

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DE DEFICIÊNCIA
NUTRICIONAL E FORMAS DE APLICAÇÃO VIA
FERTIRRIGAÇÃO E FOLIAR EM PLANTAS
FORRAGEIRAS**

Antonio Carlos Buchelt
Engenheiro Agrônomo

2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DE DEFICIÊNCIA
NUTRICIONAL E FORMAS DE APLICAÇÃO VIA
FERTIRRIGAÇÃO E FOLIAR EM PLANTAS
FORRAGEIRAS**

Antonio Carlos Buchelt

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Caione

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp,
Câmpus de Jaboticabal, como parte das
exigências para a obtenção do título de
Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

2019

B919s	Buchelt, Antonio Carlos Silício na mitigação de deficiência nutricional e formas de aplicação via fertirrigação e foliar em plantas forrageiras / Antonio Carlos Buchelt. -- Jaboticabal, 2019 100 f. : tabs., fotos Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientador: Renato de Mello Prado Coorientador: Gustavo Caione 1. Pastagem. 2. Silicato de sódio. 3. Silicato de Potássio. 4. Produção. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

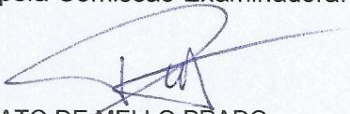
TÍTULO DA TESE: SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DE DEFICIÊNCIA NUTRICIONAL E FORMAS DE APLICAÇÃO VIA FERTIRRIGAÇÃO E FOLIAR EM PLANTAS FORRAGEIRAS

AUTOR: ANTONIO CARLOS BUCHELT

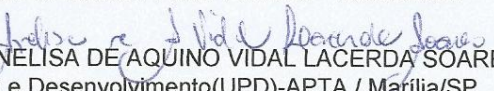
ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO

COORIENTADOR: GUSTAVO CAIONE

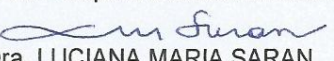
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal



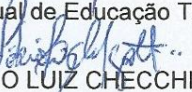
Pesquisadora Dra. ANELISA DE AQUINO VIDAL LACERDA SOARES
Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento(UPD)-APTA / Marília/SP



Profa. Dra. LUCIANA MARIA SARAN
Departamento de Tecnologia / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Prof. Dr. CLAUDENIR FACINCANI FRANCO
Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza / FATEC / Jaboticabal/SP



Prof. Dr. FÁBIO LUIZ CHECCHIO MINGOTTE
CTA - Colégio Técnico Agrícola / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 23 de julho de 2019

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

ANTONIO CARLOS BUCHELT – nascido em Juara, Mato Grosso, aos 13 dias do mês de junho de 1988, filho de Sérgio Buchelt e Anadir Aparecida Lorenzi Buchelt. Bacharel em Agronomia, pela Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT, Campus de Alta Floresta (2009), durante a graduação conduziu diversos experimentos nas áreas de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas. No ano de 2010, foi docente interino pela mesma Universidade ministrando as disciplinas de Edafologia e Manejo e Conservação do Solo e da Água. Durante o Mestrado (2012-2014), foi bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, desenvolvendo trabalho na área de Fertilidade do Solo em sistemas integrados com integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) na região de transição Cerrado Floresta Amazônica e realizou diversos trabalhos nas áreas da Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas. Entre o período de 2014 – 2017 foi docente interino nas áreas de Solos e Fitotecnia na Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT, Campus de Alta Floresta. Durante esse período foi autor/coautor de artigos científicos, membro de bancas de defesa de trabalhos de conclusão de curso e orientou trabalhos de conclusão de curso de Agronomia. Em julho de 2017 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciências do Solo) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Câmpus de Jaboticabal, onde trabalha com silício na mitigação de deficiência nutricional e formas de aplicação via fertirrigação e foliar em plantas forrageiras, sendo membro do Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da UNESP (GENPLANT).

Dedico

À minha esposa Rafaela de Andrade Polizelli pela força e companheirismo e ao meu filho Mateus Polizelli Buchelt.

À minha mãe Sr^a Anadir Aparecida Lorenzi Buchelt e meu pai Sr. Sergio Buchelt, por todos os seus ensinamentos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida e a Nossa Senhora Aparecida, por me proteger e iluminar a minha vida, e serem fontes de luz, inspiração e poder para buscar mais força, e também por não terem me deixado fraquejar em muitos momentos, sempre me conduzindo pelos melhores caminhos.

À toda a minha família, em especial à minha querida avó a Sr^a Maria Damim Lorenzi e ao meu querido avô o Sr. Idalino Lorenzi pelos ensinamentos e pelas orações.

Ao meu tio Leocir José pelo companheirismo e pela ajuda nas diversas viagens de Alta Floresta a Ribeirão Preto.

A minha sogra Antonia de Andrade Polizelli e ao meu sogro Paulo Polizelli pelas orações, ajuda e compreensão.

Ao Professor Dr. Renato de Mello Prado, pelos ensinamentos, orientação, compreensão e dedicação durante a condução dos trabalhos.

Ao Professor Dr. Gustavo Caione, pela orientação e dedicação durante a condução dos trabalhos realizados na Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT campus de Alta Floresta.

Aos membros da banca: Dra. Anelisa de Aquino Vidal Lacerda Soares, Prof.^a Dra. Luciana Maria Saran, Prof. Dr. Claudenir Facincani Franco e Prof. Dr. Fábio Luiz Checchio Mingotte, que aceitaram participar da comissão examinadora da tese.

À Sr^a Claudia (Claudinha) técnica do laboratório de Solos e Adubos da UNESP – Jaboticabal, pela ajuda e dedicação para a realização das análises de tecido vegetal.

Aos professores doutores Fábio Luiz Checchio Mingotte e Itamar Andrioli pelas contribuições na banca do Exame Geral de Qualificação.

Aos meus colegas da pós-graduação pela amizade, companheirismo e auxílio nestes anos de caminhada.

A todos do Genplant, em especial a Gelza, Kamilla, Antônio Márcio, Rafael, Jonas, Victor, Dalila, pela troca de conhecimento e ajuda na avaliações e análises.

Aos professores, Dr. Renato de Mello Prado, Dr. Arthur Bernardes Cecilio Filho, Dr^a Mara Cristina Pessôa da Cruz e Dr. Gustavo Caione pelos ensinamentos que favoreceram meu crescimento profissional.

À Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Campus de Jaboticabal e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) pela oportunidade e a UNEMAT Campus de Alta Floresta, pela estrutura para a condução e avaliação dos experimentos.

À todos que de forma direta ou indireta ajudaram na condução e avaliação dos experimentos em especial Andréia, Rafaela, Márcia, Felipe, Samiele e Matheus.

À todos os membros do laboratório de Microbiologia da UNEMAT em especial aos discentes Ana Paula, Giseudo e Tainara.

Aos amigos de república Hugo, Jeferson e Vinícius pela amizade e companheirismo.

À todos os amigos e colegas que fiz durante o tempo em que estive no município de Jaboticabal - SP.

À todos o meu Muito Obrigado!

SUMÁRIO

Resumo	iv
ABSTRACT -	v
CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Importância do silício para as plantas	3
2.2 Estudos sobre silício em plantas forrageiras.....	4
2.3 Contribuição do silício na mitigação dos efeitos da deficiência de macronutrientes	6
2.4 Formas alternativas de fornecimento de silício para forrageiras: via foliar e fertirrigação.....	8
3 OBJETIVO GERAL	9
4 REFERÊNCIAS	10
CAPÍTULO 2 - SILÍCIO ALIVIA OS EFEITOS DAS DEFICIÊNCIAS DE NITROGÊNIO, POTÁSSIO, CÁLCIO, MAGNÉSIO E ENXOFRE EM GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS CULTIVADAS EM SOLUÇÃO NUTRITIVA.....	14
Resumo	14
2 MATERIAL E MÉTODOS	16
3 RESULTADOS	18
3.1 Experimento 1	18
3.1.1 Massa seca.....	18
3.1.2 Acúmulo de nutrientes	19
3.1.3 Eficiência de uso.....	24
3.2 Experimento 2	27
3.2.1 Massa seca.....	27
3.2.2 Acúmulo de nutrientes	28
3.2.3 Eficiência de uso.....	32
3.3 Sintomatologia de deficiências nutricionais observadas nas plantas nos dois experimentos.....	35
4 DISCUSSÃO	39
4.1 Solução nutritiva completa	39
4.2 Nitrogênio	40
4.3 Potássio	41
4.4 Cálcio	42

4.5 Magnésio.....	42
4.6 Enxofre	43
5 CONCLUSÕES.....	44
6 REFERÊNCIAS	45
CAPÍTULO 3 – EFEITO DA FERTIRRIGAÇÃO COM SILÍCIO NA PRODUÇÃO E NO TEOR DE PROTEÍNA BRUTA DA PASTAGEM	48
RESUMO	48
1 INTRODUÇÃO.....	49
2 MATERIAL E MÉTODOS	50
2.1 Tratamentos e arranjo experimental.....	50
2.2 Condução do experimento	51
2.3 Aplicação do Si via fertirrigação.....	51
2.4 Coleta e análise dos dados	52
2.5 Análise estatística	52
3 RESULTADOS	53
3.1 Experimento 1	53
3.2 Experimento 2	57
4 DISCUSSÃO	62
5 CONCLUSÕES.....	64
6 REFERÊNCIAS	65
CAPÍTULO 4 - EFEITO DA PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE FONTES DE SILÍCIO NA PRODUÇÃO E NO TEOR DE PROTEÍNA BRUTA DA PASTAGEM	68
Resumo.....	68
1 INTRODUÇÃO.....	69
2 MATERIAL E MÉTODOS	70
2.1 Tratamentos e arranjo experimental.....	70
2.2 Condução do experimento	71
2.3 Pulverização do Si via foliar	71
2.4 Coleta e análise dos dados	72
2.5 Análise estatística	73
3 RESULTADOS	73
3.1 Experimento 1	73
3.2 Experimento 2	78
4 DISCUSSÃO	82
5 CONCLUSÕES.....	84

6 REFERÊNCIAS	85
---------------------	----

SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DE DEFICIÊNCIA NUTRICIONAL E FORMAS DE APLICAÇÃO VIA FERTIRRIGAÇÃO E FOLIAR EM PLANTAS FORRAGEIRAS

Resumo - A maior parte das áreas com pastagem no Brasil apresentam deficiência de nutrientes e para amenizar esse estresse nutricional pode ser utilizado o silício. Para o fornecimento de silício para as forrageiras tem-se opção de fontes solúveis a partir da fertirrigação ou pulverização foliar, mas é pouco estudado. Nesse sentido foram realizados seis experimentos com as forrageiras a BRS Zuri (*Panicum maximum*) e a BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*), em condição de casa de vegetação. Realizaram-se dois experimentos com cada uma das forrageiras, nos quais os tratamentos foram constituídos por solução completa (controle), e omissão individual de nitrogênio, potássio, cálcio, magnésio e enxofre, na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si) na concentração de 2 mmol L⁻¹, aplicado via solução nutritiva, na forma de silicato de sódio e potássio estabilizado. Dois experimentos com as duas forrageiras com os tratamentos arranjados em esquema fatorial (4x2), sendo quatro concentrações de Si (0, 1, 2 e 4 mmol L⁻¹) e duas fontes de Si: silicato de sódio e potássio estabilizado e silicato de potássio. Os outros dois experimentos com as mesmas forrageiras foram arranjados em esquema fatorial (4x2), sendo quatro concentrações de Si (0; 0,25; 0,50; 0,75 g L⁻¹) e duas fontes: silicato de sódio e potássio estabilizado e silicato de potássio. Ficou evidenciado nos dois primeiros estudos a importância da aplicação de silício via solução nutritiva no alívio da deficiência de K, Ca e Mg das forrageiras, pois aumentou a produção de massa seca da parte aérea, da raiz e do material residual da touceira, devido a maior eficiência de uso destes nutrientes, não havendo efeito do elemento benéfico para deficiência de N e S. Nos estudos com a aplicação de silício via fertirrigação e foliar as variáveis avaliadas independente da fonte, aumentaram com a aplicação do Si nas duas forrageiras. Portanto, o uso de Si via fertirrigação ou foliar é viável agronomicamente no cultivo das forrageiras devido ao aumento da produção e do teor de proteína bruta das mesmas.

Palavras-chave: Pastagem, silicato de sódio, silicato de potássio, produção

SILICON IN NUTRITIONAL DISABILITY MITIGATION AND FORMS OF APPLICATION BY FERTIRIGATION AND FOLIATION IN FORAGE PLANTS

ABSTRACT - Most pasture areas in Brazil present nutrient deficiency, and silicon application could be used to alleviate this nutritional stress. To supply silicon to the forages, there are the option of soluble sources from fertigation or foliar spraying, but there is a lack of studies in this regard. Taking that into account, six experiments were carried out with the forages BRS Zuri (*Panicum maximum*) and BRS RB331 Ipyporã (*Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha* hybrid) under greenhouse conditions. Two experiments were performed with each of the forages, in which, the treatments consisted of :complete solution (control), and individual omission of nitrogen, potassium, calcium, magnesium and sulfur, in the absence (-Si) and in the presence of silicon (+Si), at a concentration of 2 mmol L⁻¹, applied via nutrient solution, in the form of stabilized potassium and sodium silicate. Two more experiments were performed, with both forages in a factorial scheme design (4x2), with four Si concentrations (0, 1, 2 and 4 mmol L⁻¹) and two Si sources: stabilized sodium and potassium silicate and potassium silicate. The other two experiments with the same forages were arranged in a factorial scheme (4x2), with four Si concentrations (0, 0.25, 0.50, 0.75 g L⁻¹) and two sources: stabilized sodium and potassium silicate and potassium silicate. In the first two studies, it was evidenced the importance of silicon application via solution to alleviate K, Ca and Mg deficiencies, due the increase observed in the dry mass production of shoots, roots and clump residual material, be enhancing the efficiency of use of these nutrients, no effect of the element for N and S deficiency was observed. In studies with silicon foliar application and fertigation, the variables evaluated, regardless of the source, increased with the Si application in both forages. Therefore, the use of Si by fertigation or foliar application is viable agronomic ally in forage culture due to the increase of production and crude protein content.

Keywords: Pasture, sodium silicate, potassium silicate, production

CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

1 INTRODUÇÃO

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante na litosfera, representando 27,7%, sendo superado apenas pelo oxigênio. Este elemento está presente em minerais primários e secundários como feldspato, augita, quartzo, mica, caulinita, montmorilonita, illita e clorita, com resistência diferente ao intemperismo (Malavolta, 1980; Exley, 1998). No entanto, o teor de Si disponível é relativamente baixo dependendo do solo.

Existem alguns relatos que o Si pode favorecer o crescimento das plantas sem necessariamente estar em condição de estresse (Ghasemi Mianaei et al., 2011; Zia et al., 2017). No entanto, a maioria dos estudos indicam que o Si é um elemento multiestresse diminuindo estresse bióticos como pragas e doenças e abióticos como déficit hídrico e salino, toxicidade à metais, alta radiação, altas temperaturas e geadas (Feng, 2004). Os estudos envolvendo os efeitos do Si na mitigação de estresse por deficiências nutricionais são escassos, sendo restritos a alguns nutrientes e poucas espécies, a exemplo do potássio em plantas de sorgo (Chen et al., 2016) e de soja (Miao et al., 2010), nitrogênio em plantas de arroz (Deus et al., 2019), magnésio em milho (Hosseini et al., 2019) e enxofre em cevada (Maillard et al., 2018).

Este fato é preocupante, pois a maioria dos solos de regiões tropicais apresentam baixos teores disponíveis de nutrientes, tendo extensas áreas de pastagens degradadas, ocorrendo deficiências nutricionais.

Para o fornecimento de silício às culturas pode ser utilizada a escória de siderurgia, que é uma fonte de Si abundante no país, sendo constituída basicamente por silicato de cálcio e magnésio e termofosfatos magnesianos (Korndörfer e Datnoff, 1995). No entanto, são fontes de baixa solubilidade em água e podem, dependendo da origem, apresentar traços de metais potencialmente tóxicos (Freitas et al., 2011). A quantidade a ser aplicada na área quando utilizadas essas fontes de Si é relativamente grande, o que pode inviabilizar a aplicação em regiões mais distantes do local de origem.

Uma forma que pode viabilizar o fornecimento de Si para as plantas forrageiras, é a aplicação de silicato de potássio ou silicato de sódio. O silicato

de potássio e o silicato de sódio são fontes interessantes de fornecimento de Si, pois são solúveis e concentradas, podendo ser aplicadas via foliar (Freitas et al., 2011) ou fertirrigação, facilitando o aproveitamento desse elemento pelas plantas.

A mistura estabilizada de silicato de sódio e silicato de potássio é outra fonte alternativa de Si, que pode ser utilizada em plantas forrageiras. Contudo, ainda há poucos estudos sobre essa fonte na literatura. O fato que torna essa fonte interessante é a presença de um estabilizante em sua constituição com característica umectante, onde espera-se uma velocidade de condensação menor, maior persistência da gota aplicada sobre a superfície foliar e consequentemente maior a absorção de Si, refletindo em aumento no teor e no acúmulo do elemento na planta. Sendo assim, acredita-se o silicato de sódio e potássio estabilizado seja uma fonte alternativa, que apresente desempenho superior ao silicato de potássio.

Em trabalho inédito realizado em gramíneas forrageiras (*Brachiaria decumbens* e *Panicum. maximum*) Sávio et al. (2011), avaliaram a produção de biomassa e conteúdo de silício, sob diferentes fontes de silicato (silicato de sódio, rocksil® e silicato de potássio) com concentrações correspondentes a 40 g L⁻¹ de Si. Os autores constataram que as aplicações foliares de Si promoveram acréscimos na produção de massa seca e na absorção do elemento nas forrageiras. Já em relação a fertirrigação com Si não há relato de trabalho e seu benefício na produção e na qualidade de plantas forrageiras.

É evidente a falta de informações sobre os efeitos benéficos do Si, em plantas forrageiras submetidas a omissão de nutrientes, assim como os efeitos da aplicação deste elemento via fertirrigação e foliar na produção e na qualidade das forrageiras.

Diante disso, surgem as hipóteses descritas a seguir.

- 1) O Si poderia aliviar os efeitos da deficiência de N, K, Ca, Mg e S devido a sua contribuição na eficiência de uso de nutrientes, favorecendo a produção de massa seca de forrageiras cultivadas em solução nutritiva.
- 2) A fertirrigação com silício independente da fonte solúvel é viável para cultivo de forrageiras devido ao aumento do número de perfilhos, folhas e da área foliar potencializando, a produção e também a

qualidade, por aumentar a eficiência de uso do N e o teor de proteína bruta.

- 3) A pulverização foliar de Si independente da fonte em concentrações, inferior a 1 g L^{-1} é viável agronomicamente para as forrageiras, por aumentar a produção devido incremento do perfilhamento e da área foliar, e a qualidade da forrageira devido aumento do teor de proteína.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância do silício para as plantas

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante na superfície terrestre, sendo superado somente pelo o oxigênio (Epstein, 2009), junto com o oxigênio representa 50-70% da crosta terrestre (Ma e Yamaji, 2008). Entretanto, devido aos cultivos intensivos, esse elemento pode ter sua disponibilidade para as plantas diminuída drasticamente (Korndörfer, 2006).

No solo o Si está presente na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) ou ácido ortossilícico $[\text{Si}(\text{OH})_4]$, adsorvido em óxidos (Fe, Al e Mn), em formas amorfas provenientes da decomposição da matéria orgânica, ou ainda como Si estrutural em minerais de silicatados (Korndörfer et al., 2002).

O Si é absorvido pelas plantas na forma de ácido monossilícico, através de mecanismo ativo, passivo ou exclusivo, sendo esses processos determinantes na classificação quanto ao acúmulo deste elemento na parte aérea da planta. Assim as plantas são classificadas em acumuladoras ($>10 \text{ g kg}^{-1}$ de Si), acumuladoras intermediárias ($5 - 10 \text{ g kg}^{-1}$ de Si) e exclusoras ou não-acumuladoras ($<5 \text{ g kg}^{-1}$ de Si) (Mitani e Ma, 2005). O Si é translocado pelo xilema até à parte aérea na mesma forma química que é absorvido, sendo depositado na parede celular das células da epiderme das folhas, na camada subcuticular e nos espaços intercelulares. Devido ao processo de evaporação da água ou o seu transporte para outros tecidos, o ácido monossilícico se condensa em sílica gel polimerizada, não podendo ser redistribuído pela planta, tornando-se imóvel (Ma et al., 2011).

O Si é um elemento químico comumente encontrado em tecidos vegetais mesmo não sendo considerado um nutriente e sim elemento benéfico para as plantas, pois, está envolvido em diversas funções, entre elas físicas de regulação da evapotranspiração e sendo capaz de formar uma barreira de

resistência mecânica a entrada de fungos e bactérias para o interior da planta, dificultando também, o ataque de insetos sugadores e herbívoros (Epstein, 2001; Melo et al., 2003). O acúmulo de silício na parede celular na forma de sílica amorfa confere a esse elemento o efeito da proteção mecânica. Na epiderme da folha, o Si junta-se à celulose, podendo estar presente nos estômatos, nos tricomas e nos elementos de vasos (Ma e Yamaji, 2006), que causa o enriquecimento do vegetal, no qual ajudará a mitigar o estresse causado por fatores bióticos e abióticos.

O acúmulo de silício nos órgãos de transpiração forma uma camada dupla de sílica cuticular, que reduz a transpiração das plantas, refletindo em exigência menor de água. Fato esse importante principalmente para as gramíneas que se desenvolvem nos solos de clima tropical, no qual o período de estiagem é bem definido.

O aumento do teor de Si nas epiderme das folhas devido a aplicação de Si beneficia diversas culturas (Epstein, 1999). No entanto, a resistência maior não é apenas devido ao fortalecimento físico (Ma, 2004), mas também ao estímulo nos processos bioquímicos e fisiológicos (Miao et al., 2010; Chen et al., 2016). Trabalhos indicam que existe uma associação indireta da aplicação de Si no aumento dos teores de clorofila (Jafarei et al., 2015), e das taxas fotossintéticas (Zuccarini, 2008; Chen et al., 2016). Esses efeitos são favorecidos pelo Si, pois esse elemento proporciona desenvolvimento de folhas mais eretas, que possibilitam melhoria na absorção de luz (Deren et al., 1993). Além disso, o Si pode atuar na redução das taxas de transpiração (Gao et al., 2006), aumento do conteúdo de água e da absorção de nutrientes pelas plantas (Mali e Aery, 2008).

2.2 Estudos sobre silício em plantas forrageiras

Os estudos com a aplicação de silício em plantas forrageiras concentram-se em sua maior parte com fontes de silício de baixa solubilidade como é o caso dos silicatos de cálcio e magnésio. As aplicações destes produtos são via solo e as doses de silicato são elevadas (em $t\ ha^{-1}$), aumentando os custos desta prática. Além disso, causam mudança no valor pH do solo o que dificulta o seu emprego em solos corrigidos (Madeiros et al., 2009; Nogueira et al., 2012) e

podem conter metais potencialmente tóxicos nocivos às plantas e ao ambiente (Wally et al., 2015).

Avaliando o acúmulo de silício dos capins *Brachiaria decumbens* e *Brachiaria brizantha* submetidas a cinco doses de Si: 0; 242; 484; 968 e 1.452 kg ha⁻¹, na forma de silicato de cálcio, Melo et al. (2003) observaram que a aplicação de Si ao solo aumentou o teor desse elemento em ambas as espécies, mas não afetou a produção de massa seca. Resultado semelhante foi observado por Melo, Monteiro e Bona (2010) em plantas forrageiras. Korndörfer et al. (2010), utilizando a mesma fonte de silício nas doses 0, 500, 1.000, 1.500 e 2.000 kg ha⁻¹ e em duas forrageiras (*Brachiaria brizantha* e *Panicum maximum*), constataram que o silicato foi eficiente para elevar as concentrações de Si, nas duas forrageiras sem alterar a produção de massa seca. Sarto et al. (2019) avaliaram a aplicação de 0, 1, 2, 4 e 6 Mg ha⁻¹ de silicato de cálcio e magnésio na *Brachiaria* Convert HD364 e constataram que houve aumento nos teores de Si nas folhas, no entanto, esse fato não influenciou na produção e no valor nutritivo das plantas.

