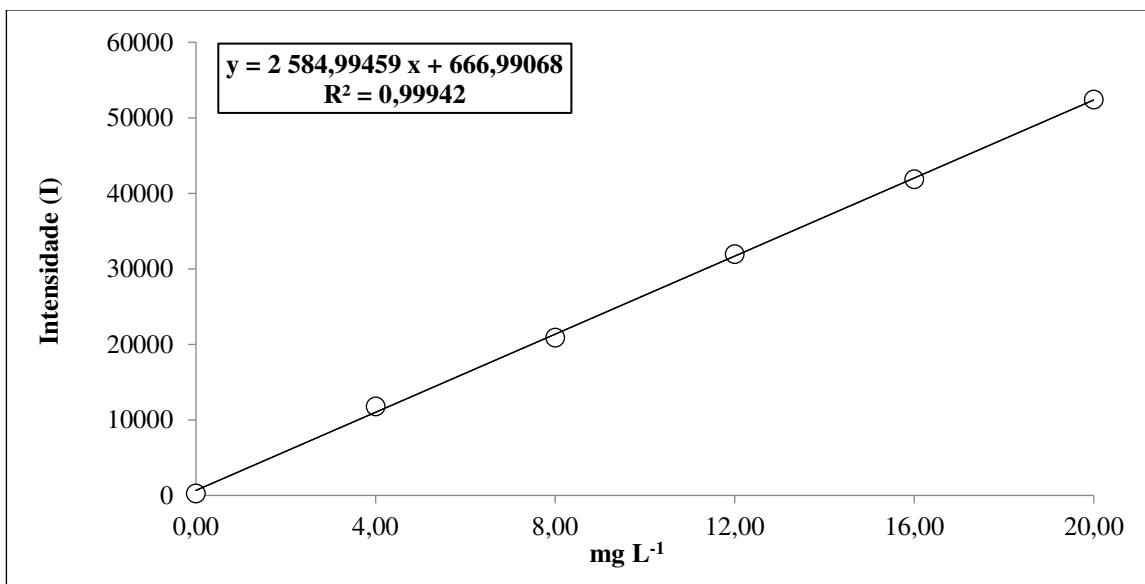
| | | | | | | | | | |
|-----------------|---------------------|-------|----|-------|----|--------|----|-------|----|
| | dSi d/ S5 com-prep | 27,24 | ** | -1,64 | ns | 247,89 | ** | 5,99 | ns |
| 6-CXd | dSi d/ S6 sem-prep | 12,11 | ** | 0,59 | ns | 175,34 | ** | 12,61 | ns |
| | dSi d/ S6 com-prep | 10,14 | ** | 0,94 | ns | 212,01 | ** | 27,28 | * |
| 7-RLe | dSi d/ S7 sem-prep | 20,27 | ** | 0,59 | ns | 168,14 | ** | 14,87 | ns |
| | dSi d/ S7 com-prep | 20,37 | ** | -1,44 | ns | 212,64 | ** | -7,69 | ns |
| 8-LVdf | dSi d/ S8 sem-prep | 24,61 | ** | 3,52 | ns | 196,51 | ** | 38,58 | ** |
| | dSi d/ S8 com-prep | 20,98 | ** | 4,48 | * | 247,83 | ** | 13,98 | ns |
| 9-LAd | dSi d/ S9 sem-prep | 39,43 | ** | 0,96 | ns | 170,87 | ** | 3,70 | ns |
| | dSi d/ S9 com-prep | 36,13 | ** | -0,70 | ns | 210,82 | ** | 3,44 | ns |
| 10-LVj | dSi d/ S10 sem-prep | 41,92 | ** | 4,74 | ** | 292,38 | ** | 24,18 | ns |
| | dSi d/ S10 com-prep | 28,96 | ** | 4,33 | * | 324,99 | ** | 24,64 | ns |
| 11-LVAd3 | dSi d/ S11 sem-prep | 58,17 | ** | -0,99 | ns | 340,09 | ** | 11,71 | ns |
| | dSi d/ S11 com-prep | 39,40 | ** | -2,43 | ns | 390,08 | ** | 26,73 | ns |
| 12-LVAh | dSi d/ S12 sem-prep | 6,01 | ns | 1,50 | ns | 86,97 | ** | 19,55 | ns |
| | dSi d/ S12 com-prep | 5,06 | ns | 1,84 | ns | 159,10 | ** | -1,18 | ns |

*, ** significativo a 5 e 1%; ^{ns} não significativo até 5%; ^{a/}Contraste para dose linear de Si; ^{b/}Contraste para dose quadrática de Si; ^{c/}pA-SCC= Amostras de solo em capacidade de campo; ^{d/}pA-SS= Amostras de solo seco.

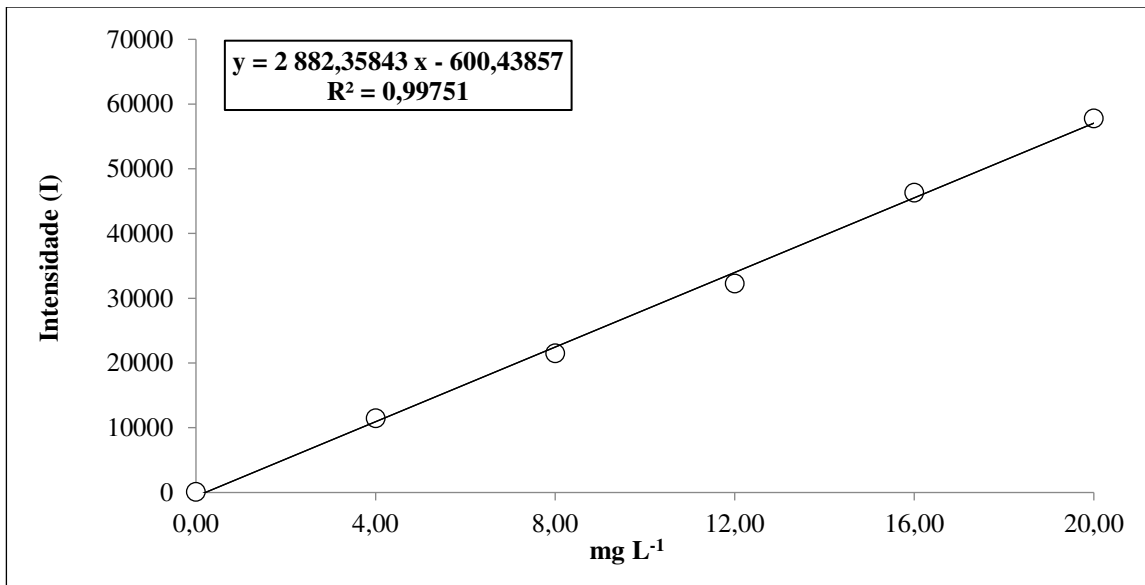
Apêndice H – Curva Padrão de Si obtida pelo extrator CaCl_2 10 mmol L^{-1} na Espectrometria de Emissão em Plasma Induzido (ICP-OES).