Estudando a aplicação de fontes de silício (silicato de cálcio, silicato de potássio e sílica gel) em quatro espécies forrageira (*Chloris gayana*, *Phleum pratense*, *Sorghum sudanense* e *Festuca arundinacea*), Eneji et al. (2008) observaram que o silicato de potássio foi a melhor fonte para espécies avaliadas, pois produziu as maiores respostas de rendimento de biomassa. Além disso, os autores observaram que a aplicação de Si melhora a absorção do N, P e K independente da espécie.

Uma forma alternativa de fornecimento de Si seria via fertirrigação ou pulverização foliar utilizando quantidades baixas por área (em g ha⁻¹ ou kg ha⁻¹). No entanto, poucos estudos vêm sendo realizados para verificar a viabilidade da aplicação de silício via fertirrigação ou foliar, principalmente, em razão do Si não ser considerado um elemento essencial às plantas. Estudo pioneiro e único com aplicação foliar de silício em forrageiras foi desenvolvido por Sávio et al. (2011), sendo avaliadas quatro pulverizações foliares de silício de três fontes (silicato de potássio, o silicato de sódio e uma rocha silicatada) na concentração de 40 g L⁻¹ em gramíneas forrageiras (*Brachiaria decumbens* e *Panicum maximum*). Os autores verificaram, que não houve aumento do acúmulo de Si nas plantas e da

produção de massa seca. Este fato pode ter ocorrido, devido a concentração elevada do Si na calda induzindo polimerização na superfície foliar.

2.3 Contribuição do silício na mitigação dos efeitos da deficiência de macronutrientes

O Si é considerado um elemento benéfico às plantas, pois apresenta capacidade em diminuir os efeitos maléficos causados por algum tipo de estresse, como, por exemplo, a deficiência nutricional (Hernandes-Apaolaza, 2014). A absorção desse elemento é acrescida quando a planta encontra-se sob estresse, pois é estimulada como forma de defesa contra fatores bióticos ou abióticos. Com isso, o processos de absorção, transporte e redistribuição dos nutrientes são favorecidos, a fim de aumentar a tolerância vegetal quanto a deficiência nutricional (Ma, 2004; Ma e Yamaji, 2006).

Em plantas deficientes em nutrientes diversos distúrbios metabólicos e celulares são desencadeados. No entanto, a aplicação de Si pode reduzir esse estresse nutricional, sendo esse elemento eficiente em minimizar os efeitos deletérios provocados pela deficiência de macronutrientes nas plantas.

Na cultura do arroz, Deus et al. (2019), observaram que houve benefício do Si no alívio da deficiência nutricional de N, sendo constatado que a mitigação do estresse pela aplicação de Si foi diretamente refletida no aumento da biomassa seca e no rendimento dos grãos. Segundo os autores o silício pode interferir no estado nutricional da planta sob condições de estresse, equilibrando a absorção de nutrientes, transporte e distribuição, o que poderia melhorar o crescimento das plantas e a produção de biomassa. Este resultado pode, no entanto, estar relacionado com o tipo de estresse. Alguns pesquisadores atribuem o efeito de alívio de estresse do Si ao fato do elemento desempenhar um papel importante na proteção e alteração dos mecanismos fotossintéticos, aumentando a eficiência fotossintética, assim como a eficiência e uso do nitrogênio (Li et al., 2015).

Os benefícios do fornecimento de Si na mitigação da deficiência de nutrientes foi constatado por Chen et al. (2016) com a omissão de potássio (K) na cultura do sorgo. Os autores constataram que o Si diminuiu os sintomas visuais da deficiência desse nutriente, que foi a clorose e necrose nas folhas mais velhas. Isso ocorreu devido ao K influenciar na redução do acúmulo de

putrescina, que são compostos nitrogenados que em altas concentrações tornam-se tóxico aos vegetais (Prado, 2008). Além desse fato, foi constatado por Chen et al. (2016) que as plantas em estresse nutricional tratadas com Si apresentaram maior eficiência do fotossistema II, redução de espécies reativas de oxigênio e aumento dos teores de clorofila em relação ao controle. Os autores relatam que o fornecimento de Si via sistema radicular ocasionou melhorias no desenvolvimento das plantas e nas taxas de atividade fotossintética. Além disso, incremento nos teores de potássio no xilema, o que pode estar relacionado com o aumento da condutividade hídrica nas plantas, melhorando a absorção de água e seu transporte, comprovando o potencial mitigatório do silício.

O alívio da deficiência de K em plantas tratadas com Si pode ainda estar relacionado com aperfeiçoamento no transporte hídrico da raiz através de um aumento na atividade das aquaporinas, responsáveis pelo transporte hídrico nas plantas, e que podem ter a expressão de seus genes (PIPs) que é incitada pelo Si (Chen, et al., 2016).

Em outro trabalho, onde foi avaliado o efeito da aplicação de Si na deficiência de K na cultura da soja, Miao et al. (2010), observaram que a aplicação de Si em relação ao tratamento testemunha resultou em incremento do comprimento de raízes na cultura da soja, na concentração de K nas folhas, caules e raízes. Além disso, o Si provocou a redução de espécies reativas de oxigênio devido ao aumento na atividade de antioxidantes como a superóxido dismutase, a catalase e a peroxidase.

Na literatura não há relatos que o silício atenua diretamente os danos provocados pela deficiência de cálcio (Ca). No entanto, há trabalhos indicando que o Si forma complexos com polímeros estruturais das células, tais como pectinas e calose (Boylston et al., 1990) e ainda ligações cruzadas com ligninas e carboidratos via associações com ácidos fenólicos ou anéis aromáticos (Inanaga et al., 1995), colaborando com a estruturação da parede celular. Esse fato está relacionado diretamente com a função do cálcio, que é formar os pectatos de cálcio da parede celular que são responsáveis pela estruturação das células (Malavolta et al., 1989). Portanto é possível que em plantas com deficiência de Ca o Si auxilie na estrutura e na junção de componentes da parede celular a qual o nutriente esteja envolvido.

A deficiência de magnésio (Mg) nas plantas prejudica seu papel biológico na ativação enzimática e na composição química da clorofila (Prado, 2008). A utilização do silício pode contribuir para diminuir o estresse provocado pela deficiência desse nutriente, devido a associação indireta deste elemento benéfico no aumento dos teores de clorofila (Xie et al., 2014), e das taxas fotossintéticas (Zuccarini, 2008; Chen et al., 2016), que pode colaborar com melhor eficiência de uso do Mg absorvido em produção de massa seca.

Hosseini et al. (2019), constataram que a aplicação de Si em plantas de milho expostas à deficiência de Mg, regula os metabólitos primários e aumenta os níveis de fito-hormônios (citocinina), que mantêm assim o crescimento e o desenvolvimento das plantas mesmo com a deficiência desse nutriente.

O enxofre faz parte de compostos orgânicos importantes como cistina, cisteína, metionina e as proteínas e ainda tem função enzimática e estrutural (Prado, 2008). Portanto, a deficiência desse nutriente pode causar diversos danos as plantas e pode ser amenizada pela aplicação de Si. Maillard et al. (2018), constataram que na cultura da cevada submetida à deficiência de S, o Si influencia no metabolismo das plantas retardando a senescência das folhas e mantendo o maior teor de clorofila. Já nas raízes das plantas deficientes em S, o Si aumenta a absorção de sulfato e nitrato. Aumentando a absorção do nitrato, ocorre incremento nas quantidades de glutamina e de prolina. Além disso o Si promoveu aumento de sacarose nas raízes, o que é importante para o crescimento das raízes sob estresse.

2.4 Formas alternativas de fornecimento de silício para forrageiras: via foliar e fertirrigação

O silicato de potássio e o silicato de sódio são fontes solúveis de silício que podem ser empregadas, para fornecer Si via foliar ou radicular para as plantas forrageiras e podem ser uma opção em relação aos silicatos de cálcio e magnésio que são as fontes de silício mais utilizadas. Porém, os silicatos de sódio apresentam altas concentrações de sódio (Na), que podem restringir a sua utilização, por isso o silicato de potássio é o mais utilizado (Zanão Júnior et al., 2009).

Uma outra opção que pode ser utilizada na aplicação via foliar e fertirrigação são os silicatos estabilizados, que são silicatos solúveis como o

silicato de sódio e/ou silicato de potássio dissociados previa e parcialmente e estabilizados com aditivos (Felisberto, 2018). Os teores de Si e os valores pH apresentados por essas fontes são bem próximas aos dos silicatos de sódio e de potássio. No entanto, apresentam a vantagem de estarem estabilizados, ainda atuam como adjuvantes no caso da aplicação foliar.

A polimerização do Si em solução pode iniciar a partir da concentração de 3 mmol L⁻¹ (Birchall, 1995). Esta resulta na formação de dímeros, trímeros e cadeias poliméricas de Si (McKeague e Cline, 1963), que em contato com as plantas, seja via foliar ou fertirrigação não são absorvidas. No entanto, o preparo de soluções com baixas concentrações de Si, independente da fonte pode manter sua forma monomérica, beneficiando a absorção do elemento pela planta. Uma das formas para elevar a absorção de Si nas aplicações via foliar e fertirrigação pelas plantas, seria o aumento do número das aplicações, pois assim é disponibilizada com mais frequência e forma molecular na qual a planta mais absorve o elemento. A importância da maior frequência de aplicação do elemento ocorre porque apenas uma pulverização foliar de Si não é suficiente para promover a função estrutural do Si que é a formação da dupla camada sílica abaixo da cutícula nas células epidérmicas das folhas em crescimento (Agostinho et al., 2017).

Há expectativas que as fontes de Si solúveis (silicato de potássio e silicato de sódio) possam aumentar a eficiência das aplicações de Si via foliar e fertirrigação, pois são fontes mais estáveis e com baixas concentrações, reduzindo as perdas por polimerização (Ma et al., 2011).

3 OBJETIVO GERAL

Objetiva-se avaliar os efeitos de fontes solúveis de silício em duas cultivares de forrageiras, a BRS Zuri (*Panicum maximum*) e a BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*), submetidas a estresse ocasionado pela deficiência de nutrientes, bem como avaliar os efeitos da aplicação de silício via fertirrigação e foliar, na produção e no teor de proteína bruta das forrageiras.

4 REFERÊNCIAS

Agostinho FB, Tubana BS, Martins MS, Datnoff LE (2017) Effect of different silicon sources on yield and silicon uptake of rice grown under varying phosphorus rates. **Plants** 6:35.

Birchall JD (1995) The essentiality of silicon in biology. **Chemical Society Reviews** 24:351-357.

Boylston EK, Hebert JJ, Hensarling TP, Bradow JM, Thibodeaux DP (1990) Role of silicon in developing cotton fibers. **Journal of Plant Nutrition** 13: 131-148.

Chen D, Cao B, Wang S, Liu P, Deng X, Yin L, Zhang S (2016) Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific reports** 6:22882.

Melo SPD, Monteiro FA, Bona FDD (2010) Silicon distribution and accumulation in shoot tissue of the tropical forage grass *Brachiaria brizantha*. **Plant and soil** 336:241-249.

Deren CW, Glaz B, Snyder GH (1993) Leaf-tissue silicon content of sugarcane genotypes grown on everglades histosols. **Journal of Plant Nutrition** 16:2273 - 2280.

Deus ACF, de Mello Prado R, Alvarez RDCF, de Oliveira RLL, Felisberto G (2019) Role of silicon and salicylic acid in the mitigation of nitrogen deficiency stress in rice plants. **Silicon** 1:9.

Eneji AE, Inanaga S, Muranaka S, Li J, Hattori T, An P, Tsuji W (2008) Growth and nutrient use in four grasses under drought stress as mediated by silicon fertilizers. **Journal of Plant Nutrition** 31:355-365.

Epstein E (2001) Silicon in plants: facts vs concepts. In: Datnoff LE, Snyder GH, Korndörfer GH (Eds.) Silicon in agriculture. Amsterdam: **Elsevier Science** 8:1-15

Epstein E (1999) Silicon. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto 50:641-664.

Epstein, E (2009) Silicon: its manifold roles in plants. **Annals of Applied Biology** 155:155-160.

Exley C (1998) Silicon in life: a bioinorganic solution to bioorganic essentiality. **Journal of Inorganic Biochemistry** 69:139-144.

Felisberto G (2018) **Silício na mitigação de estresse por deficiência de zinco em plantas de arroz e soja**. 63 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção vegetal) – Unesp, Jaboticabal.

Feng W, Brash J, Zhu S (2004) Atom-transfer radical grafting polymerization of 2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine from silicon wafer surfaces. **Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry** 42:2931-2942.

Freitas LBD, Coelho EM, Maia SCM, Silva TRB (2011) Foliar fertilization with silicon in maize. **Revista Ceres** 58:262-267.

Gao X, Zou C, Wang L, Zhang F (2006) Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. **Journal of Plant Nutrition** 29:1637-1647.

Ghasemi Mianaei A, Mobasser HR, Madani H, Dastan S (2011) Silicon and potassium application facts on lodging related characteristics and quantity yield in rice (*Oryza sativa* L.) Tarom Hashemi variety. **Journal of New Finding in Agriculture** 5: 423-435.

Hernandez-Apaolaza L (2014) Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? a review. **Planta** 240:447–458.

Hosseini SA, Naseri Rad S, Ali N, Yvin JC (2019) The ameliorative effect of silicon on maize plants grown in mg-deficient conditions. **International Journal of Molecular Sciences** 20:969.

Inanaga S, Okasaka A, Tanaka S (1995) Does silicon exist in association with organic compounds in rice plant?. **Soil Science and Plant Nutrition** 41:111-117.

Jafarei Y, Tabrizi EFM, Bybordi A (2015) Effect of different stages and times of silicon foliar spray on yield and yield components of bean. **Cumhuriyet Science Journal** 36:81-92.

Korndörfer GH (2006) **Os elementos benéficos**. In: M. S. Fernandes (ed.). *Nutrição mineral de plantas*, Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 598–638.

Korndörfer, G.H., Pereira, H.S., Camargo, M.S., 2002. Papel do silício na produção de cana-de-açúcar. **STAB - Sociedade dos Técnicos Açúcareiros e Alcooleiros** 21:6-9.

Korndörfer GH, Datnoff LE (1995) Adubação com silício: uma alternativa no controle de doenças da cana-de-açúcar e do arroz. **Informações Agronômicas** 70:1-3.

Korndörfer PH, Silva GCD, Teixeira IRT, Silva AGD, Freitas RSD (2010) Efeito da adubação silicatada sobre gramíneas forrageiras e características químicas do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 40:283-290.

Li P, Song A, Li Z, Fan F, Liang Y (2015) Silicon ameliorates manganese toxicity by regulating both physiological processes and expression of genes associated with photosynthesis in rice (*Oryza sativa* L.). **Plant Soil** 397:289–301.

Ma JF (2004) Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Science and Plant Nutrition** 50:11-18.

Ma JF, Yamaji N (2006) Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science** 11:392-397.

Ma JF, Yamaji N, Mitani-Ueno N (2011) Transport of silicon from roots to panicles in plants. **Proceedings of the Japan Academy, Series B** 87:377–385.

Ma JF, Yamaji N (2008) Functions and transport of silicon in plants. **Cellular and molecular life sciences : CMLS** 65:3049–3057.

Madeiros L, Almeida GM, Aquino BF (2009) Aplicação de escória siderúrgica no solo: efeito sobre o fósforo solúvel. **Engenharia Ambiental** 6:27–37.

Maillard A, Ali N, Schwarzenberg A, Jamois F, Yvin JC, Hosseini SA (2018) Silicon transcriptionally regulates sulfur and ABA metabolism and delays leaf senescence in barley under combined sulfur deficiency and osmotic stress. **Environmental and Experimental Botany** 155:394-410.

MALAVOLTA E (1980). **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres.

Malavolta E, Malavolta ML, Cabral CP, Antonioli F (1989) Sobre a composição mineral do aguapé (*Eichornia crassipes*). **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz** 46:155-162.

Mali M, Aery NC (2008) Influence of silicon on growth, relative water contents and uptake of silicon, calcium and potassium in wheat grown in nutrient solution. **Journal of Plant Nutrition** 31:1867-1876.

McKeague JA, Cline MG (1963) Silica in the soil. **Advances in Agronomy** 15:339–396.

Melo SPD, Korndörfer GH, Korndörfer CM, Lana RMQ, Santana DGD (2003) Silicon accumulation and water deficit tolerance in *Brachiaria* grasses. **Scientia Agricola** 60: 755-759.

Miao BH, Han XG, Zhang WH (2010) The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium-deficient medium. **Annals of Botany** 105:967-973.

Mitani N, Ma JF (2005) Uptake system of silicon in different plant species. **Journal of Experimental Botany** 56:1255–1261

Nogueira NO, Tomaz MA, Andrade FV, Reis EF, Brinate SVB (2012) Influência da aplicação de dois resíduos industriais nas propriedades químicas de dois solos cultivados com café arábica. **Ciência Agrônômica** 43:11–21.

Prado RM (2008) **Manual de nutrição de plantas forrageiras**. Jaboticabal: Funep, 1, 261-280.

Sarto JRW, Neres MA, Nath CD, Bassegio D, Sarto MVM (2019) Can silicon (Si) fertilization influence the production and nutritional value of *Urochloa* Convert HD364?. **Semina: Ciências Agrárias** 40:1317-1328.

Sávio FL, Carneiro Da Silva G, Teixeira IR, Borém A (2011) Produção de biomassa e conteúdo de silício em gramíneas forrageiras sob diferentes fontes de silicato. **Semina: Ciências Agrárias** 32:103-110.

Wally Z, Van Grunsven W, Claeysens F, Goodall R, Reilly G (2015) Porous titanium for dental implant applications. **Metals** 5:1902-1920.

Xie Z, Song F, Xu H, Shao H, Song R (2014) Effects of silicon on photosynthetic characteristics of maize (*Zea mays* L.) on alluvial soil. **The Scientific World Journal** 2014:1-6.

Zanão Júnior LA, Fontes RLF, Avila VT (2009). Aplicação do silício para aumentar a resistência do arroz à mancha-parda. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 44:203-206.

Zia Z, Bakhat HF, Saqib ZA, Shah GM, Fahad S, Ashraf MR, Hammad HM, Naseem W, Shahid M (2017) Effect of water management and silicon on germination, growth, phosphorus and arsenic uptake in rice. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 144:11-18.

Zuccarini, P. (2008). Effects of silicon on photosynthesis, water relations and nutrient uptake of *Phaseolus vulgaris* under NaCl stress. **Biologia Plantarum** 52:157-160.

CAPÍTULO 2 - SILÍCIO ALIVIA OS EFEITOS DAS DEFICIÊNCIAS DE NITROGÊNIO, POTÁSSIO, CÁLCIO, MAGNÉSIO E ENXOFRE EM GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS CULTIVADAS EM SOLUÇÃO NUTRITIVA

Resumo: Objetivou-se avaliar se a aplicação de silício na solução nutritiva é eficiente em aliviar estresse, ocasionados pela deficiência de nutrientes (N, K, Ca, Mg e S), nas forrageiras BRS Zuri (*Panicum maximum*) e BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*). Foram desenvolvidos dois experimentos em casa de vegetação, com as duas forrageiras, sendo as plantas cultivadas em solução nutritiva em vasos preenchidos com areia lavada. Os tratamentos foram arrançados em blocos inteiramente casualizados e com cinco repetições. Os tratamentos foram constituídos por solução completa (controle), e omissão individual de nitrogênio, potássio, cálcio, magnésio e enxofre, na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si) na concentração de 2 mmol L⁻¹, aplicado via solução nutritiva, na forma de silicato de sódio e potássio estabilizado. Foram avaliados a massa seca da parte aérea, raiz e do material residual da touceira, acúmulo e eficiência do uso dos nutrientes e a descrição de sintomas de deficiência nutricional. Ficou evidenciado a importância do Si no alívio da deficiência de K, Ca e Mg das forrageiras, pois aumentou a produção de massa seca da parte aérea, da raiz e do material residual da touceira, devido a maior eficiência de uso destes nutrientes não havendo efeito do elemento benéfico para deficiência de N e S.

Palavras-chave: Pastagem, silicato de sódio, silicato de potássio, omissão de nutrientes

1 INTRODUÇÃO

O cultivo das poáceas dos gêneros *Panicum* e *Brachiaria*, tem se destacado na pecuária pela capacidade de adaptação às diversas condições ambientais e de manejo (Monteiro et al., 1995) devido à alta capacidade de produção de massa seca foliar de boa qualidade (Kissmann, 1997), se a disponibilidade de nutrientes estiver adequada.

Nos cultivos das forrageiras em regiões tropicais, os problemas de deficiência nutricional, especialmente dos macronutrientes ocorrem com alta frequência, devido à baixa fertilidade do solo (Prado et al., 2011) e ao uso restrito de fertilizantes, prejudicando o crescimento destas plantas.

Para diminuir o estresse nutricional das forrageiras tem-se o silício, um elemento benéfico que pode diminuir os efeitos deletérios da deficiência de nutrientes, desde que essa deficiência não seja muito severa. Na literatura há apenas estudos restritos ao potássio em plantas de sorgo Chen et al. (2016) e soja (Miao et al., 2010), nitrogênio em plantas de arroz (Deus et al., 2019), magnésio em milho (Hosseini et al., 2019) e enxofre em cevada (Maillard et al., 2018). No entanto, existem alguns relatos de que o Si pode favorecer o crescimento das plantas sem necessariamente estar em condição de estresse (Ghasemi Mianaei et al., 2011; Zia et al., 2017).

Os efeitos benéficos do Si podem estar relacionados a substituição de parte do carbono de estruturas orgânicas (Cooke e Leishman, 2012) e promoção de ligações cruzadas com ligninas e carboidratos (Inanaga et al., 1995) colaborando com a estruturação da parede celular das folhas, órgão que concentra esse elemento nas gramíneas (Neu et al., 2017).

O custo energético para a planta em incorporar Si na cadeia orgânica é relativamente baixo (Raven, 1983; Schaller et al., 2012; Neu et al., 2017). Além disso, o Si pode aumentar teores de clorofila (Xie et al., 2014) e ativar enzimas que são importantes no metabolismo vegetal (Liu et al., 2009). A soma destes efeitos do Si na planta poderia beneficiar o metabolismo nutricional potencializando a eficiência de uso dos nutrientes para produção de massa seca. Entretanto, isso necessita ser pesquisado. A possibilidade destes benefícios do Si aumenta especialmente em plantas acumuladoras deste elemento como as poáceas forrageiras (Melo, Monteiro e Manfredini, 2007), que são amplamente

cultivadas no mundo. Além disso, o Si é considerado um nutriente para os animais dada a sua importância na formação óssea e dos tecidos conjuntivos (Carlisle, 1972), podendo a ingestão de forragem enriquecida com esse elemento, contribuir para atender sua exigência nutricional.

Diante disto, surge a hipótese que o Si poderia aliviar os efeitos da deficiência de N, K, Ca, Mg e S devido a sua contribuição na eficiência de uso de nutrientes favorecendo a produção de massa seca de duas forrageiras cultivadas em solução nutritiva. Assim, esta pesquisa, de forma inédita, pode somar mais um efeito benéfico ao Si, ainda pouco conhecido, caso possa aliviar a deficiência nutricional de plantas acumuladoras do elemento. A implicação prática resultaria da possibilidade de adicionar o Si nos fertilizantes para melhorar sua eficiência agrônômica diminuindo a degradação das pastagens, comum em diversas regiões do mundo.

Frente ao exposto, objetivou-se avaliar os efeitos da omissão de N, K, Ca, Mg e S da solução nutritiva na ausência e na presença de silício, na absorção e na eficiência de uso destes nutrientes e na produção de massa seca de duas forrageiras a BRS Zuri (*Panicum maximum*) e a BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*).