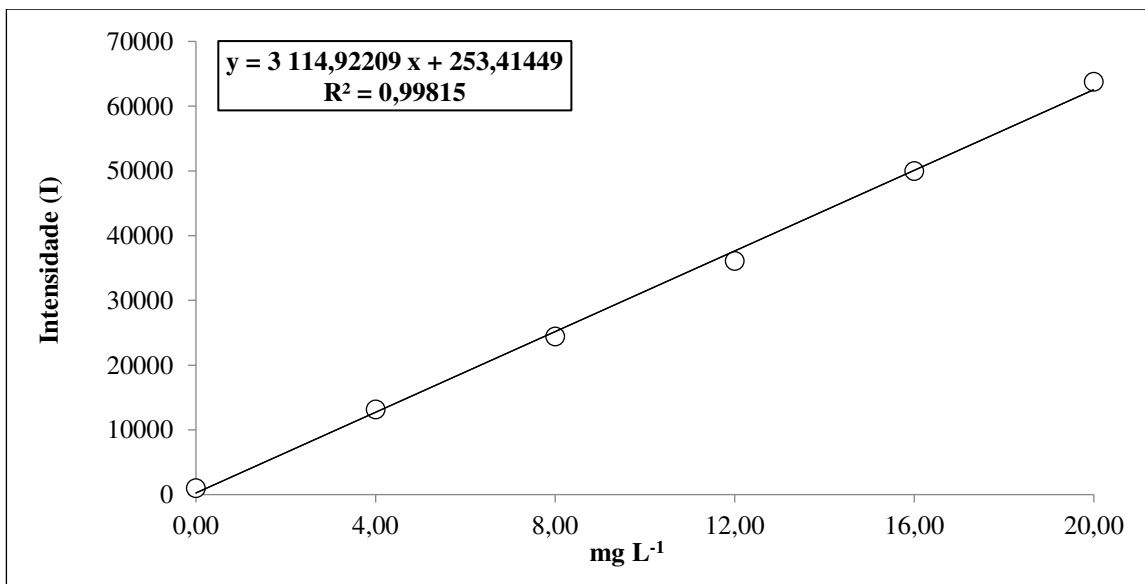
Apêndice I – Curva Padrão de Si obtida pelo extrator Ácido Acético $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ na Espectrometria de Emissão em Plasma Induzido (ICP-OES).



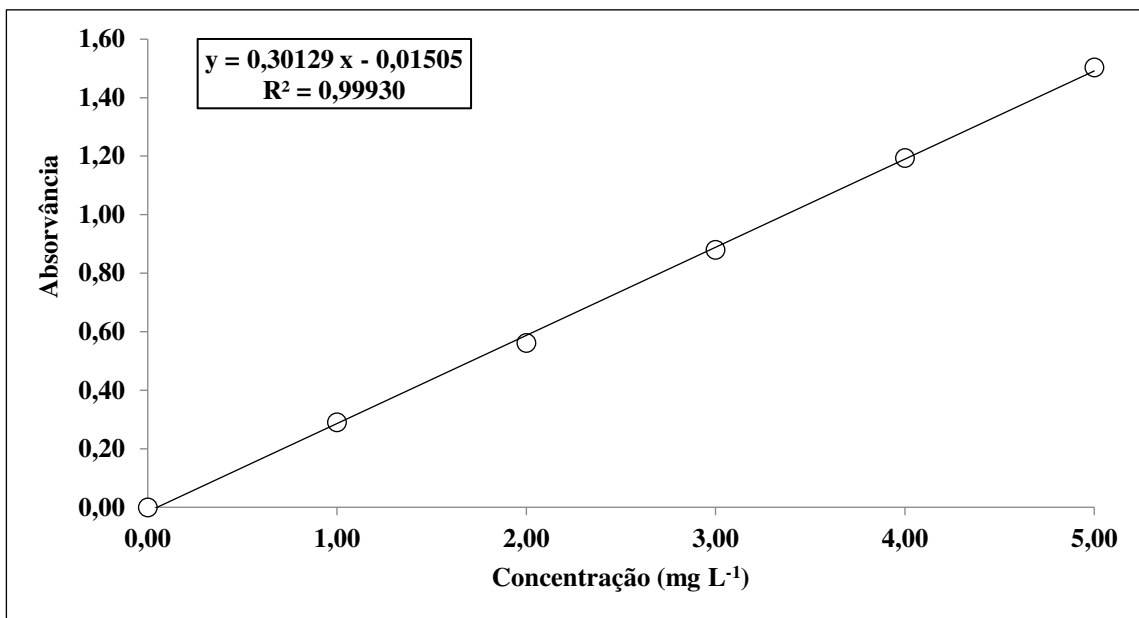
Apêndice J – Curva Padrão de Si obtida pelo extrator Carbonato de Amônio 9,6 g L⁻¹ na Espectrometria de Emissão em Plasma Induzido (ICP-OES).



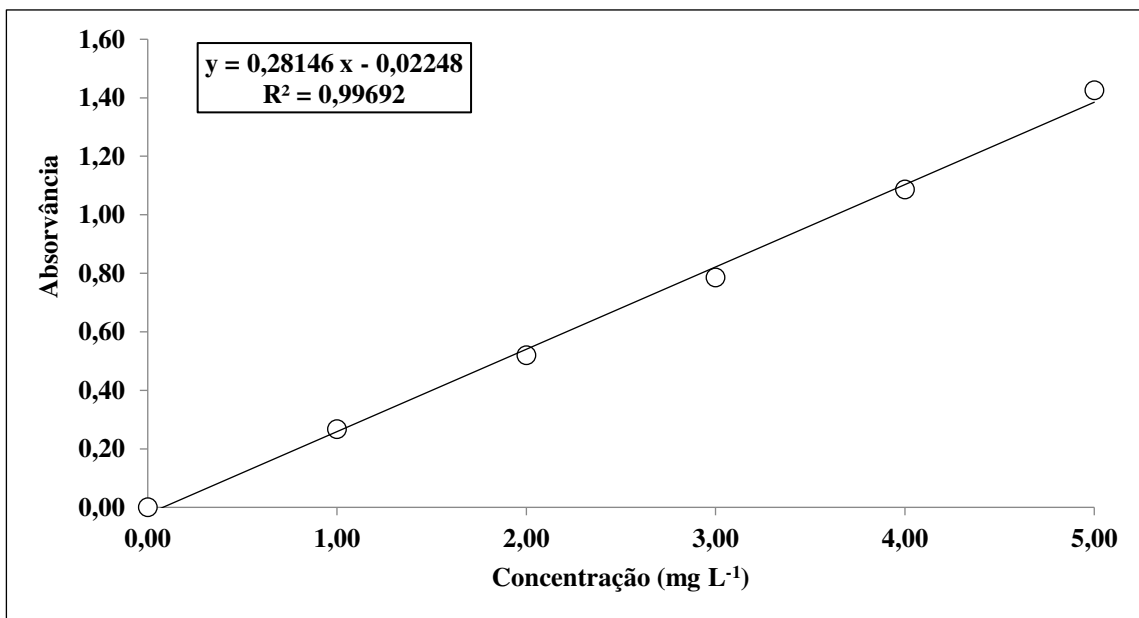
Apêndice K – Curva Padrão de Si obtida pelo extrator Mehlich-3 na Espectrometria de Emissão em Plasma Induzido (ICP-OES).



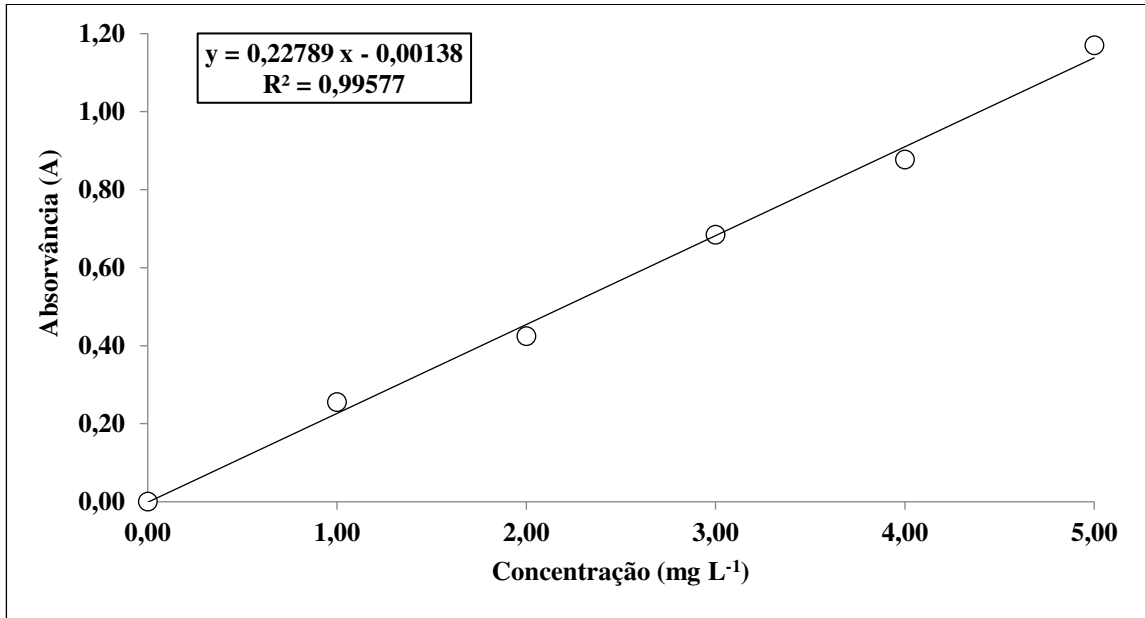
Apêndice L – Curva Padrão de Si obtida pelo extrator CaCl_2 10 mmol L^{-1} na Espectrometria de Absorção Molecular (EAA).