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram desenvolvidos dois experimentos em casa de vegetação da UNESP (Universidade Estadual Paulista), campus de Jaboticabal, no período de julho a novembro de 2018. As forrageiras utilizadas foram BRS Zuri (*Panicum maximum*) e BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*) no primeiro e no segundo experimento, respectivamente. As sementes foram semeadas em bandejas preenchidas com vermiculita e mantidas durante 20 dias. Após este período, as plântulas foram lavadas em água destilada, selecionadas e transplantadas para os vasos plásticos perfurados (2 dm³), contendo areia, colocando uma planta por vaso. Esta areia apresentava textura média e foi previamente descontaminada com água, posteriormente com uma solução de ácido clorídrico 0,1 mol L⁻¹ e por último com água deionizada.

O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado, com seis tratamentos e cinco repetições. Os tratamentos foram: solução completa

(completo), e deficiência individual de nitrogênio (-N), potássio (-K), cálcio (-Ca), magnésio (-Mg) e enxofre (-S), na ausência (-Si) e presença de silício (+Si) na concentração de 2 mmol L⁻¹, aplicados via solução nutritiva. A fonte de silício utilizada foi o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol (107 g L⁻¹ de Si; 34,7 g L⁻¹ de K₂O e pH 11,8), o potássio foi equilibrado em todos os tratamentos, utilizando cloreto de potássio.

A solução nutritiva completa utilizada foi a de Hoagland e Arnon (1950) exceto para Fe e Mn. O ferro e o manganês foram aplicados duas vezes a concentração conforme indicação de Cavalcante et al. (2016). A solução nutritiva foi preparada com água destilada e posteriormente deionizada (devido ao excesso de Ca presente na água). A concentração da solução nutritiva durante a primeira semana de cultivo foi mantida com força iônica de 15%, e em seguida foi aumentada em 10% a cada três dias até atingir 65% e foi mantida até o final do experimento. O valor do pH da solução foi mantido em 5,0±0,2 com o uso de solução de HCl ou NaOH, ambos a 1,0 mol L⁻¹. A solução nutritiva foi aplicada em recipiente colocado abaixo dos vasos.

Aos 18 dias após o transplante (DAP) foi realizado um corte de uniformização na altura de 10 cm em todas as plantas das duas forrageiras, com o intuito de uniformizar a altura das plantas e induzir o perfilhamento.

Durante o período experimental foram realizadas três coletas do material vegetal, sendo as plantas coletadas a 15 cm da superfície do vaso, no momento em que apresentaram sintomas visuais de deficiência de cada nutriente omitido. A primeira coleta foi realizada aos 35 DAP, sendo coletada a parte aérea de todos os tratamentos e devido o aparecimento de sintomas de deficiência foram retirados os tratamentos (-N) na ausência (-Si) e presença de silício (+Si) de ambas as forrageiras e o tratamento (-S) na ausência (-Si) e presença de silício (+Si) da forrageira BRS Zuri. Na segunda coleta realizada 63 DAP, foi coletada a parte aérea dos tratamentos (completo, -K, -Ca, -Mg e -S) e retirados os tratamentos (-S) da forrageira BRS RB331 Ipyporã. Já na terceira coleta realizada 91 DAP foi coletada a parte aérea e realizada a retirada dos tratamentos (completo, -K, -Ca e -Mg) em ambas as forrageiras. Quando retirados os tratamentos, as plantas coletadas foram divididas em parte aérea, raiz e material residual da touceira.

O material vegetativo coletado foi lavado em água corrente, solução detergente (0,1 %), solução de ácido clorídrico (0,3 %) e água deionizada por duas vezes. Posteriormente, o material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar ($65\pm 5^{\circ}\text{C}$), até atingir massa constante.

O teor de Si foi determinado na parte aérea, raiz e material residual da touceira, de acordo com as metodologias descritas por Korndörfer et al. (2004). Já os teores totais de N, K, Ca, Mg e S foram determinados a partir da digestão sulfúrica conforme método descrito por Bataglia et al. (1983). A partir dos dados dos teores dos nutrientes, do Si e da massa seca foram calculados o acúmulo de cada elemento e posteriormente realizou-se o cálculo de eficiência de uso pela fórmula: $(\text{massa seca da parte área})^2 / \text{acúmulo do nutriente na parte aérea}$, conforme indicação de Siddiqi e Glass (1981).

As plantas foram monitoradas descrevendo-se a deficiência nutricional e registradas com fotos obtidas durante o surgimento dos sintomas visuais.

Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância, sendo comparadas as médias dos tratamentos da solução nutritiva completa e a omissão do nutriente feita pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade utilizando o programa estatístico Sisvar® (Ferreira, 2011).

3 RESULTADOS

3.1 Experimento 1

3.1.1 Massa seca

No cultivo das plantas forrageira BRS Zuri (*Panicum maximum*) com a omissão de N, K, Ca, Mg e S, na solução nutritiva em relação ao tratamento completo diminuiu a produção da massa seca da parte aérea nas diferentes coletas, da parte aérea acumulada, da raiz e do material residual da touceira, independentemente da adição do Si (Figura 1).

Observou-se que nas plantas deficientes de N e de S, a adição de Si na solução nutritiva não afetou a produção de massa seca da parte aérea, da parte aérea acumulada, da raiz e do material residual da touceira (Figuras 1A, 1B, 1C, 1D, 1E e 1F). No entanto, nas plantas deficientes de K, Ca e Mg a adição de Si na solução nutritiva aumentou a massa seca da parte aérea nas diferentes coletas (Figura 1A, 1B e 1C), da parte aérea acumulada (1D), da raiz (Figura 1E)

e também do material residual da touceira (Figura 1F), exceto para o tratamento com a deficiência de Ca para material residual da touceira.

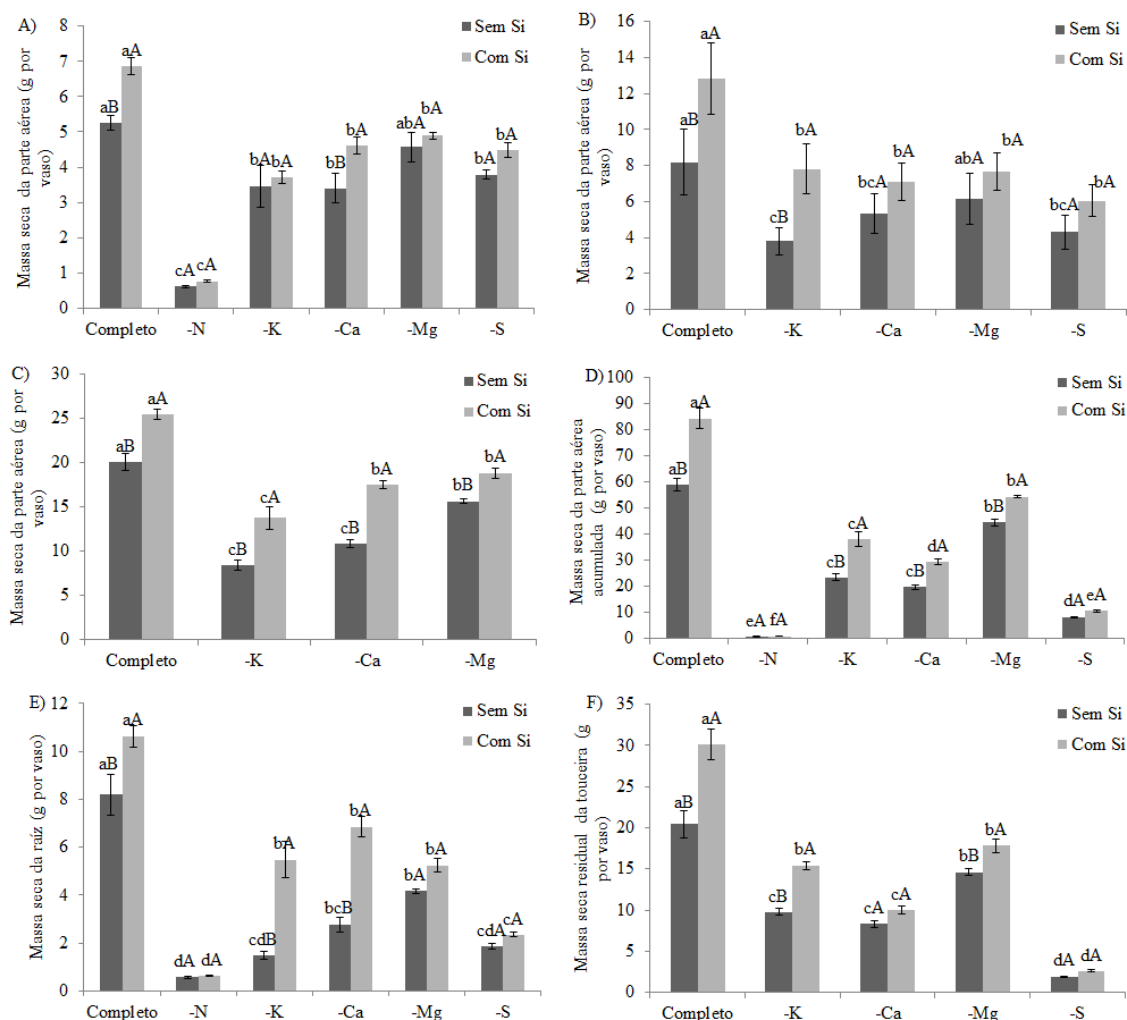


Figura 1: Massa seca da parte aérea de forrageira BRS Zuri (*Panicum maximum*) na primeira (A), segunda (B), terceira coleta (C) e massa seca da parte aérea acumulada (D), massa seca de raiz (E) e massa seca residual da touceira (F), submetidas aos tratamentos (completo e com omissão de nutrientes), na ausência (Sem Si) e na presença de silício (Com Si). Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos com omissão e completo, pelo teste de Tukey. Letras maiúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos ausência (Sem Si) e presença de silício (Com Si), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

3.1.2 Acúmulo de nutrientes

As plantas cultivadas com omissão de N, K, Ca, Mg e S em relação ao tratamento completo apresentaram redução no acúmulo desses nutrientes na massa seca da parte aérea na primeira coleta (Tabela 1), na segunda e terceira coleta (Tabela 2), independente da adição do Si na solução nutritiva.

Observa-se que nas plantas cultivadas em solução nutritiva com omissão de N, K, Ca, Mg e S o acúmulo desses nutrientes na massa seca da parte aérea não foi influenciado pela adição de Si na solução nutritiva. No entanto, nas plantas deficientes destes nutrientes e também no tratamento completo a adição de Si na solução nutritiva aumentou o acúmulo de Si das duas forrageiras em todas as coletas.

A omissão de N, K, Ca, Mg e S quando comparada com o tratamento completo apresentou redução no acúmulo desses nutrientes na raiz e no material residual da touceira (Tabela 3), independente da adição do Si na solução nutritiva.

Observa-se que apenas nos tratamentos com omissão de Ca e S o acúmulo desses nutrientes na massa seca da raiz foi incrementado com adição do Si. Já a adição de Si na solução nutritiva incrementou o acúmulo deste elemento na raiz e no material residual da touceira em todos os tratamentos.

Na massa seca residual da touceira a omissão de Ca refletiu em maior acúmulo de Ca com a aplicação de Si, o mesmo não foi observado para o acúmulo dos nutrientes K, Mg e S nos tratamentos em que esses nutrientes foram omitidos. Em relação ao Si a aplicação desse elemento refletiu em aumento no acúmulo de Si em todos os tratamentos.

Tabela 1. Resultados do acúmulo de nutrientes e de Si na massa seca da parte aérea da primeira coleta da forrageira BRS Zuri (*Panicum maximum*) cultivada em solução nutritiva completa e com a omissão de N, K, Ca, Mg e S na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si).

Solução nutritiva (SN)	N		K		Ca		Mg		S		Si	
	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si
	Primeira coleta (mg por vaso)											
Completo	141,3A	172,6A	185,5B	271,4A	22,3A	27,7 ^a	20,5A	25,6A	7,7A	9,2A	30,5B	71,6A
-N	4,1†A	5,5†A	15,0†A	24,3†A	2,5†A	3,5†A	1,3†A	2,0†A	0,6†A	0,7†A	6,4†B	12,3†A
-K	113,8A	109,9†A	88,0†A	74,1†A	20,4A	18,2†A	19,9A	17,9†A	5,2†A	5,0†A	30,8B	45,2†A
-Ca	114,2A	120,2†A	131,2†B	176,4†A	8,0†A	11,7†A	13,7†A	14,7†A	7,1A	7,1†A	29,9B	46,9†A
-Mg	124,7A	135,4†A	178,9A	188,9†A	25,9A	19,2†A	9,2†A	11,4†A	5,1†A	6,7†A	41,7B	52,8†A
-S	112,1A	113,9†A	145,5A	165,7†A	18,1†A	20,4 ^a	18,4A	19,4†A	4,9†A	5,2†A	25,6B	50,4†A
SN	**		**		**		**		**		**	
Silício (Si)	ns		**		ns		ns		ns		**	
SNxSi	ns		**		ns		ns		ns		**	

† valores médios diferindo significativamente do tratamento solução completa (teste Tukey, a 5% de probabilidade).

Letras maiúsculas iguais na linha dentro de cada elemento demonstram semelhança entre os tratamentos na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si), pelo teste de Tukey. *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo.

Tabela 2. Resultados do acúmulo de nutrientes e de Si na massa seca da parte aérea da segunda e terceira coleta da forrageira BRS Zuri (*Panicum maximum*) cultivada em solução nutritiva completa e com a omissão de N, K, Ca, Mg e S na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si).

Solução nutritiva (SN)	N		K		Ca		Mg		S		Si	
	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si
	Segunda coleta (mg por vaso)											
Completo	395,4B	579,9A	544,4B	775,8A	67,6B	94,7 ^a	56,7B	80,2A	23,6B	29,8A	48,2B	141,9A
-K	229,2†A	278,7†A	68,5†A	80,3†A	38,2†B	52,7†A	42,7†A	52,7†A	12,8†A	17,5†A	17,6†B	49,3†A
-Ca	452,1A	422,7†A	529,0A	544,9†A	10,9†A	22,9†A	49,1A	45,2†A	26,2A	23,4†A	37,2†B	82,0†A
-Mg	339,9†B	413,5†A	464,9B	591,5†A	64,4A	66,3 ^a	10,3†A	16,1†A	18,3†A	20,8†A	32,2†B	86,3†A
-S	82,6†A	90,6†A	109,3†A	135,3†A	16,8†A	15,3†A	17,4†A	15,2†A	2,4†A	1,7†A	7,0†B	42,5†A
SN	**		**		**		**		**		**	
Silício (Si)	**		**		**		**		**		**	
SNxSi	**		**		**		**		**		**	
Terceira coleta												
Completo	461,0A	530,6A	518,2B	642,3A	109,7A	133,6 ^a	74,9B	107,3A	26,3A	38,1A	32,1B	104,2A
-K	275,8†A	361,2†A	33,5†A	64,0†A	69,1†A	99,6†A	46,0†B	76,8†A	19,9†A	29,3†A	17,1B	73,9†A
-Ca	312,9†A	367,4A	335,2†B	494,3†A	5,5†A	26,9†A	46,1†B	60,5†A	26,6A	32,9A	25,0B	153,3A
-Mg	328,9†A	423,0†A	437,4†B	554,6†A	87,6†A	124,5 ^a	17,2†A	12,3†A	22,8A	27,7†A	25,9B	75,6†A
SN	**		**		**		**		**		**	
Silício (Si)	**		**		**		**		**		**	
SNxSi	ns		**		ns		**		ns		**	

† valores médios diferindo significativamente do tratamento solução completa (teste Tukey, a 5% de probabilidade).

Letras maiúsculas iguais na linha dentro de cada elemento demonstram semelhança entre os tratamentos na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si), pelo teste de Tukey. *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo.

Tabela 3. Resultados do acúmulo de nutrientes e de Si na massa seca da raiz e do colmo residual da touceira na forrageira BRS Zuri (*Panicum maximum*) cultivado em solução nutritiva completa e com a omissão de N, K, Ca, Mg e S na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si).

Solução nutritiva (SN)	N		K		Ca		Mg		S		Si	
	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si
Massa seca da raiz (mg por vaso)												
Completo	93,7A	102,8A	36,7B	74,9A	50,5B	82,3 ^a	9,9A	10,3A	21,2A	24,0A	19,1B	31,9A
-N	4,3†A	6,4†A	5,6†A	9,1†A	0,8†A	1,7†A	0,6†A	1,3†A	0,7†A	0,9†A	1,7†B	4,0†A
-K	25,0†B	55,7†A	1,5†A	2,5†A	8,9†B	32,6†A	3,3†A	9,5†A	3,2†B	11,1†A	2,7†B	19,9A
-Ca	41,5†B	64,2†A	36,7†A	30,8A	1,7†B	5,9†A	18,6A	14,4A	12,5†A	16,0†A	8,8B	60,0A
-Mg	55,8†B	79,8†A	25,2†A	27,5A	21,2†B	33,2†A	2,1†A	2,2†A	13,4†B	21,1A	12,7B	43,0A
-S	35,0†A	40,2†A	23,7†A	30,3A	6,1†A	5,9†A	5,5A	7,6†A	1,8†B	3,6†A	5,2B	15,5A
SN	**		**		**		**		**		**	
Silício (Si)	**		**		**		ns		**		**	
SNxSi	*		**		**		ns		*		**	
Massa seca residual da touceira												
Completo	133,3B	218,6†A	535,6B	687,5A	114,9A	136,1 ^a	105,8B	146,4A	33,7A	32,7A	26,8B	36,3A
-K	176,6A	207,0A	18,5†A	14,4†A	94,6†B	128,2 ^a	71,5†B	103,9†A	22,2†B	30,6A	12,1†B	26,0†A
-Ca	120,7†A	102,4†A	340,8†A	322,0†A	4,3†B	15,6†A	32,0†B	45,9†A	16,0†A	17,5†A	11,9†B	24,5†A
-Mg	111,8†A	147,4†A	323,4†B	404,4†A	139,5B	176,9 ^a	18,4†A	19,8†A	14,7†A	16,2†A	15,9†B	26,0†A
-S	37,1†A	42,9†A	102,2†A	141,3†A	8,1†A	12,4†A	12,4†A	16,6†A	0,7†A	0,8†A	5,2†B	10,6†A
SN	**		**		**		**		**		**	
Silício (Si)	**		**		**		**		*		**	
SNxSi	**		**		**		**		**		*	

† valores médios diferindo significativamente do tratamento solução completa (teste Tukey, a 5% de probabilidade).

Letras maiúsculas iguais na linha dentro de cada elemento demonstram semelhança entre os tratamentos na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si), pelo teste de Tukey. *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo.

3.1.3 Eficiência de uso

A omissão de nutrientes diminuiu a eficiência de uso apenas para o nitrogênio nas plantas com a omissão de N, com e sem adição de Si, para a primeira coleta e para a eficiência de uso do enxofre com a omissão de S, com adição de Si para a primeira (Tabela 4) e segunda coleta (Tabela 5).

O cultivo das plantas com omissão dos nutrientes N, K, Ca, Mg e S com a adição de Si na solução nutritiva proporcionou aumento na eficiência de uso destes nutrientes em todas as coletas. Já no tratamento completo, observa-se que a adição de Si na solução nutritiva, aumentou a eficiência de uso do N, Mg e S na primeira, N, K e S na segunda e N na terceira coleta.

Tabela 4. Resultados da eficiência de uso dos nutrientes na massa seca da parte aérea da primeira coleta na forrageira BRS Zuri (*Panicum maximum*) cultivado em solução nutritiva completa e com a omissão de N, K, Ca, Mg e S na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si).

Solução nutritiva (SN)	N		K		Ca		Mg		S	
	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si
	Primeira coleta (g ² /g)									
Completo	183B	291A	153A	176A	1511A	1706A	1383B	1861A	3603B	5179A
-N	90†B	149†A	27†A	24†A	165†A	171†A	319†A	298†A	637†A	815†A
-K	106†A	126†A	138B	192A	593†A	806†A	617†A	807†A	2288†A	2736†A
-Ca	101†A	179†A	89†B	124†A	1491B	1969A	852†B	1457A	1629†B	3032†A
-Mg	169A	178†A	119A	130A	837A	1260A	2211B	2397A	4084A	3630†A
-S	129†A	178†A	99†A	123†A	802†A	1031A	782†A	1081†A	2950B	3929†A
SN	**		**		**		**		**	
Silício (Si)	**		**		**		**		**	
SNxSi	ns		*		ns		*		**	

† valores médios diferindo significativamente do tratamento solução completa (teste Tukey, a 5% de probabilidade).

Letras maiúsculas iguais na linha dentro de cada elemento demonstram semelhança entre os tratamentos na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si), pelo teste de Tukey. *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo.

Tabela 5. Resultados da eficiência de uso dos nutrientes na massa seca da parte aérea da segunda e terceira coleta na forrageira BRS Zuri (*Panicum maximum*) cultivado em solução nutritiva completa e com a omissão de N, K, Ca, Mg e S na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si).

Solução nutritiva (SN)	N		K		Ca		Mg		S	
	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si
	Segunda coleta (g ² /g)									
Completo	831B	1014A	605B	753A	4876A	6299A	5833A	7494A	13820B	19870A
-K	180†B	303†A	635B	1073A	1082A	1628†A	967A	1611†A	3204†A	4934†A
-Ca	404†B	587†A	347†A	457†A	11731B	17574A	3804A	5534A	7036†B	10708†A
-Mg	576†B	670†A	421†A	469†A	3039A	4191A	17440B	20869A	10718B	13367†A
-S	151†A	170†A	114†A	113†A	744A	1031†A	718A	1008†A	5334†B	10524†A
SN	**		**		**		**		**	
Silício (Si)	**		**		*		ns		**	
SNxSi	*		**		**		ns		ns	
Terceira coleta										
Completo	875B	1225A	778A	1008A	3722A	4880A	5384A	6070A	15384A	17166A
-K	257†B	529†A	2175B	2964A	1026A	1907A	1526A	2468A	3175†B	6544†A
-Ca	380†B	835†A	353A	621A	27189B	11697A	2556A	5076A	4436†B	9474†A
-Mg	749A	842†A	559A	646A	2806A	2905A	14236B	29521A	12306A	13001†A
SN	**		**		**		**		**	
Silício (Si)	**		**		ns		**		**	
SNxSi	**		*		*		**		ns	

† valores médios diferindo significativamente do tratamento solução completa (teste Tukey, a 5% de probabilidade).

Letras maiúsculas iguais na linha dentro de cada elemento demonstram semelhança entre os tratamentos na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si), pelo teste de Tukey. *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo.

3.2 Experimento 2

3.2.1 Massa seca

O cultivo da forrageira BRS RB331 Ipyorã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*) com a omissão de N, K, Ca, Mg e S em solução nutritiva, em relação ao tratamento completo diminuiu a produção da massa seca da parte aérea nas diferentes coletas da parte aérea, da massa seca da parte aérea acumulada, da raiz e o material residual da touceira, independentemente da adição do Si (Figura 2).