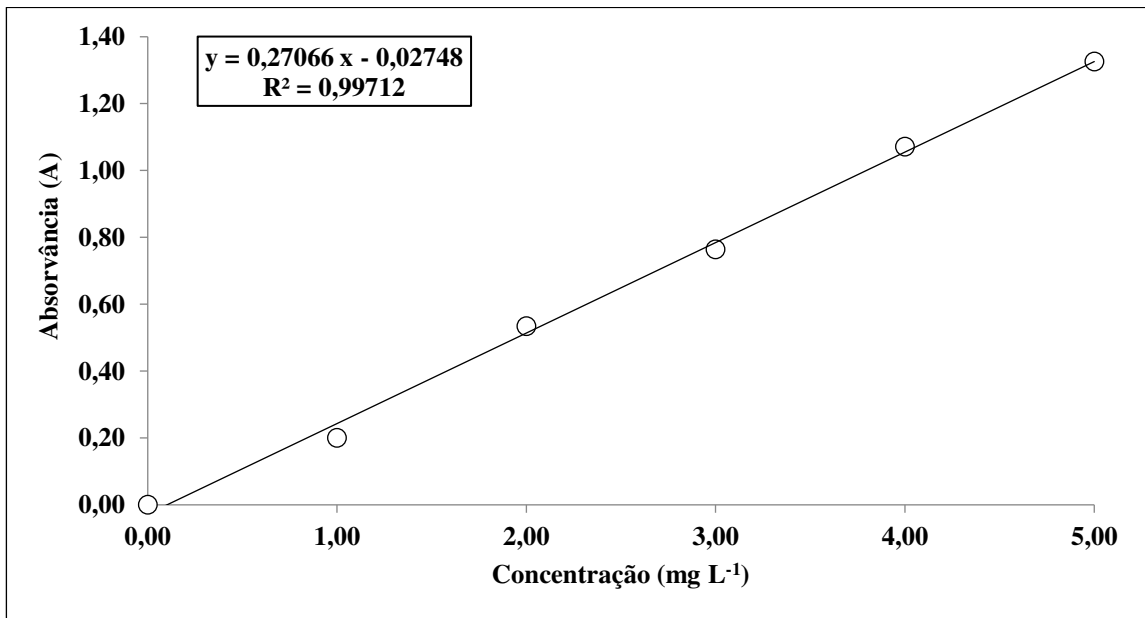
Apêndice M – Curva Padrão de Si obtida pelo extrator Ácido Acético $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ na Espectrometria de Absorção Molecular (EAA).



Apêndice N – Curva Padrão de Si obtida pelo extrator Carbonato de Amônio 9,6 g L⁻¹ na Espectrometria de Absorção Molecular (EAA).



Apêndice O – Curva Padrão de Si obtida pelo extrator Mehlich-3 na Espectrometria de Absorção Molecular (EAA).



Apêndice P. Experimento em casa de vegetação.



Apêndice Q. Secagem do tecido vegetal.



Apêndice R. Extração e dosagem de Si nos solos estudados.



Apêndice S. Determinação do conteúdo de Si na planta.