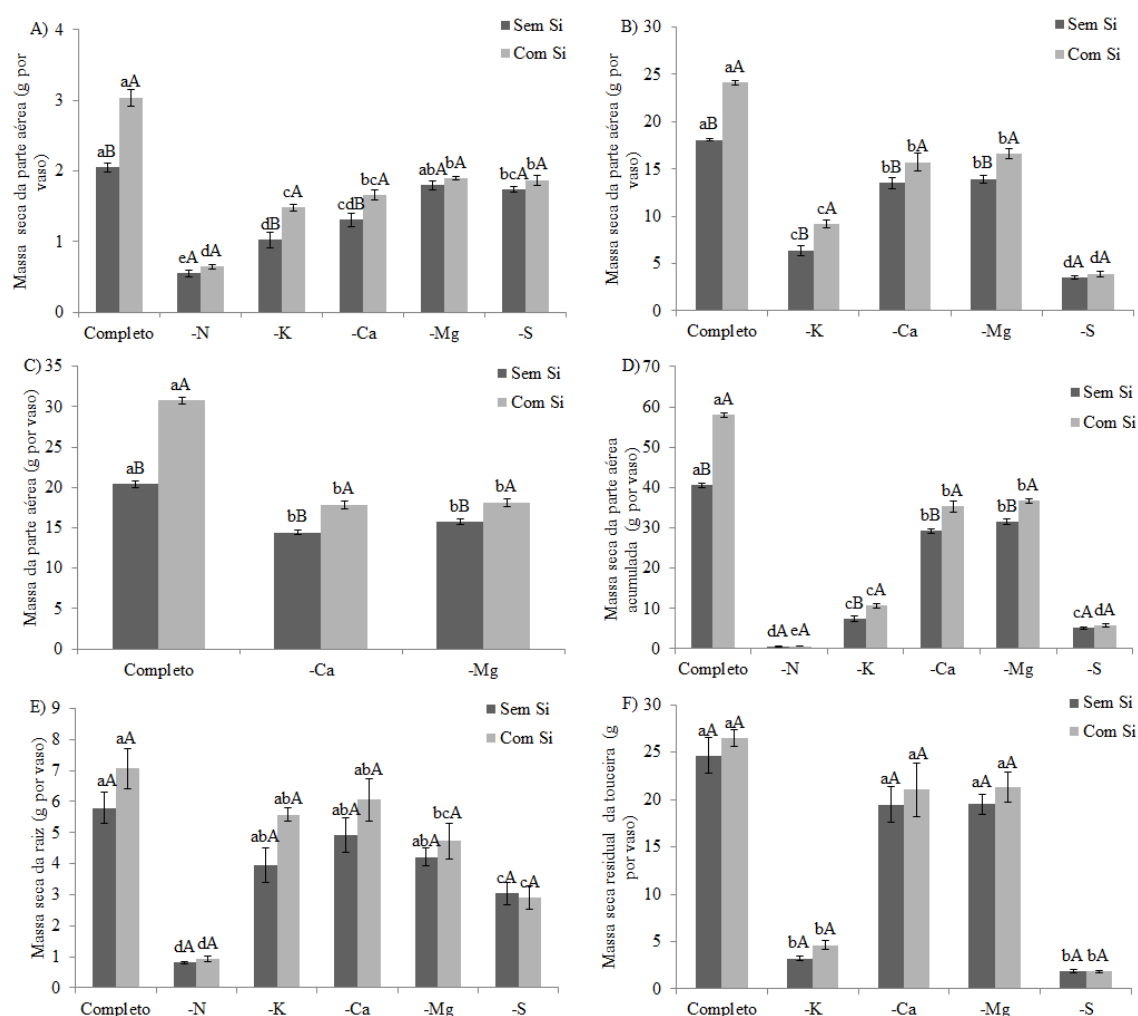


Figura 2: Massa seca da parte aérea de forrageira BRS RB331 Ipyorã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*) na primeira (A), segunda (B), terceira coleta (C) e acumulada (D), massa seca de raiz (E) e massa seca residual da touceira (F) submetida aos tratamentos (completo e com omissão de nutrientes), na ausência (Sem Si) e na presença de silício (Com Si). Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos com omissão e o completo, pelo teste de Tukey. Letras maiúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos ausência (Sem Si) e presença de silício (Com Si), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Observa-se que nos tratamentos onde ocorreu a omissão de N e S a aplicação de Si não influenciou na produção da massa seca da parte aérea, da massa seca acumulada, da raiz e do material residual da touceira (Figuras 2A, 2B, 2D, 2E, 2F e 2G). O mesmo efeito foi observado na omissão de K, Ca e Mg, para a massa seca da raiz (Figura 2E) e massa seca residual da touceira (Figura 2F). Já as plantas deficientes de K, Ca e Mg a adição de Si na solução nutritiva incrementou a massa seca da parte aérea nas três coletas e a massa seca da parte aérea acumulada (Figura 2A, 2B, 2C e 2D).

3.2.2 Acúmulo de nutrientes

A omissão de N, K, Ca, Mg e S nas plantas forrageiras apresentou redução no acúmulo desses nutrientes na massa seca da parte aérea na primeira (Tabela 6), segunda e terceira coleta (Tabelas 7), quando comparado ao tratamento completo, independente da adição do Si na solução nutritiva. Observa-se que nas plantas deficientes de N, K, Ca, Mg e S o acúmulo desses nutrientes na massa seca da parte aérea, não foi influenciado pela aplicação do Si com exceção do Ca na primeira e terceira coleta e do K na segunda coleta. O acúmulo de Si na forrageira, foi incrementado em todos os tratamentos com omissão dos nutrientes nas três coletas quando esse elemento foi aplicado.

Os tratamentos com a omissão de N, K, Ca, Mg e S apresentaram redução no acúmulo desses nutrientes na massa seca da raiz e residual da touceira (Tabela 8), quando comparados ao tratamento completo, independente da adição do Si na solução nutritiva.

Tabela 6. Resultados do acúmulo de nutrientes na massa seca da parte aérea da primeira coleta na forrageira BRS RB331 Ipyorã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*) cultivado em solução nutritiva completa e com a omissão de N, K, Ca, Mg e S na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si).

Solução nutritiva (SN)	N		K		Ca		Mg		S		Si	
	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si
	Primeira coleta (mg por vaso)											
Completo	69,6B	110,4A	106,9B	151,1A	6,6B	9,5A	1,5B	2,4A	4,4B	6,8A	13,2B	40,5A
-N	3,9†A	4,52†A	20,2†A	21,8†A	0,7†B	2,3†A	0,4†A	0,5†A	0,3†A	0,4†A	5,5†B	18,6†A
-K	39,2†B	54,7†A	21,4†A	42,3†A	7,1†A	7,8A	0,9†B	1,7†A	2,6†B	4,3†A	5,2†B	21,6†A
-Ca	50,4†A	59,8†A	64,3†B	100,4†A	1,7†B	5,9†A	1,4†B	1,8†A	3,3B	4,6†A	10,8B	21,9†A
-Mg	65,2A	65,8†A	86,3A	101,9†A	6,4B	9,3A	1,3†A	1,6†A	4,2B	5,3A	15,0B	26,2†A
-S	61,1B	73,0†A	86,1A	85,7†A	5,1A	5,8†A	1,7A	1,7†A	2,6†A	2,8†A	14,8B	27,2†A
SN	**		**		**		**		**		**	
Silício (Si)	**		**		**		**		ns		**	
SNxSi	**		ns		ns		**		ns		**	

† valores médios diferindo significativamente do tratamento solução completa (teste Tukey, a 5% de probabilidade).

Letras maiúsculas iguais na linha dentro de cada elemento demonstram semelhança entre os tratamentos na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si), pelo teste de Tukey. *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ns não significativo.

Tabela 7. Resultados do acúmulo de nutrientes e de na massa seca da parte aérea da segunda e terceira coleta na forrageira BRS RB331 Ipyorã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*) cultivado em solução nutritiva completa e com a omissão de N, K, Ca, Mg e S na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si).

Solução nutritiva (SN)	N		K		Ca		Mg		S		Si	
	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si
	Segunda coleta (mg por vaso)											
Completo	409,4B	572,5A	749,7B	943,9A	72,6B	112,2A	80,6B	126,0A	30,9B	39,4A	42,6B	157,4A
-K	250,5†B	306,3†A	26,3†B	44,4†A	80,6B	101,1A	56,5†B	77,8†A	18,9†B	26,2†A	17,3†B	48,4†A
-Ca	325,3†B	405,9†A	510†B	614,2†A	20,2†A	7,78†A	67,6†B	85,6†A	28,0A	30,8†A	45,1B	107,3†A
-Mg	287,2†B	379,3†A	519,5†B	624,6†A	80,3A	79,5†A	14,2†A	10,7†A	20,2†B	24,6†A	19,1B	118,6†A
-S	90,0†A	99,7†A	164,0†A	170,8†A	9,94†A	9,5†A	18,6†A	17,3†A	1,1†A	1,3†A	19,1†B	62,5†A
SN	**		**		**		**		**		**	
Silício (Si)	**		**		**		**		**		**	
SNxSi	**		**		**		**		**		**	
Terceira coleta												
Completo	353,3B	564,5A	854,9B	1121,0A	139,0B	219,9A	89,7B	160,9A	31,5B	45,6A	41,7B	167,5A
-Ca	333,1B	446,6†A	544,6†B	815,0†A	6,7†B	21,3†A	71,7†B	88,8†A	31,5A	30,3†A	40,3B	90,3†A
-Mg	298,5B	390,2†A	541,9†B	659,7†A	119,4†B	170,7†A	7,8†A	7,6†A	25,4†A	29,8†A	31,2B	118,1†A
SN	ns		**		**		**		**		**	
Silício (Si)	**		**		**		**		**		**	
SNxSi	*		**		**		**		**		**	

† valores médios diferindo significativamente do tratamento solução completa (teste Tukey, a 5% de probabilidade).

Letras maiúsculas iguais na linha dentro de cada elemento demonstram semelhança entre os tratamentos na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si), pelo teste de Tukey. *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo.

Tabela 8. Resultados do acúmulo de nutrientes e de Si na massa seca da raiz e do colmo residual da touceira na forrageira BRS RB331 Ipyorã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*) cultivado em solução nutritiva completa e com a omissão de N, K, Ca, Mg e S na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si).

Solução nutritiva (SN)	N		K		Ca		Mg		S		Si	
	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si
	Massa seca da raiz (mg por vaso)											
Completo	55,2A	44,4A	29,1A	31,5A	63,8A	65,9A	11,7A	14,1A	15,2B	25,2A	11,1B	31,2A
-N	3,9†A	4,6†A	22,1A	26,8A	0,7†A	0,7†A	1,8†A	1,9†A	2,5†A	2,4†A	2,3A	3,4†A
-K	62,5B	93,3A	8,4†B	30,2†A	5,2†B	30,2†A	8,7B	16,4A	13,0B	40,9A	7,4B	41,2A
-Ca	54,3B	85,4A	11,6†B	43,4A	2,3†B	11,6†A	11,4B	27,5A	16,3B	34,0A	16,3B	51,8A
-Mg	45,8A	51,7A	24,8A	27,4A	23,0†A	28,3†A	2,5†A	2,2†A	16,4A	20,4A	18,3B	32,5A
-S	49,8B	70,6A	49,2A	54,1A	7,5†A	3,6†A	14,2A	12,9A	1,4†A	1,9†A	4,7A	7,9†A
SN	**		**		**		**		**		**	
Silício (Si)	ns		ns		ns		ns		**		**	
SNxSi	*		**		**		**		**		**	
Massa seca residual da touceira												
Completo	259,3A	292,6A	326,9B	483,6A	106,4A	135,4A	77,0B	114,8A	47,4B	71,8A	58,5B	152,9A
-K	75,2†A	104,9†A	13,7†A	79,8†A	31,3†A	6,1†A	31,5†A	17,0†A	7,2†A	15,0†A	10,3†B	32,2†A
-Ca	300,8B	443,7A	107,5†B	431,8A	18,1†B	26,7†A	90,4B	181,5A	60,9A	49,6A	65,7B	211,1A
-Mg	277,7A	249,9†A	314,2A	365,6†A	63,9†A	40,1†A	26,4†A	31,8†A	43,2A	51,2A	63,3B	125,7A
-S	39,5†A	40,9†A	61,5†A	61,5†A	5,9†A	4,4†A	10,0†A	8,0†A	1,8†A	0,7†A	15,1†B	34,8†A
SN	**		**		**		**		**		**	
Silício (Si)	*		ns		**		**		ns		**	
SNxSi	*		**		**		**		**		**	

† valores médios diferindo significativamente do tratamento solução completa (teste Tukey, a 5% de probabilidade).

Letras maiúsculas iguais na linha dentro de cada elemento demonstram semelhança entre os tratamentos na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si), pelo teste de Tukey. *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo.

Apenas nos tratamentos com omissão de K e Ca houve maior acúmulo desses nutrientes na massa seca da raiz, quando adicionado Si na solução nutritiva. Nos tratamentos em que o Si foi aplicado observa-se maior acúmulo desse elemento na massa seca da raiz em todos os tratamentos, exceto com omissão do N e do S.

Na massa seca residual da touceira, apenas o acúmulo de Ca no tratamento com a omissão desse nutriente foi maior com a aplicação de Si. Observou-se que a adição de Si na solução nutritiva em todos os tratamentos incrementou seu acúmulo na massa seca residual da touceira.

3.2.3 Eficiência de uso

Apenas a omissão de magnésio diminuiu a eficiência de uso deste macronutriente na forrageira, resultado esse que ocorreu apenas para a primeira coleta (Tabela 9).

A adição de Si na solução nutritiva aumentou a eficiência de uso do N, K, Ca, Mg e S na parte aérea das plantas nos tratamentos onde esses elementos foram omitidos, fato esse observado em todas as coletas (Tabelas 9 e 10). Já no tratamento completo, a adição de Si na solução nutritiva aumentou a eficiência de uso de todos nutrientes avaliados na primeira coleta e apenas N e S na segunda coleta e o N, K e S na terceira coleta.

Tabela 9. Resultados da eficiência do uso dos nutrientes na massa seca da parte aérea da primeira coleta na forrageira BRS RB331 Ipyorã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*) cultivado em solução nutritiva completa e com a omissão de N, K, Ca, Mg e S na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si).

Solução nutritiva (SN)	N		K		Ca		Mg		S	
	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si
	Primeira coleta (g ² /g)									
Completo	61B	84A	40B	62A	449B	1428A	2880B	3888A	981B	1364A
-N	76B	93A	15†A	19†A	130B	647†A	720†A	888†A	865A	1014†A
-K	27†B	41†A	42B	75A	144A	330†A	1143†A	1350†A	405†A	513†A
-Ca	34†A	46†A	28†A	28†A	331B	1783A	1270†A	1523†A	526A	595†A
-Mg	50 ^a	55†A	38A	42A	349A	622†A	1712†B	2006†A	778A	676†A
-S	49†A	48†A	35A	41†A	528A	732†A	1764†B	2034†A	1000B	1308A
SN	**		**		**		**		**	
Silício (Si)	**		ns		**		**		**	
SNxSi	ns		ns		**		ns		*	

† valores médios diferindo significativamente do tratamento solução completa (teste Tukey, a 5% de probabilidade).

Letras maiúsculas iguais na linha dentro de cada elemento demonstram semelhança entre os tratamentos na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si), pelo teste de Tukey. *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo.

Tabela 10. Resultados da eficiência do uso dos nutrientes na massa seca da parte aérea da segunda e terceira coleta na forrageira BRS RB331 Ipyorã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*) cultivado em solução nutritiva completa e com a omissão de N, K, Ca, Mg e S na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si).

Solução nutritiva (SN)	N		K		Ca		Mg		S	
	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si	-Si	+ Si
Segunda coleta (g ² /g)										
Completo	801B	1025A	438A	618A	4622A	5262A	4079A	4644A	10560B	14816A
-K	165†A	278†A	1621B	1900A	522A	845A	730†A	1092†A	2218†A	3250†A
-Ca	563†A	617†B	358A	404A	9573B	37058A	2705A	2897A	6531†A	8142†A
-Mg	678 ^a	730†A	375A	442A	2433A	3475A	13963B	26473A	9648A	11225†A
-S	138†A	154†A	77A	90†A	1301A	1667A	669†A	887†A	10019B	13510A
SN	**		**		**		**		**	
Silício (Si)	**		*		**		**		**	
SNxSi	*		ns		**		**		ns	
Terceira coleta										
Completo	1184B	1691A	486B	845A	3497A	4310A	4666A	5901A	13262A	21018B
-Ca	632†A	723†A	384†B	486†A	17297B	35645A	2914A	3598A	5939†A	10575†B
-Mg	834†A	849†A	460A	403†A	1796A	1933A	31477B	43521A	10067†A	11339†A
SN	**		**		**		**		**	
Silício (Si)	**		**		*		**		**	
SNxSi	**		**		**		**		*	

† valores médios diferindo significativamente do tratamento solução completa (teste Tukey, a 5% de probabilidade).

Letras maiúsculas iguais na linha dentro de cada elemento demonstram semelhança entre os tratamentos na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si), pelo teste de Tukey. *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo.

3.3 Sintomatologia de deficiências nutricionais observadas nas plantas nos dois experimentos

Nos tratamentos com a solução nutritiva completa, com e sem Si, não foram observados sintomas de deficiência nutricional nas duas forrageiras. No entanto, nas plantas cultivadas com solução completa com adição de Si houve maior desenvolvimento das plantas e perfilhamento nas duas cultivares (Figuras 3, 4, 5, 6 e 7).

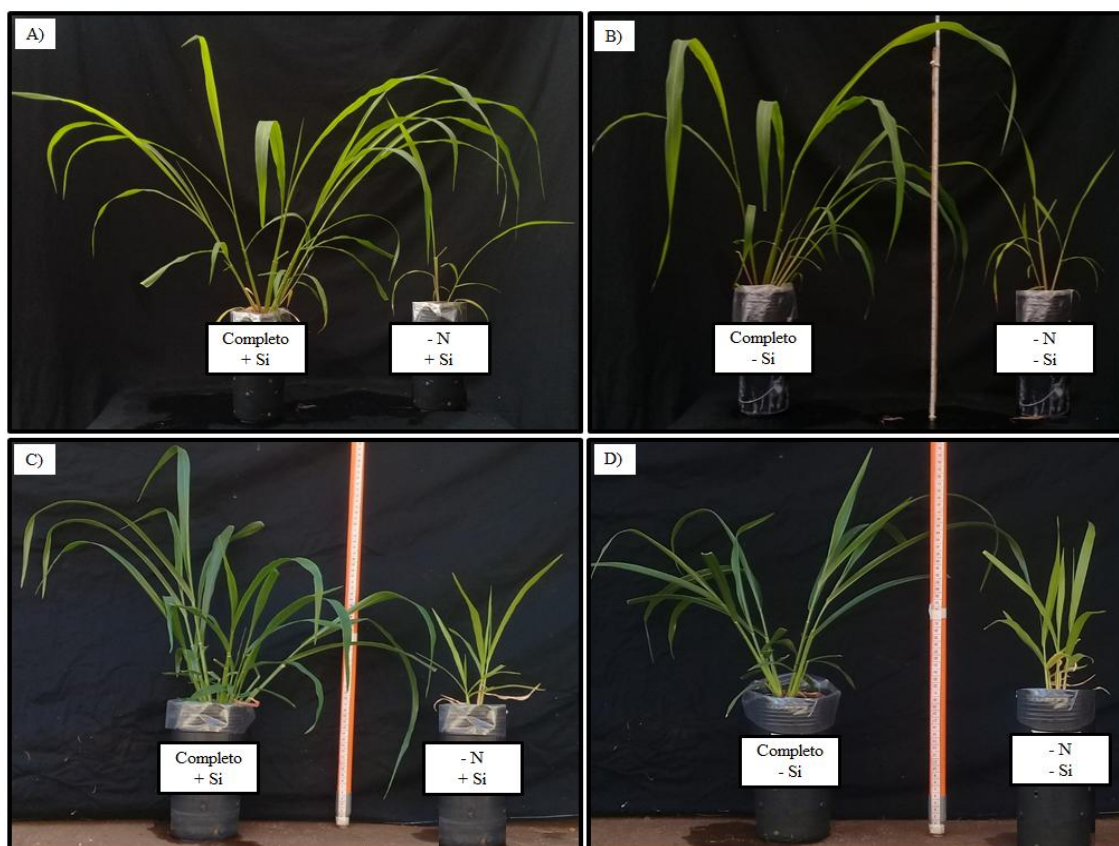


Figura 3: Forrageira BRS Zuri (*Panicum maximum*) cultivada em solução nutritiva completa com Si (+Si) e omissão de N na presença de Si (A), solução nutritiva completa sem Si (-Si) e omissão de N (-N) na ausência de Si (B) e forrageira BRS RB331 Ipyorã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*) cultivada em solução nutritiva completa com Si e com omissão de N na presença de Si (C), solução nutritiva completa sem Si e com omissão de N na ausência de Si (D).

As plantas cultivadas sob omissão de N na ausência ou na presença de Si, em relação ao tratamento completo na solução nutritiva manifestaram de forma mais rápida os sintomas de deficiência tendo baixo desenvolvimento, com menor número de folhas, de perfilhos e colmos finos. As folhas com deficiência deste nutriente ficaram mais estreitas e iniciando a clorose nas folhas mais velhas e evoluindo para as folhas mais novas (Figuras 3A, 3B, 3C e 3D). Nestas

plantas com omissão de N a adição de Si na solução nutritiva não alterou os sintomas de deficiência de nitrogênio descritos.

Nas plantas cultivadas sob omissão de K na solução nutritiva, com ou sem Si, em relação as plantas cultivadas com solução nutritiva completa, observou-se que os sintomas de deficiência deste nutriente nas forrageiras ocorreram em períodos diferentes, na BRS Zuri os sintomas foram bem visíveis na terceira coleta, já na forrageira BRS RB331 Ipyorã foram observados na segunda coleta.

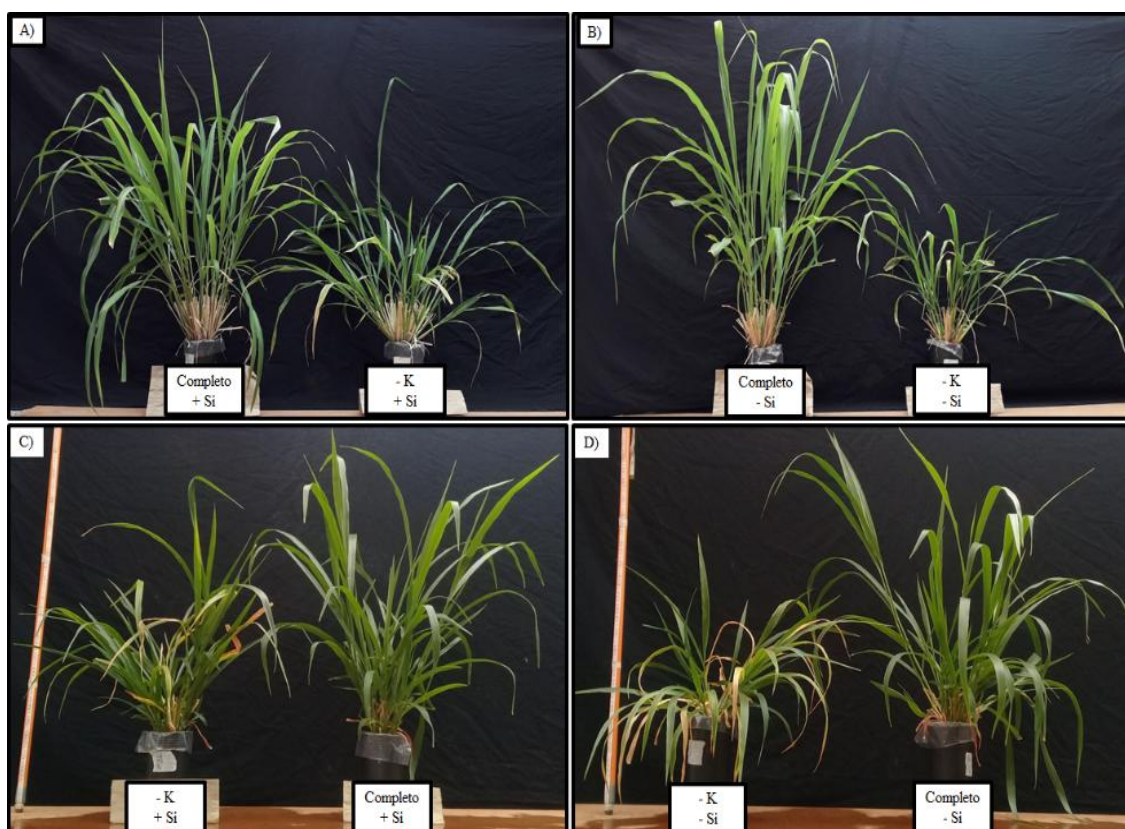


Figura 4: Forrageira BRS Zuri (*Panicum maximum*) cultivada em solução nutritiva completa com Si (+Si) e omissão de K na presença de Si (A), solução nutritiva completa sem Si (-Si) e omissão de K (-K) na ausência de Si (B) e forrageira BRS RB331 Ipyorã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*) cultivada em solução nutritiva completa com Si e com omissão de K na presença de Si (C), solução nutritiva completa sem Si e com omissão de K na ausência de Si (D).

Os sintomas de deficiência de potássio apresentados pelas duas forrageiras foram: baixo desenvolvimento, número excessivo de perfilhos e menor número de folhas, colmos e folhas mais velhas curtas e com clorose na ponta evoluindo para as margens e posteriormente necrosando (Figuras 4A, 4B, 4C e 4D). A severidade destes sintomas de deficiência de K descritos nas duas

forrageiras foi reduzida com a adição de Si na solução nutritiva comparada com ausência deste elemento benéfico.

As duas forrageiras cultivadas com omissão de Ca na solução nutritiva com ou sem Si em relação as plantas com a solução nutritiva completa apresentaram número baixo de perfilhos, folhas mais curtas (Figuras 5A, 5B, 5C e 5D) e anormalidades nas folhas mais novas tendo enrugamento para baixo e bordas dilaceradas (Figuras 5B e 5D). A severidade destes sintomas de deficiência de Ca descritos nas duas forrageiras foi reduzida com a adição de Si na solução nutritiva comparado com ausência deste elemento benéfico.

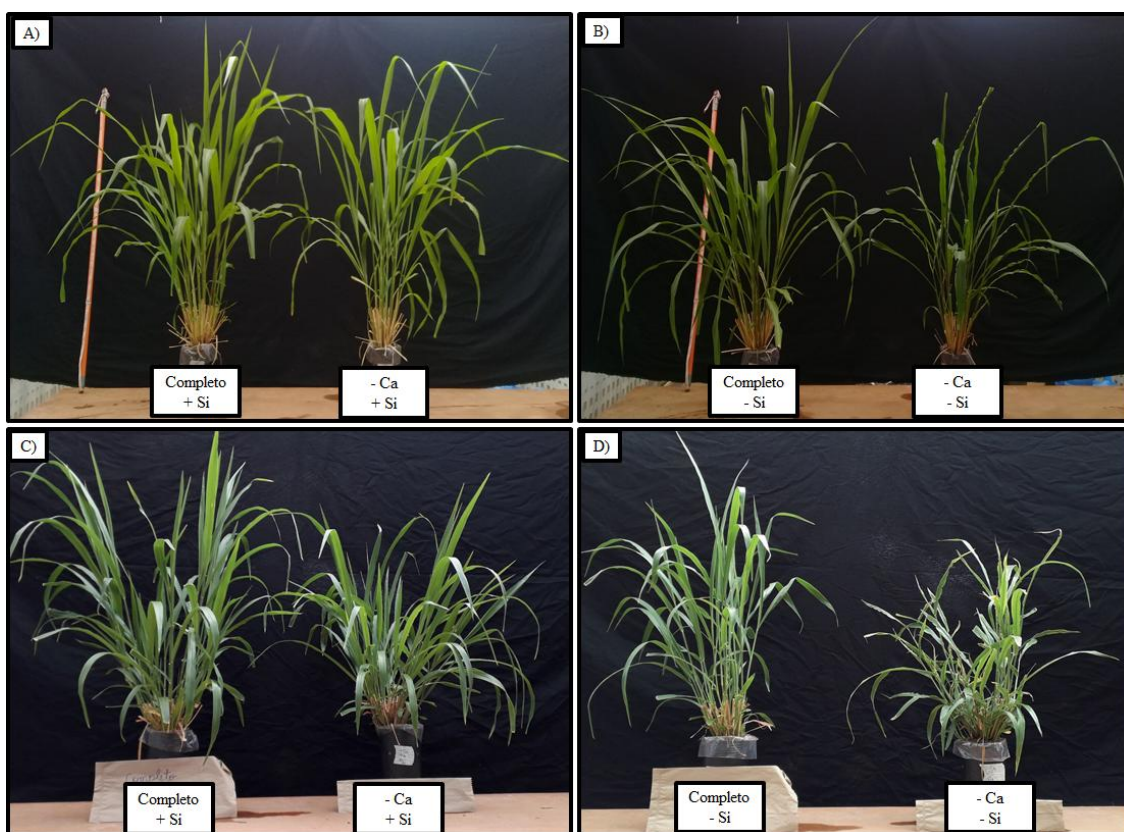


Figura 5: Forrageira BRS Zuri (*Panicum maximum*) cultivada em solução nutritiva completa com Si (+Si) e omissão de Ca na presença de Si (A), solução nutritiva completa sem Si (-Si) e omissão de Ca (-Ca) na ausência de Si (B) e forrageira BRS RB331 Ipyorã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*) cultivada em solução nutritiva completa com Si e com omissão de Ca na presença de Si (C), solução nutritiva completa sem Si e com omissão de Ca na ausência de Si (D).

Nas duas forrageiras a omissão de magnésio na solução nutritiva com ou sem Si, comparado com as plantas com solução completa, houve redução da altura das plantas, do número de perfilhos e de folhas (Figura 6A, 6B, 6C e 6D). Além disso, nas folhas mais velhas houve amarelecimento seguido por clorose

internerval, com coloração verde intenso nas nervuras, que evoluiu para necrose. A severidade destes sintomas de deficiência de Mg descritos nas duas forrageiras foi reduzida com a adição de Si na solução nutritiva comparado com ausência deste elemento benéfico.

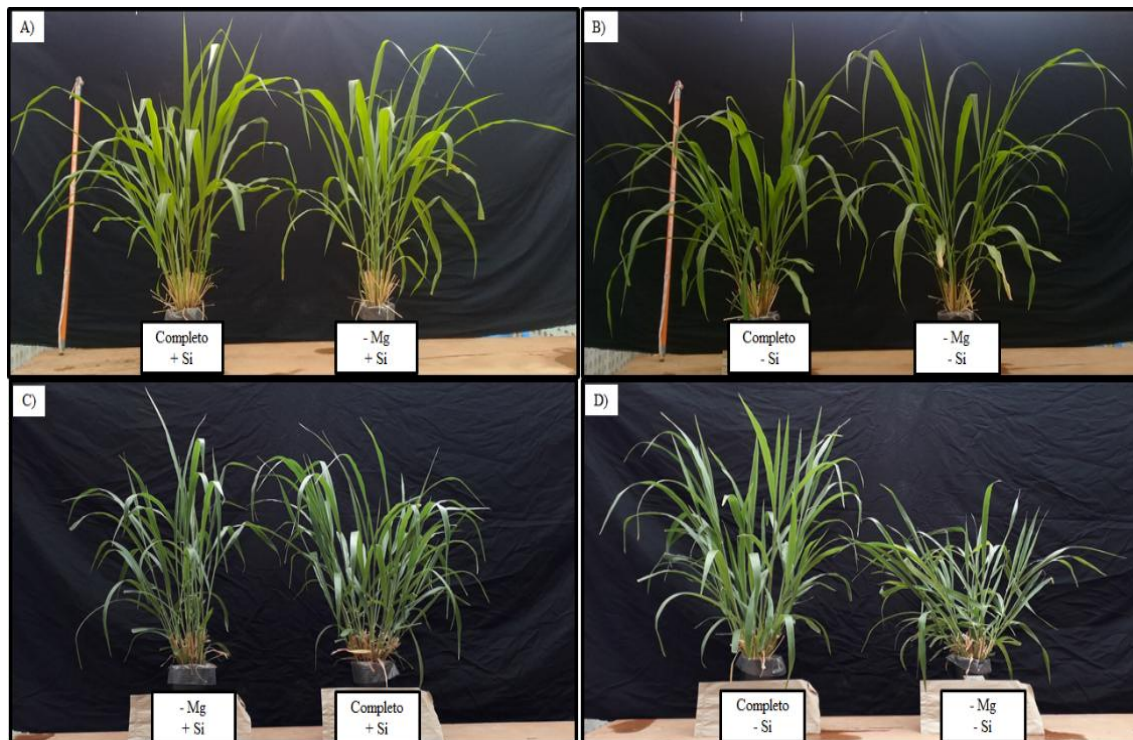


Figura 6: Forrageira BRS Zuri (*Panicum maximum*) cultivada em solução nutritiva completa com Si (+Si) e omissão de Mg na presença de Si (A), solução nutritiva completa sem Si (-Si) e omissão de Mg (-Mg) na ausência de Si (B) e forrageira BRS RB331 Ipyorã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*) cultivada em solução nutritiva completa com Si e com omissão de Mg na presença de Si (C), solução nutritiva completa sem Si e com omissão de Mg na ausência de Si (D).

Nas forrageiras cultivadas sob omissão de S, surgiram os sintomas de deficiência em diferentes períodos, de forma mais rápida no BRS RB331 Ipyorã visualizados na primeira coleta e na forrageira BRS Zuri ocorreram mais tardiamente, na segunda coleta (Figura 7A, 7B, 7C, 7D). Os sintomas visuais de deficiência de enxofre nas duas forrageiras foram caracterizados pelo baixo número de perfilhos e de folhas, menor altura de planta e colmos mais curtos. As folhas mais novas apresentaram coloração amarelo-pálida, que evoluiu para as folhas mais velhas. A severidade destes sintomas de deficiência de S, observados nas duas forrageiras, não foi reduzida visualmente com a adição de Si na solução nutritiva comparado com a ausência deste elemento benéfico.

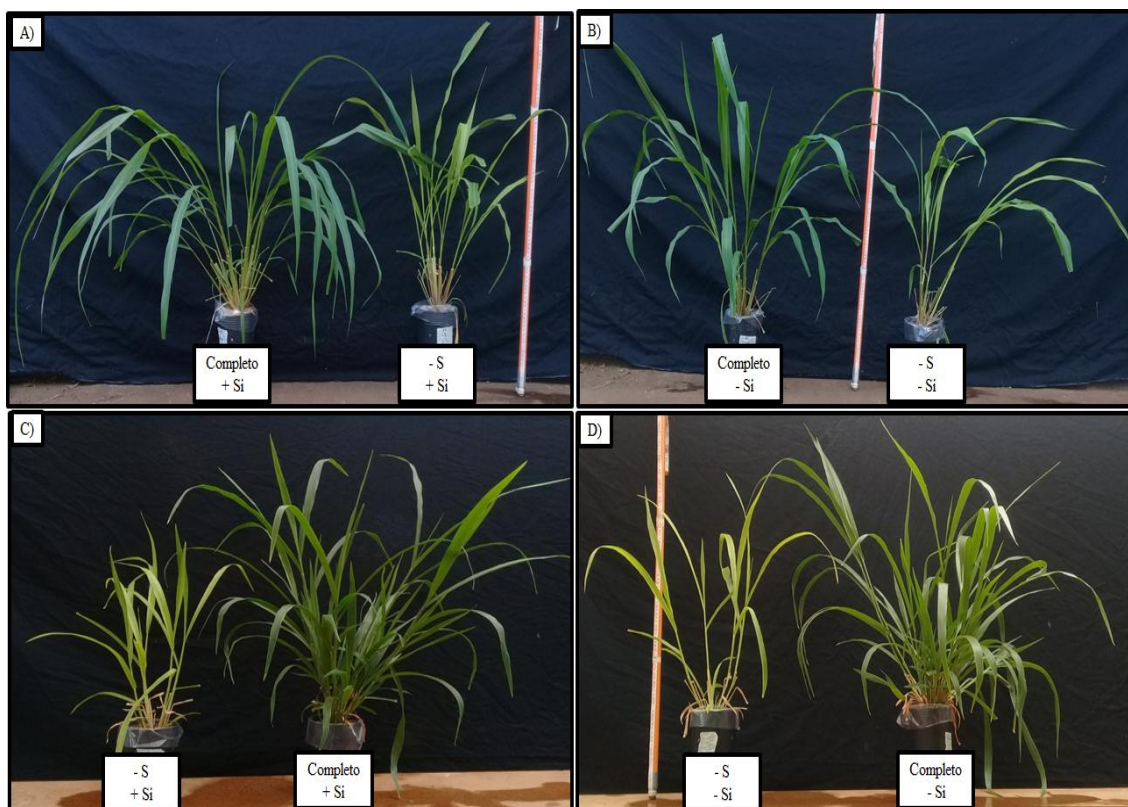


Figura 7: Forrageira BRS Zuri (*Panicum maximum*) cultivada em solução nutritiva completa com Si (+Si) e omissão de S na presença de Si (A), solução nutritiva completa sem Si (-Si) e omissão de S (-S) na ausência de Si (B) e forrageira BRS RB331 BRS RB331 Ipyorã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*) cultivada em solução nutritiva completa com Si e com omissão de S na presença de Si (C), solução nutritiva completa sem Si e com omissão de S na ausência de Si (D).

4 DISCUSSÃO

4.1 Solução nutritiva completa

Ficou evidenciado que a adição de Si na solução nutritiva completa favoreceu a produção de massa seca da parte aérea das três coletas e a produção de massa seca da raiz das duas forrageiras. Esses efeitos possivelmente devem-se ao fato que o Si contribui para aumentar a absorção de nutrientes especialmente do K na primeira coleta (Tabela 1); de N, K, Ca, Mg e S na segunda coleta e de K e Mg na terceira coleta para a forrageira BRS Zuri (Tabela 2) e de N, K, Ca, Mg e S das três coletas para a forrageira BRS Ipyorã (Tabela 6 e 7). Com a maior absorção destes nutrientes houve também incremento da eficiência de uso do N em todas as coletas, nos tratamentos com omissão de Mg e S na primeira coleta (Tabela 4) e de K e S na segunda coleta

para a cultivar BRS Zuri (Tabela 5) e de N, K, Ca, Mg e S na primeira coleta (Tabela 9), e de N e S na segunda coleta e de N, K e S na terceira coleta da forrageira BRS RB331 Ipyorã (Tabela 10) favorecendo a produção de massa seca destas forrageiras.

Soma-se a isto, o fato que o Si pode substituir parte do carbono na formação de alguns compostos estruturais com custo energético baixo (Cooke e Leishman, 2012) presente especialmente na parede celular (Melo et al., 2010), sendo nas gramíneas a maior concentração nas paredes celulares das folhas (Neu et al., 2017), podendo potencializar a eficiência do uso dos nutrientes favorecendo a produção da biomassa.

Portanto, a adição de Si beneficia o crescimento das forrageiras mesmo em plantas sem a deficiência nutricional. Resultados semelhantes foram relatados por outros autores na cultura do arroz (Ghasemi Mianaei et al., 2011; Zia et al., 2017). Assim, os relatos que reforçam a importância do Si apenas em condição de estresse (Chen et al., 2016), devem ser revisto especialmente em plantas hiper-acumuladoras deste elemento como as forrageiras poáceas.

4.2 Nitrogênio

A deficiência de nitrogênio, independente da presença ou não do Si, manifestou-se rapidamente nas duas forrageiras, quando o N foi omitido na solução nutritiva prejudicou a produção de massa seca dada a baixa absorção do N pelas plantas induzindo os sintomas característicos deste nutriente também reportados por diversos autores em forrageiras (Prado et al., 2011; Avalhaes et al., 2009).

Nas duas forrageiras, a adição de Si na solução nutritiva das plantas com deficiência de nitrogênio, não reduziu os prejuízos fisiológicos provocados pela omissão desse nutriente. Isto ocorreu porque a deficiência do macronutriente foi muito severa e rápida, pois, diminuiu a massa seca da parte aérea em 90% e 75%, nos tratamentos com e sem Si, nas forrageiras BRS Zuri e BRS RB331 Ipyorã, respectivamente, não havendo tempo para que o Si pudesse aliviar a deficiência de N. Na cultura do arroz Deus et al. (2019), observaram que houve benefício do Si no alívio da deficiência de N, no entanto, a desordem nutricional não foi severa.

Assim, a adição de Si na solução nutritiva nas plantas das forrageiras deficientes de nitrogênio não aumentou o acúmulo de N (Tabelas 1, 2, 6 e 7) embora tenha aumentado a eficiência de uso do N (Tabela 4, 5, 9 e 10), que não foi suficiente para influenciar no crescimento e amenizar os sintomas severos da deficiência deste macronutriente (Figura 3).

4.3 Potássio

Nas duas forrageiras ficou evidenciado que a omissão de K independente do Si, diminuiu a produção de biomassa (Figura 1 e 2) prejudicando sua função fisiológica básica nas plantas atuando como ativador enzimático em mais de 60 enzimas (Prado, 2008).

Este efeito benéfico do Si na produção de biomassa deve-se ao aumento da absorção de nutrientes especialmente do Ca e Mg, visto na segunda coleta, e do Mg na terceira coleta para a forrageira BRS Zuri; e de N e Mg na primeira coleta e de N, K, Ca e Mg na segunda coleta para forrageira BRS RB331 Ipyorã. Soma-se a isto o fato que nas plantas sob omissão de K e que receberam Si houve incremento na eficiência de uso dos nutrientes em função da forrageira e da coleta. Observou-se aumento da eficiência de uso do K em todas as coletas das duas forrageiras e também de outros nutrientes como N e S para forrageira BRS Zuri (Tabela 4 e 5) e de N para forrageira BRS RB331 Ipyorã (Tabela 9 e 10), fatos que contribuíram para maior produção da massa seca destas forrageiras.

O aumento da eficiência de uso do K com adição de Si deve ter contribuído para o acréscimo da produção de massa seca pois era o único nutriente deficiente na solução nutritiva. Possivelmente essa maior eficiência de uso do K deve-se ao papel do Si na melhora do metabolismo vegetal favorecendo o aumento dos teores de clorofila e da taxa fotossintética (Chen et al., 2016) e por aumentar a atividade de enzimas importantes no metabolismo vegetal (Liu et al., 2009). Assim, ficou evidenciado alívio da deficiência de K com emprego do Si de forma visual devido a redução da severidade dos sintomas de deficiência deste macronutriente (Figura 4).

4.4 Cálcio

Nas duas forrageiras a deficiência de cálcio, independente do Si na solução nutritiva prejudicou a produção de massa seca. A deficiência de cálcio (Figura 6) apresentou sintomas bem similares nas duas variedades, especialmente com o dilaceramento das folhas novas, fato relatado por (Avalhães et al., 2009), onde avaliaram a omissão de macronutrientes em plantas de capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Shum cv. Mott) cultivado em solução nutritiva. Essa desordem nutricional ocorre devido ao fato que o cálcio forma os pectatos de cálcio da parede celular que são responsáveis pela estruturação das células (Malavolta et al., 1989).

O fornecimento de Si na solução nutritiva nas plantas sob deficiência de Ca diminuiu os efeitos do estresse causado pela supressão do Ca, refletindo no aumento da produção de massa seca da parte aérea das duas forrageiras (Figuras 1 e 2) e da raiz na forrageira BRS Zuri (Figura 1). Foi constatado que nas plantas sob deficiência de Ca e que receberam Si na solução nutritiva houve aumento da eficiência de uso do Ca em todas as coletas das duas forrageiras fatos que contribuíram para maior produção da massa seca das forrageiras.

Nas forrageiras deficiente de cálcio ficou evidenciado o benefício do Si especialmente devido ao aumento da eficiência de uso do Ca, pois era o único que estava deficiente na solução nutritiva. Este fato possivelmente ocorreu porque o Si auxilia estruturalmente em componentes da parede celular a qual o Ca está envolvido na sua formação constituindo a principal função fisiológica nas plantas. Existem relatos indicando que o Si forma complexos com polímeros estruturais das células, tais como pectinas e calose (Boylston et al., 1990) e ainda ligações cruzadas com ligninas e carboidratos via associações com ácidos fenólicos ou anéis aromáticos (Inanaga et al., 1995) colaborando com a estruturação da parede celular.

4.5 Magnésio

Nas forrageiras a omissão de Mg diminuiu a produção de biomassa prejudicando o seu papel fisiológico na ativação enzimática e na composição química da clorofila (Prado, 2008) e induziu sintomas de deficiência (Figura 6) característicos, já descritos por Prado et al. (2011) em capim-tanzânia cultivado em solução nutritiva.

A aplicação de silício na solução nutritiva mitigou os efeitos provocados pelo estresse nutricional por deficiência de Mg, pois, houve aumento da produção da biomassa da parte aérea na terceira coleta na forrageira BRS Zuri (Figura 1) e na primeira e segunda coletas na forrageira BRS RB331 Ipyorã (Figura 2). O benefício proporcionado pela adição de Si na solução nutritiva nas plantas deficientes de magnésio não ocorreu pelo aumento da sua absorção (Tabelas 1, 2, 6 e 7) e sim pelo o aumento da eficiência de uso deste macronutriente em todas as coletas das duas forrageiras (Tabelas 4, 5, 9 e 10), o que refletiu em maior produção da massa seca das forrageiras.

Além disso, o uso do silício pode ter contribuído para mitigar o estresse por deficiência de Mg, devido à associação indireta deste elemento benéfico no aumento dos teores de clorofila (Xie et al., 2014), e das taxas fotossintéticas (Zuccarini, 2008; Chen et al., 2016), que podem colaborar com melhor eficiência de uso do Mg absorvido e convertido em produção de massa seca. Este efeito do Si ficou evidenciado visualmente, pois houve alívio da severidade dos sintomas de deficiência nutricional (Figura 6). Hosseini et al. (2019), constataram que a aplicação de Si em plantas de milho expostas à deficiência de Mg, regula os metabólitos primários e aumenta os níveis de fito-hormônios (citocinina), que mantém o crescimento e o desenvolvimento das plantas com a deficiência desse nutriente.

4.6 Enxofre

O enxofre foi o segundo nutriente a apresentar sintoma de deficiência após a omissão deste nutriente nas duas forrageiras avaliadas. A omissão desse elemento na solução nutritiva quando comparado com o tratamento completo provocou redução dos valores de todas as variáveis estudadas nas duas forrageiras. Esse resultado está relacionado com a função desse nutriente na planta, fazendo parte de compostos orgânicos importantes como cistina, cisteína e metionina e de todas as proteínas e ainda tem função enzimática e estrutural (Prado, 2008).

Nas plantas cultivadas sob omissão de enxofre nas duas forrageiras a adição de Si na solução não interferiu nos prejuízos fisiológicos relatados, devido ao fato da deficiência deste macronutriente ter ocorrido drasticamente e não houve tempo para que o Si pudesse exercer seus efeitos fisiológicos e aliviasse

essa desordem nutricional. Observou-se que a adição de Si na solução nutritiva não aumentou o acúmulo de nutrientes nas plantas das forrageiras deficientes de enxofre (Tabelas 1, 2, 6 e 7). No entanto, incrementou a eficiência de uso de S em todas as coletas das duas forrageiras (Tabelas 4, 5, 9 e 10), mas, isso não foi suficiente para aumentar a produção da massa seca das forrageiras e também, não aliviou a severidade dos sintomas de deficiência deste nutriente (Figura 7).

Os resultados deste estudo confirmam a hipótese apenas para os nutrientes K, Ca e Mg indicando que a deficiência destes nutrientes em forrageiras pode ser amenizada com o fornecimento de Si. A implicação prática destes dados inéditos ampliam os benefícios do Si na nutrição de plantas e abre a possibilidade de seu emprego nas forrageiras. Essa prática poderá fortalecer a sustentabilidade destas espécies pois são cultivadas em solos com baixa fertilidade natural ou com fertilizações insuficientes e ainda nutrir o animal com Si um elemento essencial para seu metabolismo. É pertinente salientar a necessidade de mais estudos avaliando os efeitos do Si em plantas forrageiras com deficiência não severa de N e S e também ampliar esses estudos em outras espécies de forrageiras.

Além disso, é importante aprofundar nos estudos que possam indicar o papel biológico do Si a nível bioquímico e na eficiência de uso do carbono nas plantas com deficiência nutricional.

5 CONCLUSÕES

Ficou evidenciada a importância do Si no alívio da deficiência de K, Ca e Mg das forrageiras, pois aumentou a produção de massa seca da parte aérea, da raiz e do material residual da touceira, devido a maior eficiência de uso destes nutrientes, não havendo efeito do elemento benéfico para deficiência de N e de S.

6 REFERÊNCIAS

- Avalhaes CC, de Mello Prado R, de Oliveira Gondim AR, Alves AU, Correia MAR (2009) Rendimento e crescimento da beterraba em função da adubação com fósforo. **Scientia Agraria** 10:75-80.
- Bataglia OC, Furlani AMC, Teixeira JPF, Gallo JR (1983) Métodos de análise química de plantas. **Boletim técnico** 78. Campinas: Instituto Agrônômico.
- Boylston EK, Hebert JJ, Hensarling TP, Bradow JM, Thibodeaux DP (1990) Role of silicon in developing cotton fibers. **Journal of plant nutrition** 13:131-148. <https://doi.org/10.1080/01904169009364063>
- Carlisle EM. (1972) Silicon: an essential element for the chick. **Science**. 178: 619–621.
- Cavalcante VS, Prado RDM, de Lima Vasconcelos R, Campos CNS (2016) Iron concentrations in sugar cane (*Saccharum officinarum* L.) cultivated in nutrient solution. **Agrociencia** 50: 867-875. Acessado em 20 de Junho de 2019. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30248292007>.
- Chen D, Cao B, Wang S, Liu P, Deng X, Yin L, Zhang S (2016) Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific reports** 6:22882. <https://doi.org/10.1038/srep22882>.
- Cooke J, Leishman MR (2012) Tradeoffs between foliar silicon and carbon-based defences: evidence from vegetation communities of contrasting soil types. **Oikos** 121: 2052-2060. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2012.20057.x>.
- Deus ACF, Prado RDM, Alvarez RDCF, de Oliveira RLL, Felisberto G (2019) Role of Silicon and Salicylic Acid in the Mitigation of Nitrogen Deficiency Stress in Rice Plants. **Silicon** 1-9. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00195-5>.
- Ferreira DF. (2011) Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e agrotecnologia** 35:1039-1042. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>.
- Ghasemi Mianaei A, Mobasser HR, Madani H, Dastan S. (2011) Silicon and potassium application facts on lodging related characteristics and quantity yield in rice (*Oryza sativa* L.) Tarom Hashemi variety. **Journal of New Finding in Agriculture** 5:423-435.
- Hoagland DR, Arnon DI (1950) The water-culture method for growing plants without soil. **Circular**. California agricultural experiment station 347(2nd edit).
- Hosseini SA, Naseri Rad S, Ali N, Yvin JC (2019) The Ameliorative Effect of Silicon on Maize Plants Grown in Mg-Deficient Conditions. **International journal of molecular sciences** 20:969.
- Inanaga S, Okasaka A, Tanaka S (1995) Does silicon exist in association with organic compounds in rice plant?. **Soil science and plant nutrition** 41:111-117. <https://doi.org/10.1080/00380768.1995.10419564>

Kissmann KG. (1997). **Plantas infestantes e nocivas**. 2ª ed. São Paulo, Basf Brasileira. 825 p.

Korndörfer GH (2004) **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia.

Liu JJ, Lin SH, Xu PL, Wang XJ, Bai JG (2009) Effects of exogenous silicon on the activities of antioxidant enzymes and lipid peroxidation in chilling-stressed cucumber leaves. **Agricultural Sciences in China** 8:1075-1086. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(08\)60315-6](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(08)60315-6).

Malavolta E, Vitti GC, Oliveira S. (1997) **Avaliação do estado nutricional das plantas**. 2. ed. Piracicaba: Potafós, 319 p.

Melo SPD, Monteiro FA, Bona FDD (2010) Silicon distribution and accumulation in shoot tissue of the tropical forage grass *Brachiaria brizantha*. **Plant and soil** 336: 241-249. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0472-5>.

/ (2007) Silicate and phosphate combinations for marandu palisade grass growing on an oxisol. **Scientia Agricola** 64: 275-281. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162007000300010>.

Miao BH, Han XG, Zhang WH (2010) The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium-deficient medium. **Annals of Botany, Oxford** 105: 967-973. <https://doi.org/doi:10.1093/aob/mcq063>

Monteiro FA, Ramos AKB, De Carvalho DD, de Abreu JBR, Daiub JAS, Da Silva JEP, Natale W (1995) Cultivo de *Brachiaria brizantha* Stapf. cv. Marandu em solução nutritiva com omissões de macronutrientes. **Scientia Agricola** 52:135-141. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90161995000100022>.

Neu S, Schaller J, Dudel EG (2017) Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C: N: P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Scientific Reports**, 7:40829. <http://dx.doi.org/10.1038/srep40829>

Prado RM (2008) **Manual de nutrição de plantas forrageiras**. Jaboticabal: Funep, 1, 261-280.

Prado RM, Hojo RH, Avalhães CC, Vale DW, Pimentel UV (2011) Desempenho do capim-tanzânia cultivado em solução nutritiva com a omissão de macronutrientes. **Scientia Agraria Paranaensis** 10:58. <http://dx.doi.org/10.1818/sap.v10i1.5270>

Raven JA (1983). The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews** 58:179-207.

Schaller J, Brackhage C, Gessner MO, Bauker E, Gertdudel E (2012) Silicon supply modifies C:N:P stoichiometry and growth of *Phragmites australis*. **Plant Biol** 14:392–396. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1438-8677.2011.00537.x>

Siddiqi MY, Glass AD (1981) Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of plant nutrition** 4: 289-302. <https://doi.org/10.1080/01904168109362919>

Xie Z, Song F, Xu H, Shao H, Song R (2014) Effects of silicon on photosynthetic characteristics of maize (*Zea mays* L.) on alluvial soil. **The Scientific World Journal** 2014:1-6. <https://doi.org/10.1155/2014/718716>

Zia Z, Bakhat HF, Saqib ZA, Shah GM, Fahad S, Ashraf MR, Hammad HM, Naseem W, Shahid M (2017) Effect of water management and silicon on germination, growth, phosphorus and arsenic uptake in rice. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 144:11-18. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.004>

Zuccarini P (2008) Effects of silicon on photosynthesis, water relations and nutrient uptake of *Phaseolus vulgaris* under NaCl stress. **Biologia Plantarum** 52: 157-160. <https://doi.org/10.1007/s10535-008-0034-3>

CAPÍTULO 3 – EFEITO DA FERTIRRIGAÇÃO COM SILÍCIO NA PRODUÇÃO E NO TEOR DE PROTEÍNA BRUTA DA PASTAGEM

RESUMO: Os efeitos da fertirrigação com o uso do silício solúvel em pastagem não são conhecidos, porém pode apresentar viabilidade na produção e na qualidade da forragem. Portanto, objetivou-se avaliar o efeito da aplicação de duas fontes de silício, via fertirrigação, na produção e no teor de proteína bruta das forrageiras BRS Zuri (*Panicum maximum*) e BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*). Foram realizados dois experimentos utilizando as duas forrageiras com os tratamentos arranjados em esquema fatorial (4x2), sendo quatro concentrações de Si (0, 1, 2 e 4 mmol L⁻¹) e duas fontes de Si: silicato de sódio e potássio estabilizado e silicato de potássio, dispostos em blocos inteiramente casualizados com quatro repetições. As plantas foram cultivadas em vasos preenchidos com amostras de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico apresentando o teor de Si disponível = 5,1 mg dm⁻³. O silício foi aplicado semanalmente via fertirrigação o equivalente a uma lâmina de 5 mm. Realizaram-se duas coletas de forragens avaliando-se o acúmulo de Si na parte aérea, número de perfilhos e de folhas, área foliar, eficiência do uso de nitrogênio, massa seca da parte aérea e acumulada, teores de N e de proteína bruta. As variáveis avaliadas independente da fonte aumentaram com a fertirrigação com Si nas duas coletas das forrageiras. Conclui-se que o uso da fertirrigação de Si é viável agronomicamente no cultivo das forrageiras devido ao aumento da produção e do teor de proteína bruta das mesmas.

Palavras-chave: Forrageiras, silicato de sódio, silicato de potássio, massa seca

1 INTRODUÇÃO

O silício (Si) é um elemento benéfico que promove melhoria nas plantas que incluem morfologia das folhas, maior penetração de raízes no solo, aumento da rigidez e resistência da parede celular, além de minimizar a perda de água por transpiração cuticular (Ma, 2004). A baixa demanda de energia durante a incorporação do Si no tecido da planta em relação aos compostos orgânicos pode indicar que este elemento benéfico poderia substituir o C em determinados esqueletos orgânicos da parede celular da planta (Raven, 1983). Desta forma, o carbono pode ser usado em outras sínteses orgânicas, favorecendo o crescimento das plantas. Em muitas espécies o incremento de biomassa das plantas é muito dependente do perfilhamento e tem-se relatos que o Si incrementa o número de perfilhos em plantas de arroz (Yasari et al. 2012; Cuong et al. 2017).

Além disso, o silício pode alterar o metabolismo do nitrogênio, favorecendo a atividade da redutase do nitrato (Li e Ma, 2002), maior remobilização dos aminoácidos das folhas (Detmann et al. 2012) e pode aumentar o teor de clorofila foliar refletindo na fotossíntese (Flores et al. 2018) o que pode favorecer maior eficiência de uso do N visto em plantas de trigo (Neu, Schaller e Dudel, 2017) e de arroz (Detmann et al. 2012) aumentando a sua conversão em proteína fato importante nas espécies forrageiras. Portanto, melhor aproveitamento do N no metabolismo é importante, pois segundo Marschner et al. (1995) este macronutriente também favorece o perfilhamento e o crescimento das forrageiras aumentando a produção de massa seca. Adicionalmente, o aumento do consumo de forrageira com maior teor de proteína bruta atende a demanda nutricional dos animais e induz maior ganho de peso (Cameron et al. 1991).

Em forrageiras os estudos com silício concentram-se na sua aplicação incorporada ao solo, usando fontes a base de silicato de cálcio resultando em incrementos na produção (Melo, Monteiro e Bona, 2010; Korndörfer et al., 2010). No entanto, esses autores não avaliaram seus efeitos no perfilhamento e na eficiência de uso do N, variáveis que podem contribuir para explicar o aumento da produção das forrageiras. O silicato de cálcio por ter solubilidade muito baixa em água (0,095 g/L de Si a 17°C) (Alcarde e Rodella, 2003), comparada a outras fontes, e é usualmente incorporando ao solo com grade aradora, exigindo altas

doses do material para atingir maior eficiência. Entretanto, essa prática pode danificar as raízes das forrageiras implantadas. Diante disso, tem surgido novas formas de aplicação de Si, via fertirrigação, com uso de fontes mais solúveis que o silicato de cálcio sendo possível diminuir às doses do elemento ampliando a sua eficiência nos cultivos com forrageiras, mesmo que esteja implantada no campo. As fontes solúveis seriam a base de silicato de potássio ou silicato de sódio, mas não é conhecido o efeito dessas fontes via fertirrigação na produção de plantas forrageiras.

O avanço das pastagens irrigadas, tem-se a necessidade de aumentar seu potencial produtivo, portanto, o emprego do Si pode ser uma alternativa para garantir alta produtividade com qualidade. Assim, é importante testar a hipótese que a fertirrigação com silício, independente da fonte solúvel, é viável agronomicamente para cultivo de forrageiras, devido ao aumento do número de perfilhos, folhas e da área foliar, potencializando a produção e também a qualidade por aumentar a eficiência de uso do N e o teor de proteína bruta.

Por isso, objetivou-se avaliar o efeito da aplicação de duas fontes de silício via fertirrigação na produção e no teor de proteína bruta das forrageiras BRS Zuri (*Panicum maximum*) e BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Tratamentos e arranjo experimental

Os experimentos foram desenvolvidos em casa de vegetação na Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT, Campus de Alta Floresta no período de junho a outubro do ano de 2018. As forrageiras utilizadas foram a BRS Zuri (*Panicum maximum*) e BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*). Os tratamentos foram arranjados em esquema fatorial (4x2) sendo quatro concentrações de Si (0, 1, 2 e 4 mmol L⁻¹) e duas fontes de Si: silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaK) (107 g L⁻¹ de Si e 28,4 g L⁻¹ de K₂O) e silicato de potássio (SiK) (128 g L⁻¹ de Si e 126,5 g L⁻¹ de K₂O), dispostos em blocos inteiramente casualizados com quatro repetições. O K foi equilibrado entre os tratamentos utilizando o cloreto de potássio.

2.2 Condução do experimento

A unidade experimental foi constituída por um vaso de polietileno com capacidade para 6 dm³, sendo preenchido com 5,5 dm³ de amostras de solo coletado na camada de 0 – 20 cm de profundidade e peneirado em peneira de 4 mm. O solo utilizado foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Santos et al. 2018) a qual foi realizada análise granulométrica de acordo com Teixeira et al. (2017) tendo os teores de areia, silte e argila iguais a 70, 8 e 22 g kg⁻¹, respectivamente. Determinou-se o teor de silício disponível (5,1 mg dm⁻³) conforme método descrito por Korndörfer et al. (2004), utilizando como extrator ácido acético 0,5 mol L⁻¹. Realizou-se adubação de base incorporada ao solo aplicando-se N (80 mg dm⁻³), na forma de sulfato de amônio (20% N); P (200 mg dm⁻³) na forma de MAP (60% P₂O₅ + 11% N), K (150 mg dm⁻³), na forma de cloreto de potássio (60% K₂O); B (0,5 mg dm⁻³), na forma de ácido bórico (17% de B) e Zn (5 mg dm⁻³) na forma de sulfato de zinco (22% de Zn), respectivamente. Foram realizadas cinco adubações de cobertura com N (40 mg dm⁻³) e K₂O (15 mg dm⁻³) iniciando-se aos 25 dias após a germinação até na segunda coleta das forrageiras.

2.3 Aplicação do Si via fertirrigação

Nos tratamentos com silício, este foi aplicado via fertirrigação com auxílio de um regador de 5 litros, no qual a solução com silício foi aplicada sobre as plantas atingindo as folhas e o solo em cada unidade experimental o equivalente a uma lâmina de 5 mm, para evitar a perda de solução, os vasos foram colocados sobre um recipiente coletor.

A aplicação foi realizada a cada semana, iniciando no sétimo dia após o corte de uniformização durante quatro semanas e mais quatro aplicações após a primeira coleta, totalizando 33,6, 67,2 e 134,4 mg de Si por vaso para as concentrações de Si 0, 1, 2 e 4 mmol L⁻¹, respectivamente. As soluções de sódio e silicato de potássio e silicato de potássio foram preparadas com água deionizada e o pH foi ajustado para 6,9 a 7,0, com adição de solução com HCl 2 mol L⁻¹. Para evitar à contaminação de Si vindo de vidraria, as soluções foram preparadas em recipientes de polipropileno.

Salienta-se que no dia da fertirrigação com Si manteve-se o solo com umidade igual a 90% da capacidade de retenção de água evitando a polimerização do elemento benéfico e sua lixiviação. Nos demais dias as

irrigações foram realizadas com água destilada para manter a umidade do solo próxima a 60% da capacidade de campo, utilizando o método de pesagem dos vasos, segundo a recomendação de Klute (1986).

2.4 Coleta e análise dos dados

Foram realizadas duas coletas de biomassa aérea a uma altura de 15 cm da superfície do solo: a primeira foi realizada 30 dias após o corte de uniformização e a segunda 30 dias após a primeira coleta.

Inicialmente foram contados os números de perfilhos dos vasos, após esse procedimento a biomassa foi cortada sendo separada a lâmina foliar do colmo, e posteriormente realizada a medição de área foliar com auxílio do aparelho integrador LICOR[®] LI-3000. Após a avaliação da área foliar, o material vegetal foi lavado com água corrente, solução detergente (0,1 %), solução de ácido clorídrico (0,3 %) e água deionizada. O material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar ($65\pm 5^{\circ}\text{C}$), até atingir massa constante.

O teor de Si na parte aérea foi determinado de acordo com a metodologia descrita por Korndörfer et al. (2004). Realizou-se a determinação do teor total de N na parte aérea a partir da digestão sulfúrica conforme método descrito por Bataglia et al. (1983), do teor de proteína bruta conforme método descrito por Yasuhara e Nokihara (2001) e o cálculo de eficiência de uso do N pela fórmula: $(\text{massa seca da parte aérea})^2 / \text{acúmulo do nutriente na parte aérea}$, conforme indicação de Siddiqi e Glass (1981).

2.5 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos ao teste F ($P < 0,05$) utilizando o programa estatístico Sisvar[®] (Ferreira, 2011). O teste de Tukey com 5% de probabilidade foi utilizado para comparar as fontes de Si e a regressão polinomial para comparar as concentrações de Si via fertirrigação.

3 RESULTADOS

3.1 Experimento 1

A aplicação de silício via fertirrigação na pastagem BRS Zuri (*Panicum maximum*) não apresentou interação entre as concentrações e as fontes nas variáveis estudadas, portanto, os efeitos do silício não dependem da fonte empregada.

As aplicações das duas fontes de Si promoveram incremento com ajuste quadrático no acúmulo de silício na primeira (Figura 1A) e na segunda coleta (Figura 1B). Na primeira coleta, o ponto de máximo acúmulo de Si foi de 101,6 mg na concentração 2,40 mmol L⁻¹ de Si e 97,9 mg em 2,31 mmol L⁻¹ de Si; na segunda coleta os valores máximos foram de 128,0 mg na concentração 2,73 mmol L⁻¹ de Si e 139,0 mg em 2,78 mmol L⁻¹ de Si nas fontes SiNaK e SiK, respectivamente.

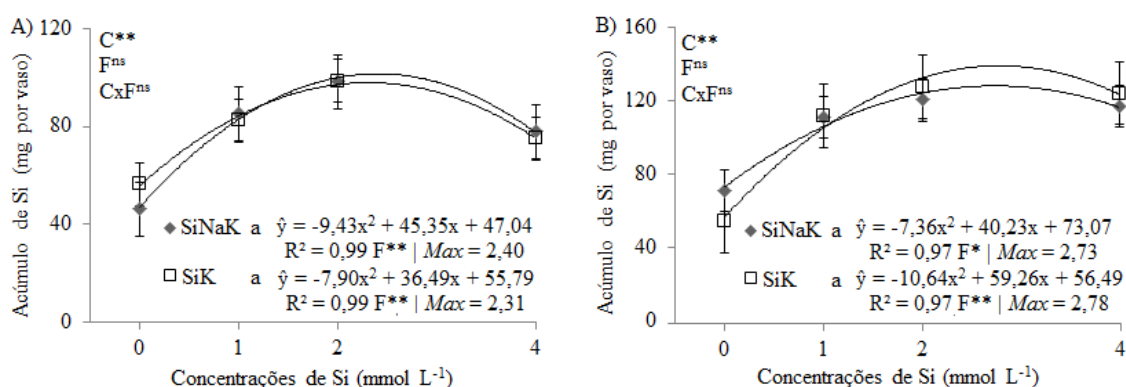


Figura 1: Acúmulo de silício (Si) da forrageira BRS Zuri (*Panicum maximum*) na primeira (A) e na segunda coleta (B) em função de concentrações de silício aplicado via fertirrigação (C) em duas fontes (F): silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaK) e silicato de potássio (SiK); interação fonte e concentrações (FxC). *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns}não significativo. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre as fontes, pelo teste pelo teste F de Tukey. Max: ponto de máximo da regressão.

O número de perfilhos da forrageira apresentou acréscimo com ajuste quadrático independente da fonte utilizada, atingindo ponto de máximo de 35 perfilhos na primeira coleta, nas concentrações 2,64 e 2,60 mmol L⁻¹ de Si nas fontes SiNaK e SiK, respectivamente (Figura 2A). Já para a segunda coleta o ajuste foi linear quando a fonte utilizada foi o SiNaK e quadrático para a fonte

SiK, no qual atingiu o ponto de máximo em 68 perfilhos na concentração de 2,31 mmol L⁻¹ de Si (Figura 2B).

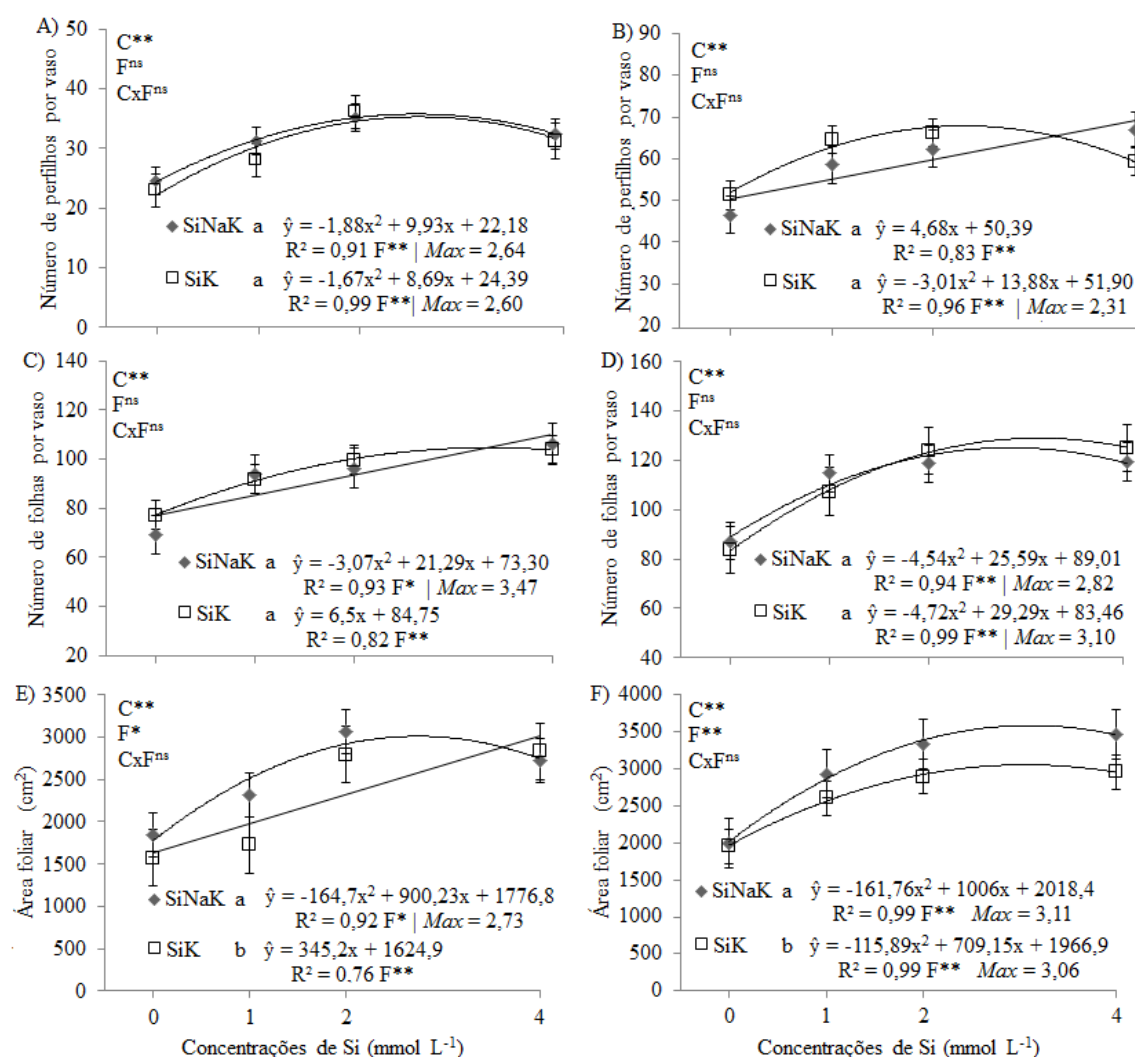


Figura 2: Número de perfilhos, número de folhas e área foliar da forrageira BRS Zuri (*Panicum maximum*) na primeira (A, C e E) e na segunda coleta (B, D e F) em função de concentrações de silício aplicado via fertirrigação (C) em duas fontes (F): silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaK) e silicato de potássio (SiK). *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre as fontes, pelo teste pelo teste F de Tukey. Max: ponto de máximo da regressão.

A eficiência do uso de nitrogênio foi influenciada pela aplicação do silício via fertirrigação com ajuste quadrático independente da fonte utilizada na primeira coleta (Figura 3A), tendo os pontos de máxima eficiência nas concentrações 2,03 e 1,90 mmol L⁻¹ de Si para as fontes SiNaK e SiK, respectivamente. Já na segunda, coleta o fornecimento de Si na forma de SiNaK apresentou um aumento linear e o SiK não afetou essa variável (Figura 3B).

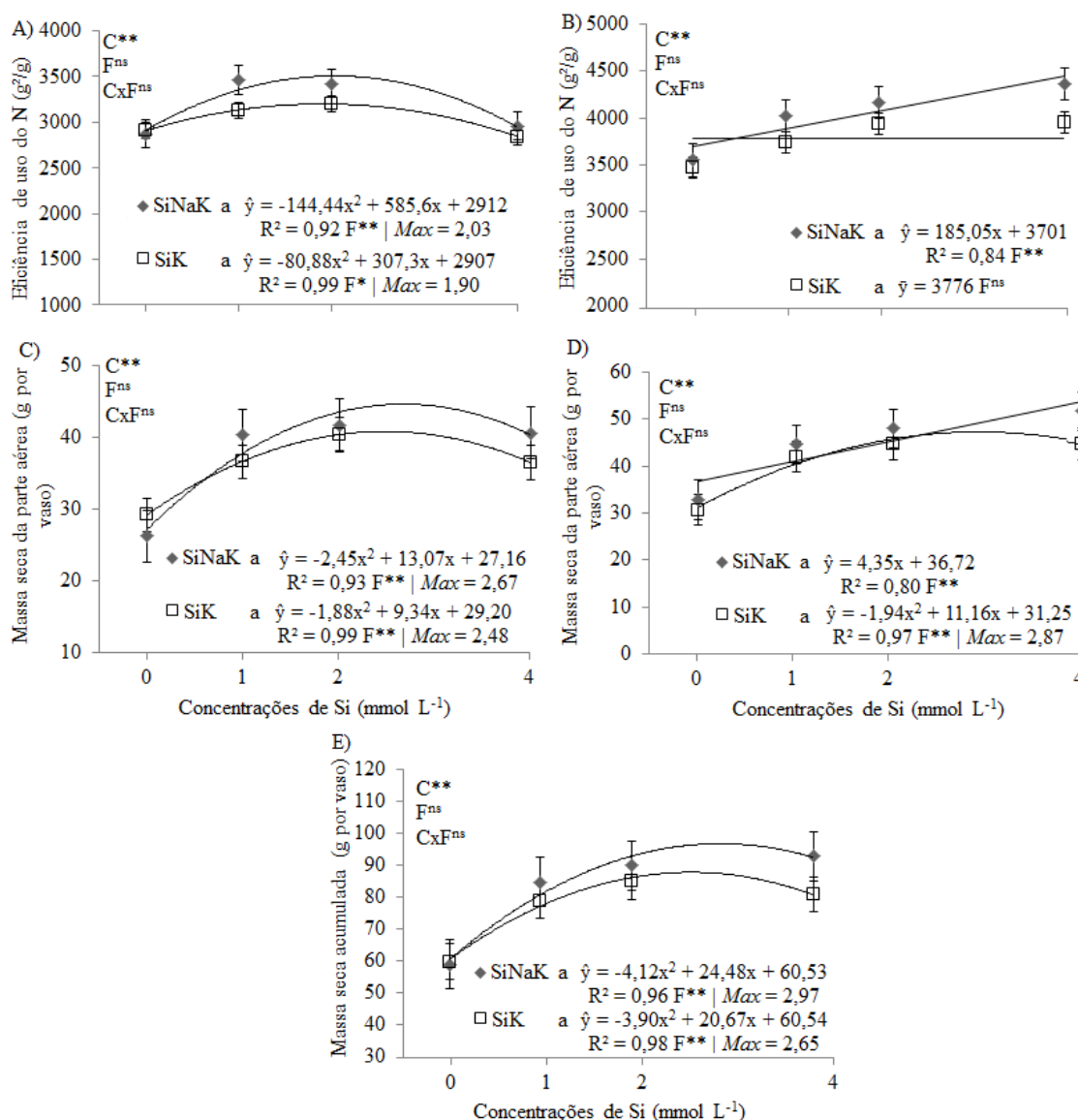


Figura 3: Eficiência de uso do nitrogênio da forrageira BRS Zuri (*Panicum maximum*) referente à parte aérea da primeira coleta (A), segunda coleta (B) e acumulada das duas coletas (C) em função de concentrações de silício aplicado via fertirrigação (C) em duas fontes (F): silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaK) e silicato de potássio (SiK). *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre as fontes, pelo teste pelo teste F de Tukey. Max: ponto de máximo da regressão.

A fertirrigação com Si independente das fontes promoveu incremento com ajuste quadrático na massa seca da parte aérea na primeira coleta (Figura 3C), com ponto de máximo em 44,59 g na concentração 2,67 mmol L⁻¹ de Si quando utilizado o SiNaK e 40,80 g em 2,48 mmol L⁻¹ de Si para o SiK. Na segunda coleta o aumento da massa seca da parte aérea apresentou um ajuste linear para a fonte SiNaK (Figura 3D). No entanto, para o SiK o ajuste foi quadrático

tendo incremento máximo observado de 47,29 g na concentração 2,87 mmol L⁻¹ de Si. Já a massa seca acumulada apresentou incremento com ajuste quadrático independente da fonte (Figura 3E). As concentrações utilizadas promoveram incremento até as concentrações de 2,97 e 2,65 mmol L⁻¹ de Si, com valores de 96,89 e 87,92 g para as fontes SiNaK e SiK, respectivamente.

O teor de N na parte aérea e a porcentagem da proteína bruta apresentaram resultado semelhante na primeira e na segunda coleta nas duas fontes utilizadas. A fonte SiNaK apresentou um incremento com ajuste linear na primeira coleta (Figuras 4A e 4C) em ambas as variáveis. Já na segunda coleta o incremento apresentou ajuste quadrático atingindo o teor de N igual a 11,93 g kg⁻¹ na concentração de 2,73 mmol L⁻¹ de Si e teor de proteína igual a 8,41% na concentração de 2,70 mmol L⁻¹. A aplicação de Si na forma de SiK aumentou com ajuste quadrático o teor de N da parte aérea, atingindo os valores máximo igual a 14,77 g kg⁻¹ na concentração de 3,22 mmol L⁻¹ de Si na primeira coleta e igual a 12,12 g kg⁻¹ na concentração de 2,80 mmol L⁻¹ de Si na segunda coleta. Já a porcentagem de proteína bruta a fertirrigação com Si na forma de SiK resultou em pontos máximos iguais 8,94 e 7,54% na concentração de 2,69 e 2,70 mmol L⁻¹ de Si, na primeira e segunda coleta, respectivamente.

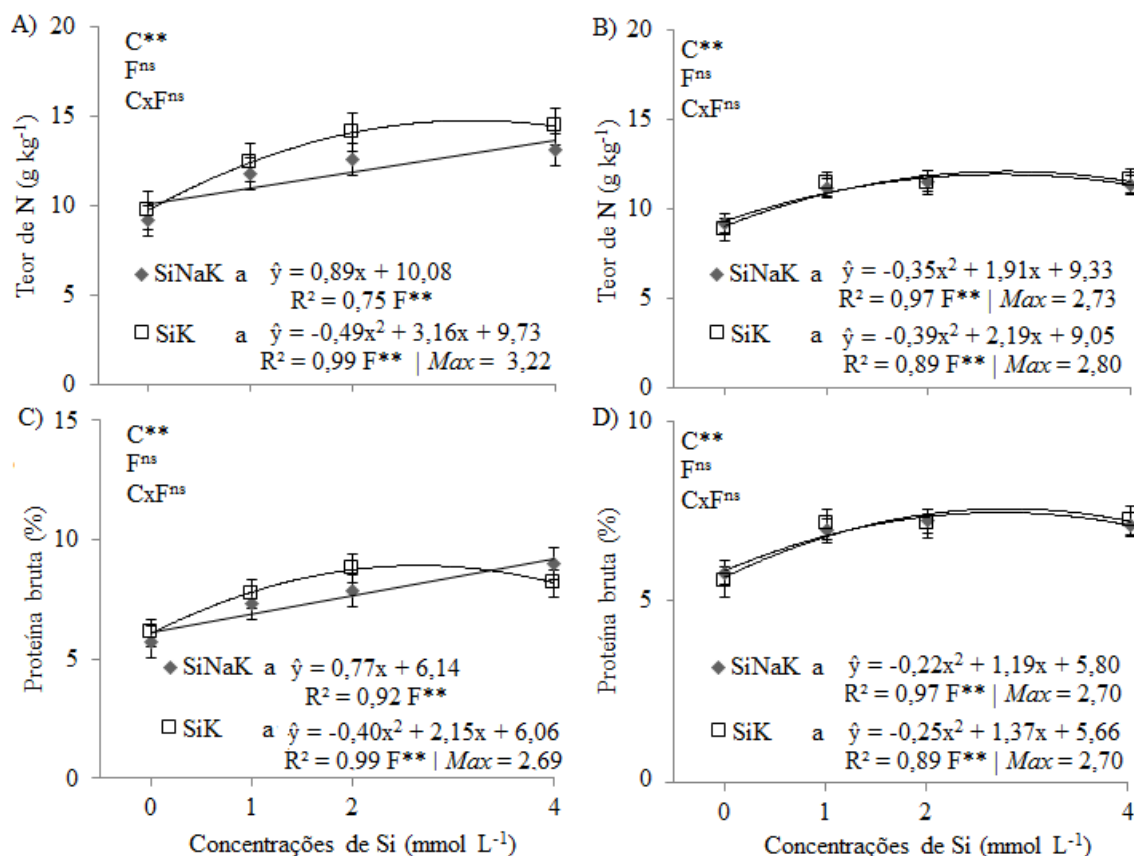


Figura 4: Teor de nitrogênio e proteína bruta da forrageira BRS Zuri (*Panicum maximum*) na primeira (A e C) e na segunda coleta (B e D) em função de concentrações de silício aplicado via fertirrigação (C) em duas fontes (F): silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaK) e silicato de potássio (SiK). *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns}não significativo. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre as fontes, pelo teste F de Tukey. Max: ponto de máximo da regressão.

3.2 Experimento 2

Assim como no experimento 1 a fertirrigação com silício na pastagem BRS Ipyporã não apresentou interação entre as concentrações de silício utilizadas e as fontes nas variáveis estudadas, indicando que os efeitos do silício não dependem da fonte empregada.

A aplicação das duas fontes de Si via fertirrigação promoveu incremento com ajuste quadrático no acúmulo de silício na primeira (Figura 5A) e na segunda coleta (Figura 5B). O incremento máximo atingido na primeira coleta foi de 50,58 mg na concentração 2,37 mmol L⁻¹ de Si para o SiNaK e 58,17 mg em 2,40 mmol L⁻¹ de Si quando a fonte utilizada foi o SiK. Na segunda coleta os valores máximos foram de 97,05 mg na concentração 3,06 mmol L⁻¹ de Si e 96,35 g em 2,54 mmol L de Si nas fontes SiNaK e SiK, respectivamente.

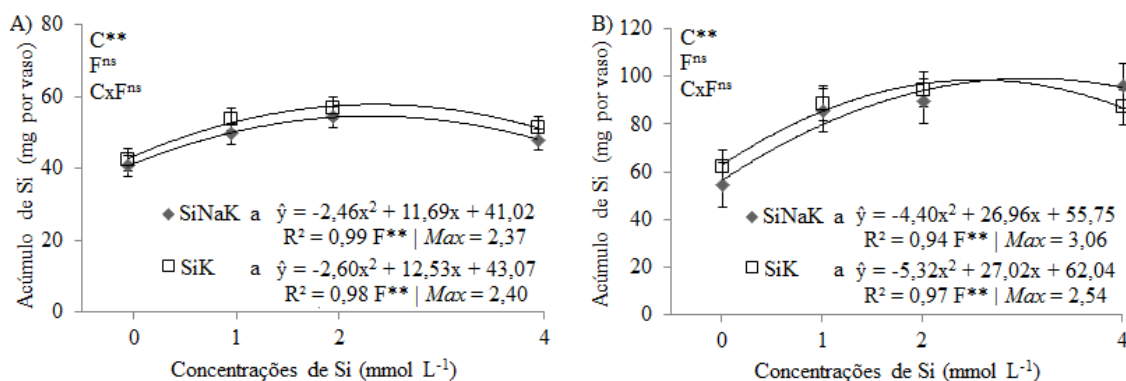


Figura 5: Acúmulo de silício (Si) da forrageira BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *B. brizantha*) na primeira (A) e na segunda coleta (B) em função de concentrações de silício aplicado via fertirrigação (C) em duas fontes (F): silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaK) e silicato de potássio (SiK). *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns}não significativo. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre as fontes, pelo teste pelo teste F de Tukey. Max: ponto de máximo da regressão.

No número de perfilhos as concentrações 2,59 e 2,72 mmol L⁻¹ de Si resultaram em valores máximos de 65 e 68 perfilhos na primeira coleta (Figura 6A) e concentrações de 2,99 e 2,77 mmol L⁻¹ de Si com valores máximos de 96 e 93 perfilhos na segunda coleta (Figura 6B), para as respectivas fontes SiNaK e SiK, respectivamente.

Na primeira coleta o número de folhas atingiu o ponto de máximo em 171 e 180 folhas para as concentrações de 2,10 e 2,34 mmol L⁻¹ de Si, para as fontes SiNaK e SiK, respectivamente (Figura 6C). Já na segunda coleta (Figura 6D) o ponto máximo foi atingido em 178 folhas na concentração de 2,80 mmol L⁻¹ de Si na forma de SiK.

A área foliar na primeira coleta apresentou os pontos máximo de 2245 e 2251 cm² nas concentrações 2,46 e 2,20 mmol L⁻¹ de Si para o SiNaK e SiK (Figura 6E). Enquanto na segunda coleta o ponto de máximo foi de 2407 e 2550 cm² para as concentrações de 2,46 e 2,43 mmol L⁻¹ de Si (Figura 6F), na forma de SiNaK e SiK, respectivamente.

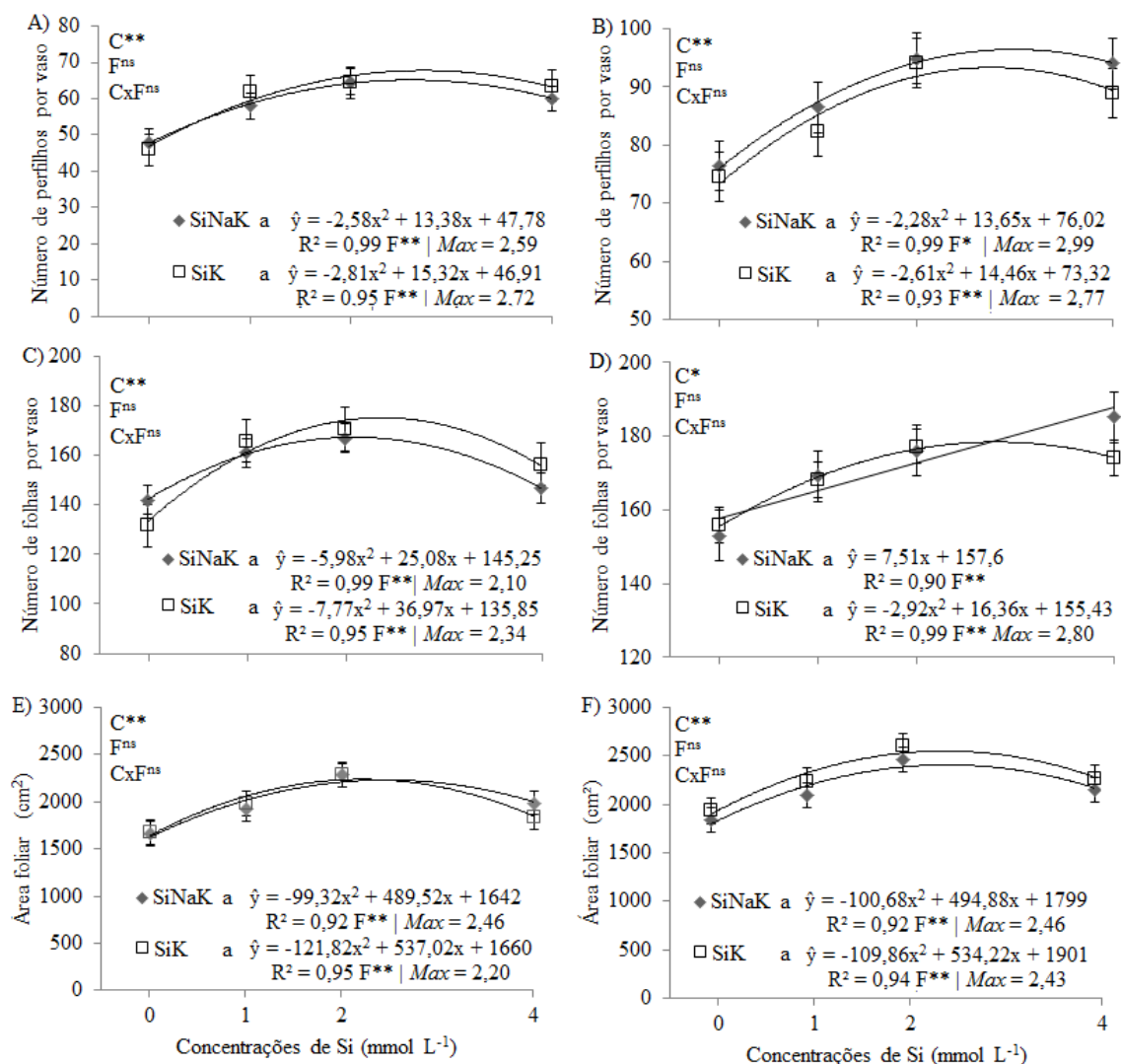


Figura 6: Número de perfilhos, número de folhas e área foliar da forrageira BRS RB331 Ipyorã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *B. brizantha*) na primeira (A, C e E) e na segunda coleta (B, D e F) em função de concentrações de silício aplicado via fertirrigação (C) em duas fontes (F): silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaK) e silicato de potássio (SiK). *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre as fontes, pelo teste pelo teste F de Tukey. Max: ponto de máximo da regressão.

A eficiência de uso do N foi incrementada atingindo ponto de máximo com uso das fontes SiNaK e SiK iguais a 2,48 e 2,16 mmol L⁻¹ de Si para a primeira coleta (Figura 7A) e de 2,36 e 2,03 mmol L⁻¹ de Si, para a segunda coleta (Figura 7B), respectivamente.

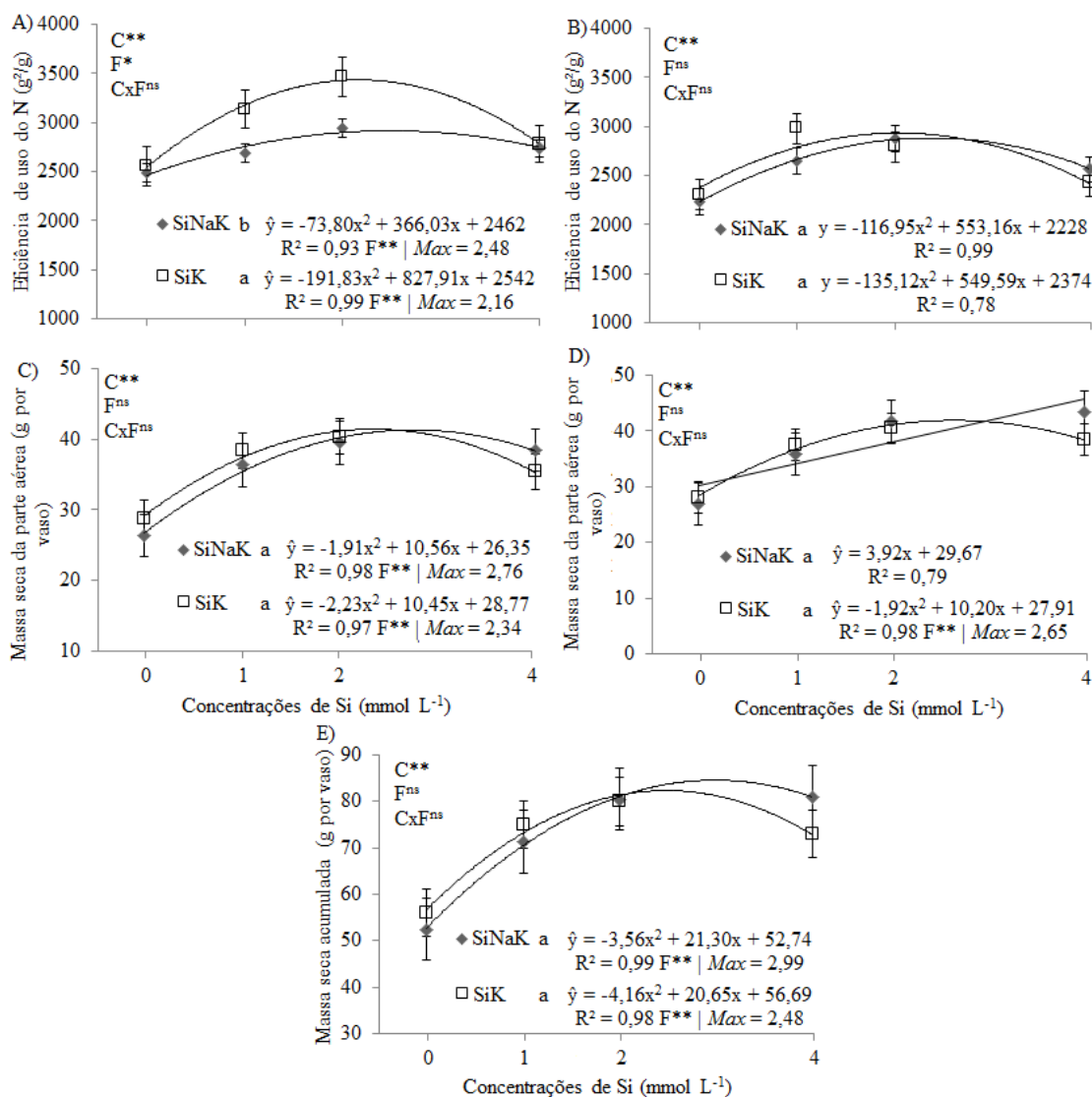


Figura 7: Eficiência de uso do N, massa seca da parte aérea e massa seca acumulada da forrageira BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *B. brizantha*) na primeira (A, e C), na segunda coleta (B e D) e acumulada (E) em função de concentrações de silício aplicado via fertirrigação (C) em duas fontes (F): silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaK) e silicato de potássio (SiK). *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre as fontes, pelo teste pelo teste F de Tukey. Max: ponto de máximo da regressão.

A fertirrigação silicatada com as fontes utilizadas promoveu incremento com ajuste quadrático na massa seca da parte aérea na primeira coleta (Figura 7C), com pontos de máximo em 40,94 e 41,01g nas concentrações 2,76 e 2,34 mmol L^{-1} de Si para as fontes SiNaK e SiK, respectivamente. Na segunda coleta, o fornecimento de Si na forma de SiNaK incrementou com ajuste linear a massa seca da parte aérea (Figura 7D). Para a fonte SiK o ajuste foi quadrático sendo

o incremento máximo na massa seca observado de 41,46 g na concentração 2,65 mmol L⁻¹ de Si.

Resultado semelhante da fertirrigação com Si ocorreu com massa seca acumulada, referente à soma das duas coletas tendo incremento com ajuste quadrático, atingindo valor máximo iguais a 86,6 e 82,3 g na concentração de 2,99 e 2,48 mmol L⁻¹ de Si na forma de SiNaK e SiK, respectivamente (Figura 7D)

A aplicação de Si na forma de SiNaK, apresentou um incremento do teor de N na parte aérea e o teor de proteína com ajuste linear na primeira (Figuras 8A e 8C) na segunda coleta (Figuras 8B e 8D). A aplicação de Si na forma de SiK incrementou o teor de N com ajuste quadrático, com valores máximos de 13,5 e 15,5 g kg⁻¹ na concentração de 2,53 e 2,95 mmol L⁻¹ de Si na primeira coleta e na segunda, respectivamente. Para essa mesma fonte de Si, a porcentagem de proteína bruta apresentou os pontos máximos de 9,97 e 11,62% para as concentrações 2,54 e 2,92 mmol L⁻¹ de Si na primeira e na segunda coleta, respectivamente.

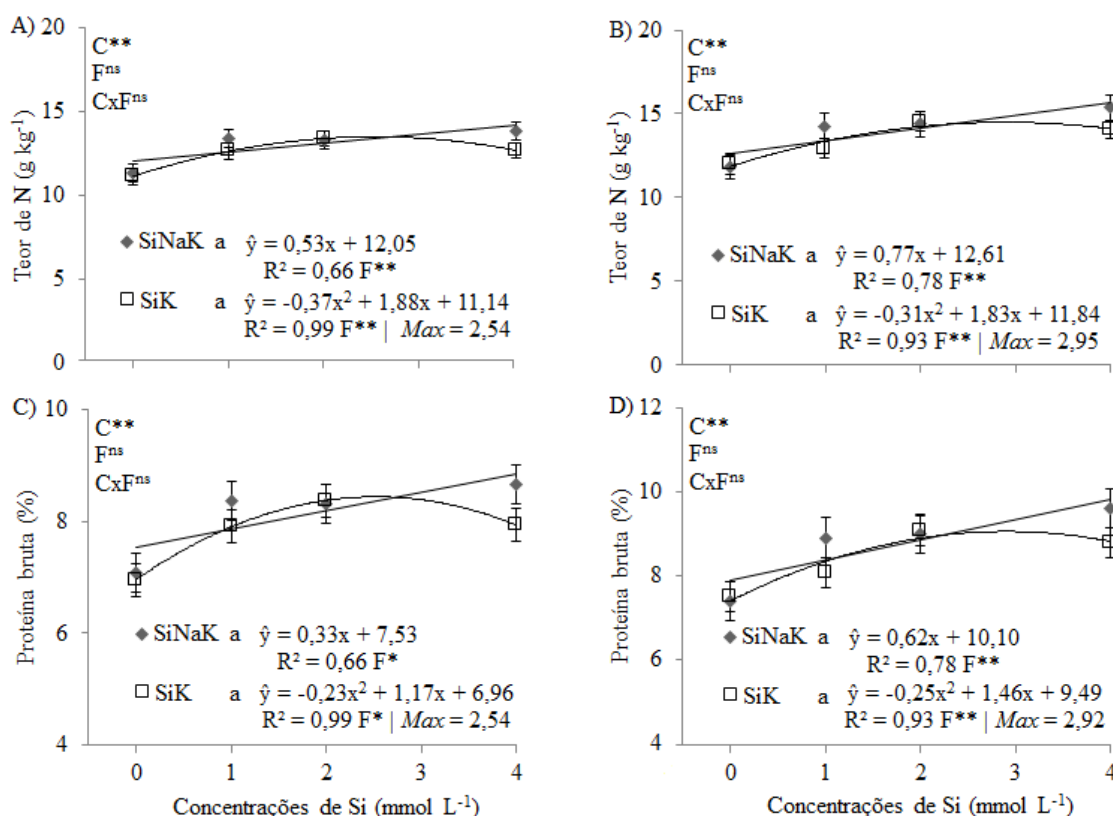


Figura 8: Teor de nitrogênio e proteína bruta da forrageira BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *B. brizantha*) na primeira (A e C) e na segunda coleta (B e D) em função de concentrações de silício aplicado via fertirrigação (C) em duas fontes (F): silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaK) e silicato de potássio (SiK). *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre as fontes, pelo teste pelo teste F de Tukey. Max: ponto de máximo da regressão.

4 DISCUSSÃO

As aplicações de silício via fertirrigação utilizando as fontes SiNaK e SiK foram eficientes para aumentar a absorção de silício nas forrageiras BRS Zuri e BRS Ipyporã (Figuras 1 e 6), indicando que existe uma estreita relação entre as concentrações de silício aplicado com o acúmulo na planta. Estes resultados foram semelhantes aos outros trabalhos mas que utilizaram Si incorporado no solo em altas doses (Melo, Monteiro e Bona, 2010; Korndörfer et al. 2010). No entanto, foi possível incrementar o elemento benéfico empregando o Si na fertirrigação com doses relativamente baixas indicando alta eficiência desta nova prática de fornecimento de Si às forrageiras.

Ficou evidenciado que o aumento da absorção de Si pelas plantas refletiu em incremento do número de perfilhos independentemente da fonte (Figuras 2

e 6). Resultado semelhante foi relatado em plantas de arroz (Yasari et al., 2012; Cuong et al., 2017), mas ainda não relatado em forrageiras. Assim, o maior perfilhamento da planta proporcionado pelo Si foi responsável pelo incremento do número de folhas e da área foliar das duas forrageiras independentemente da fonte de Si aplicada (Figuras 2 e 6).

A fertirrigação com o Si esteve associada aos maiores teores foliares de N e aumento da eficiência de uso do N. Diante disso, houve melhor desempenho das variáveis de crescimento e refletiu no incremento da produção de massa seca (Figuras 3 e 7). Estudos com aplicação de Si no solo não evidenciaram aumento da produção de massa seca em *Brachiaria decumbens* e *Brachiaria brizantha* (Melo et al. 2003) e em *Brachiaria brizantha* e *Panicum maximum* (Korndörfer et al. 2010). Essas diferenças possivelmente se devem a fonte de Si, pois utilizaram materiais à base de silicato de cálcio de baixa solubilidade em água (0,095 g L⁻¹ de Si a 17°C), enquanto no presente trabalho foram usadas fontes com solubilidade completa em água (silicato de potássio ou mistura do silicato de potássio e silicato de sódio) o que poderia resultar em maior acúmulo do elemento na planta.

O maior conteúdo de Si na planta teve maior produção de biomassa devido aos ganhos na eficiência de uso de N, exceto para a cultivar BRS Zuri na segunda coleta (Figura 3). A importância do Si no aumento da eficiência de uso do N deve-se possivelmente a soma de diversos benefícios deste elemento como aumento da eficiência da atividade da redutase do nitrato incrementando aminoácidos, proteínas e clorofilas (Sharner e Boyer, 1976; Taiz e Zeiger, 2013) e também aumenta a redistribuição do N das folhas (Detmann et al. 2012) e pode substituir parte do C de componentes da parede celular (Raven, 1983). Soma-se a isto, o fato que o maior acúmulo do Si nas células epidérmicas da parte aérea, melhora o ângulo de abertura das folhas tornando-as mais eretas, diminuindo o auto sombreamento e favorecendo o melhor aproveitamento da luz, aumentando a produção de fotoassimilado (Korndörfer et al. 1999).

Observa-se que a fertirrigação com Si solúvel de 2,7-2,8 mmol L⁻¹ (média das duas fontes e de duas espécies), ao promover maior incremento da produção de biomassa acumulada é a mais adequada para o cultivo de forrageiras. Ao considerar as fertirrigações na menor e na maior concentração de Si durante as duas coletas de plantas, a quantidade deste elemento por vaso

correspondeu a 33,6 a 134,4 mg de Si, equivalente 10,7 a 42,8 kg ha⁻¹ de Si. Isso indica que a fertirrigação com Si com fonte de alta solubilidade uma prática de alta eficiência para produção de biomassa e aumento no teor de proteína bruta das forrageiras, empregando quantidade deste elemento relativamente baixa.

No presente estudo a hipótese pode ser aceita indicando-se a fertirrigação com Si em plantas forrageiras nas duas fontes estudadas. Portanto, a fertirrigação com fontes solúveis de Si em forrageiras é uma prática eficiente por permitir otimizar ganhos na produção e aumento no teor da proteína bruta.

5 CONCLUSÕES

O uso da fertirrigação de Si independente da fonte solúvel, é interessante no cultivo da forrageira BRS Zuri (*Panicum maximum*) e BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*) devido ao aumento da produção e aumento do teor da proteína bruta.

6 REFERÊNCIAS

- Alcarde JC, Rodella AA (2003) Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. **Tópicos em Ciências do Solo** 3:291-334.
- Bataglia OC, Teixeira JPF, Furlani PR, Furlani AMC, Gallo JR (1983) Métodos de análise química de plantas. Instituto Agrônomo de Campinas - **Boletim técnico** 78. Campinas, Brasil, 48 p.
- Cameron MR, Klusmeyer TH, Lynch GL, Clark JH, Nelson DR (1991) Effects of urea and starch on rumen fermentation, nutrient passage to the duodenum, and performance of cows. **Journal of Dairy Science** 74:1321-1336. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78288-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78288-X)
- Cuong TX, Ullah H, Datta A, Hanh TC (2017) Effects of silicon-based fertilizer on growth, yield and nutrient uptake of rice in tropical zone of Vietnam. **Rice Science** 24:283-290. doi: 10.1016/j.rsci.2017.06.002.
- Melo SPD, Monteiro FA, Bona FDD (2010) Silicon distribution and accumulation in shoot tissue of the tropical forage grass *Brachiaria brizantha*. **Plant and Soil** 336:241-249. doi: 10.1007/s11104-010-0472-5.
- Detmann KC, Araújo WL, Martins SC, Sanglard LM, Reis JV, Detmann E, Rodrigues FA, Nunes-Nesi A, Fernie AR, Da Matta FM (2012). Silicon nutrition increases grain yield, which, in turn, exerts a feed-forward stimulation of photosynthetic rates via enhanced mesophyll conductance and alters primary metabolism in rice. **New Phytologist** 196:752-762. doi: 10.1111/j.1469-8137.2012.04299.x.
- Ferreira DF (2011) Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia** 35:1039-1042. doi: 10.1590/S1413-70542011000600001.
- Flores RA, Arruda EM, Damin V, Junior JPS, Maranhao DDC, Correia MAR, de Mello Prado R (2018) Physiological quality and dry mass production of Sorghum bicolor following silicon (Si) foliar application. **Australian Journal of Crop Science** 12: 631-638. doi: 10.21475/ajcs.18.12.04.pne967.
- Hosseini SA, Naseri Rad S, Ali N, Yvin JC (2019) The Ameliorative Effect of Silicon on Maize Plants Grown in Mg-Deficient Conditions. **International Journal of Molecular Sciences** 20: 969.
- Klute A (1986) **Water retention: laboratory methods**. Methods of soil analysis: part 1—physical and mineralogical methods, (methodsofsoilan1), 635-662.
- Korndörfer GH (2004). **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia.
- Korndörfer GH, Coelho NM, Snyder GH, Mizutani CT (1999) Avaliação de métodos de extração de silício em solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 23:101-106. doi: 10.1590/S0100-06831999000100013.

Korndörfer PH, Silva GCD, Teixeira IRT, Silva AGD, Freitas RSD (2010) Efeito da adubação silicatada sobre gramíneas forrageiras e características químicas do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 40:119-125. doi: 10.5216/pat.v40i2.3922.

Li QF, Ma CC (2002) Effect of available silicon in soil on cucumber seed germination and seedling growth metabolism. **Acta Horticulturae Sinica** 29:433-437. doi: 10.2478/v10032-012-0008-z.

Ma JF (2004) Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil science and plant nutrition** 50:11-18. doi: 10.1080/00380768.2004.10408447.

Maillard A, Ali N, Schwarzenberg A, Jamois F, Yvin JC, Hosseini SA (2018). Silicon transcriptionally regulates sulfur and ABA metabolism and delays leaf senescence in barley under combined sulfur deficiency and osmotic stress. **Environmental and Experimental Botany** 155:394-410.

Marschner H (1995). **Mineral nutrition of higher plants**. 2.ed. London: Academic Press, 889 p.

Melo SPD, Korndörfer GH, Korndörfer CM, Lana RMD, Santana DGD (2003) Silicon accumulation and water deficit tolerance in *Brachiaria* grasses. **Scientia Agricola** 60:755-759. doi: 10.1590/S0103-90162003000400022.

Neu S, Schaller J, Dudel EG (2017) Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C: N: P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Scientific Reports** 7:40829. doi:10.1038/srep40829.

Raven JA (1983) The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews** 58:179-207. doi: 10.1111/j.1469-185X.1983.tb00385.x.

Santos HG, Jacomine dos PKT, Dos Anjos LHC, De Oliveira VA, Lumbreras JF, Coelho MR, Almeida JA, Araujo Filho JC, Oliveira JB, Cunha TJF (2018) **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

Sharner DL, Boyer JS (1976) Nitrate reductase activity in maize (*Zea mays* L.) leaves 2. Regulation by nitrate flux at low leaf water potential. **Plant physiology** 58:505-509. doi: 10.1104/pp.58.4.499.

Siddiqi MY, Glass AD (1981) Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition** 4:289-302. doi: 10.1080/01904168109362919.

Taiz L, Zeiger E (2013) **Fisiologia vegetal**. Piccin.

Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira WG (2017) **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª edição revista e atualizada. Brasília, DF: EMBRAPA. 573p.

Yasari E, Yazdpoor H, Kolhar HP, Mobasser HR (2012) Effects of plant density and the application of silica on seed yield and yield components of rice (*Oryza sativa* L.). **International Journal of Biology** 4:46-53. doi: 10.5539/ijb.v4n4p46.

Yasuhara T, Nokihara K (2001) High-throughput analysis of total nitrogen content that replaces the classic Kjeldahl method. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 49:4581-4583. doi: 10.1021/jf010448z.

CAPÍTULO 4 - EFEITO DA PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE FONTES DE SILÍCIO NA PRODUÇÃO E NO TEOR DE PROTEÍNA BRUTA DA PASTAGEM

Resumo: A pulverização foliar de silício pode ser uma opção viável agronomicamente na produção de forrageiras. Com isso objetivou-se avaliar os efeitos de fontes e concentrações de Si via pulverização foliar na produção e na qualidade das forrageiras BRS Zuri (*Panicum maximum*) e BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*). Realizaram-se dois experimentos com os tratamentos arranjados em esquema fatorial (4x2), sendo quatro concentrações de Si (0; 0,25; 0,50; 0,75 g L⁻¹) e duas fontes (silicato de sódio e potássio estabilizado e silicato de potássio), dispostos em blocos inteiramente casualizado com quatro repetições. As plantas foram cultivadas em vasos preenchidos com areia lavada e aplicação de solução nutritiva. A aplicação do silício via foliar foi realizada semanalmente com o auxílio de pulverizador manual. Foram avaliados durante duas coletas o acúmulo de Si na parte aérea, número de perfilhos e folhas, área foliar, massa seca de lâmina foliar, colmo, parte aérea e acumulada, teor de nitrogênio, proteína bruta, acúmulo e eficiência de uso do nitrogênio. O acúmulo de silício, número de perfilhos, área foliar, massa seca de lâmina foliar, colmo e acumulada, teor e acúmulo de nitrogênio e a porcentagem de proteína aumentaram com a pulverização foliar de Si. Concluiu-se que é viável o uso da pulverização de silício independente da fonte, no cultivo das forrageiras devido ao incremento da produção com aumento no teor de proteína bruta.

Palavras-chave: Forrageiras, silicato de sódio, silicato de potássio, massa seca

1 INTRODUÇÃO

O silício (Si), considerado elemento benéfico às plantas, é capaz de atenuar alguns estresse que prejudicam as culturas agrícolas, mantendo o seu potencial produtivo (Savvas e Ntatsi, 2015). No entanto, os benefícios do Si às plantas estão relacionados ao seu acúmulo nos tecidos vegetais, por isso é importante conhecer a capacidade da espécie a as possíveis fontes capazes em promover maior acúmulo de Si.

As espécies vegetais variam quanto ao conteúdo de Si presente no tecido vegetal, podendo ser classificadas em função da relação molar Si:Ca, sendo que para relações acima de 1,0 as plantas são consideradas acumuladoras (Ma, Miyake e Takahashi, 2001), a exemplo das poaceas forrageiras.

O Si acumulado na folha à mantém mais ereta, aumentando a área foliar exposta à luz solar favorecendo a fotossíntese e o acúmulo de biomassa (Crusciol, 2006). Em forrageiras, os estudos com Si, concentram-se na sua aplicação via solo (Melo et al. 2003; Melo, Monteiro e Bona, 2010; Korndörfer et al. 2010). Nestas aplicações via solo as doses de Si são elevadas (em t ha⁻¹), aumentando o custos desta prática. Uma forma alternativa de fornecimento de Si seria via pulverização foliar utilizando quantidades baixas por área (em kg ha⁻¹).

Em estudo pioneiro com quatro pulverizações foliares de silício em três fontes (silicato de potássio, silicato de sódio e uma rocha silicatada) na concentração de 40 g L⁻¹ em gramíneas forrageiras (*Brachiaria decumbens* cv. Basilisk e *Panicum. maximum* cv. Mombaça) foi verificado aumento do acúmulo de Si nas plantas e da produção de massa seca (Sávio et al. 2011). É possível que o efeito do Si na produção de biomassa seja devido ao aumento do perfilhamento e consequentemente da área foliar, mas os autores não avaliaram. Neste estudo, a concentração de Si na calda foi elevada tendo risco de polimerização e diminuindo o seu potencial agrônomo. Dependendo do valor do pH e da concentração, o H₄SiO₄ se polimeriza formando dímeros, trímeros e cadeias de poliméricas de Si (McKeague e Cline, 1963) prejudicando a absorção do elemento pelas plantas. Para evitar riscos de polimerização imediata de Si, são necessárias concentrações baixas deste elemento na calda inferior a 1 g L⁻¹, pois, pode também favorecer o crescimento da forrageira tendo melhor custo/benefício desta adubação foliar.

Outro aspecto importante é a fonte de silício, sendo que a mais utilizada para pulverização foliar é o silicato de potássio sem adição de estabilizantes, havendo necessidade de mais estudos para ter novas opções de fontes deste elemento. Uma fonte alternativa de silício seria o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol, pois, este poliálcool pode aumentar a ação umectante e a persistência da gota na superfície foliar, mas ainda não há estudos sobre essa fonte.

A hipótese que surge que é possível o uso alternativo da fonte silicato de sódio e potássio estabilizado para a pulverização foliar de Si em pastagem; e que a pulverização foliar de Si, independente da fonte, em baixas concentrações, inferior a 1 g L^{-1} seja viável agronomicamente para as forrageiras BRS Zuri (*Panicum maximum*) e BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*), por aumentar a produção devido ao incremento do perfilhamento e da área foliar; e a qualidade da forrageira devido aumento do teor de proteína bruta, pois, Shedeed (2018) observaram que a pulverização foliar de Si incrementou o teor de proteína em plantas de milho.

Para isto, objetivou-se avaliar o efeito de fontes e concentrações de Si via pulverização foliar na produção e no teor de proteína bruta das forrageiras BRS Zuri (*Panicum maximum*) e BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Tratamentos e arranjo experimental

Os experimentos foram desenvolvidos em casa de vegetação na Universidade do Estado de Mato Grosso, Campus de Alta Floresta – MT, no período de dezembro de 2017 a abril de 2018. As forrageiras utilizadas foram a BRS Zuri (*Panicum maximum*) e a BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*). Os tratamentos foram arranjos em esquema fatorial (4x2) sendo quatro concentrações de Si (0; 0,25; 0,50; 0,75 g L^{-1}) e duas fontes de Si: silicato de sódio e potássio estabilizado (107 g L^{-1} de Si e 28,4 g L^{-1} de K_2O) e silicato de potássio (128 g L^{-1} de Si e 126,5 g L^{-1} de K_2O), dispostos em blocos inteiramente casualizados com quatro repetições. O K foi nivelado entre os tratamentos utilizando o cloreto de potássio.

2.2 Condução do experimento

A unidade experimental foi constituída por um vaso de polietileno com capacidade para 6 dm³, preenchido com areia lavada até completar o volume de 5,0 dm³. A areia foi peneirada utilizando uma peneira com malha de 2 mm e em seguida foi lavada com água, posteriormente com uma solução de ácido clorídrico 0,1 molar e por última água deionizada. Foram semeadas em cada vaso aproximadamente 30 sementes e, após a germinação foi realizado o desbaste, deixando cinco plantas por unidade experimental.

Os vasos continham furos e abaixo dos mesmos foram colocadas bandejas plásticas para acondicionar a solução nutritiva completa de Hoagland e Arnon (1950) modificada para Fe e Mn, utilizando-se o dobro das concentrações indicada por esses autores, conforme indicação de Cavalcante et al. (2016). A solução foi inicialmente diluída para 25% da concentração usual e aumentou para 50 e 75% de diluição aos três e seis dias, respectivamente. Aos nove dias após o desbaste, a diluição da solução nutritiva foi ajustada para 85% e mantida até o final do experimento. A solução nutritiva foi repostada todos os dias devido à perda por evapotranspiração. Para o preparo da solução foi utilizada água destilada tendo o valor pH da solução ajustado para 5,8.

2.3 Pulverização do Si via foliar

A aplicação do silício via foliar foi realizada com pulverizador manual, com capacidade de 1,5 litros, de ponta metálica regulável tipo cone. No momento da aplicação foi realizada a proteção da superfície do vaso com papel.

Realizou-se testes com apenas água deionizada para definir o volume de calda antes da pulverização com os tratamentos de forma que fosse o suficiente para cobrir a superfície da folha sem que ocorresse o escorrimento da solução.

As soluções de silicato de potássio e sódio e silicato de potássio nas concentrações de 0; 0,25; 0,50; 0,75 g L⁻¹ de Si foram preparadas com água deionizada e o pH foi ajustado para 6,9 a 7,0, com adição de solução com HCl 2 mol L⁻¹ (Zanão Junior et al. 2009). Para evitar à contaminação de Si vindo de vidraria, as soluções foram preparadas em recipientes de polipropileno.

Foram realizadas três aplicações foliares de silício aos 7, 14 e 21 dias após o corte de uniformização e três aplicações aos 7, 14 e 21 dias após a

primeira coleta. O corte de uniformização foi realizado 20 dias após o desbaste, a uma altura de 15 centímetros da superfície do solo no vaso.

As condições ambientais no interior da casa de vegetação foram registradas no momento das aplicações de Si com auxílio de termoigrômetro. Na ocasião da primeira, segunda e terceira pulverização realizadas após o corte de uniformização os valores da umidade relativa e de temperatura do ar foram 92% e 23°C, 90% e 25°C e 85% e 28°C, respectivamente. As três pulverizações foliares realizadas após a primeira coleta apresentaram valores iguais a 85% e 27°C, 90% e 23°C e 80% e 28°C para umidade relativa e temperatura do ar, respectivamente.

2.4 Coleta e análise dos dados

Foram realizadas duas coletas de biomassa da parte aérea a uma altura de 15 cm do substrato: a primeira foi realizada 30 dias após o corte de uniformização e a segunda 30 dias após a primeira coleta simulando rotação de pastejo.

Inicialmente foram contados o número de perfilhos dos vasos, após esse procedimento a biomassa foi cortada sendo separada a lâmina foliar do colmo e contados o número de folhas, e posteriormente realizada a medição de área foliar no aparelho integrador LICOR[®] LI-3000. Após a avaliação da área foliar a biomassa foi lavada em água corrente, solução detergente (0,1% v/v), solução de ácido clorídrico (0,3% v/v) e água deionizada. O material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar (65±5°C), até atingir massa constante. A soma das massas das estruturas lâmina foliar mais o colmo proporcionou a massa da parte aérea e a soma das duas coletas gerou a massa seca acumulada.

O teor de Si na parte aérea foi determinado de acordo com a metodologia descrita por Korndörfer et al. (2004). Com base no teor e na massa seca da parte aérea, calculou-se o acúmulo do elemento nas plantas.

Realizou-se a determinação do teor de N na parte aérea a partir da digestão sulfúrica, destilação e titulação utilizando a metodologia de Kjeldahl conforme método descrito por Bataglia et al. (1983), o teor de proteína bruta conforme método descrito por Yasuhara e Nokihara (2001) e o cálculo de

eficiência de uso do N pela fórmula: $(\text{massa seca da parte área})^2 / \text{acúmulo do nutriente na parte aérea}$, conforme indicação de Siddiqi e Glass (1981).

2.5 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos ao teste F ($P < 0,05$) utilizando o programa estatístico Sisvar[®] (Ferreira, 2011). O teste de Tukey com 5% de probabilidade foi utilizado para comparar as fontes de Si e a regressão polinomial para comparar as concentrações de Si via foliar.

3 RESULTADOS

3.1 Experimento 1

A pulverização de silício via foliar na forrageira BRS Zuri *Panicum maximum*, não apresentou interação entre as concentrações de silício utilizadas e as fontes nas variáveis estudadas nas duas coletas, indicando que os efeitos do silício não dependem da fonte empregada.

A pulverização de Si nas duas fontes promoveram incremento com ajuste linear no acúmulo de silício na primeira (Figura 1A) e na segunda coleta (Figura 1B).

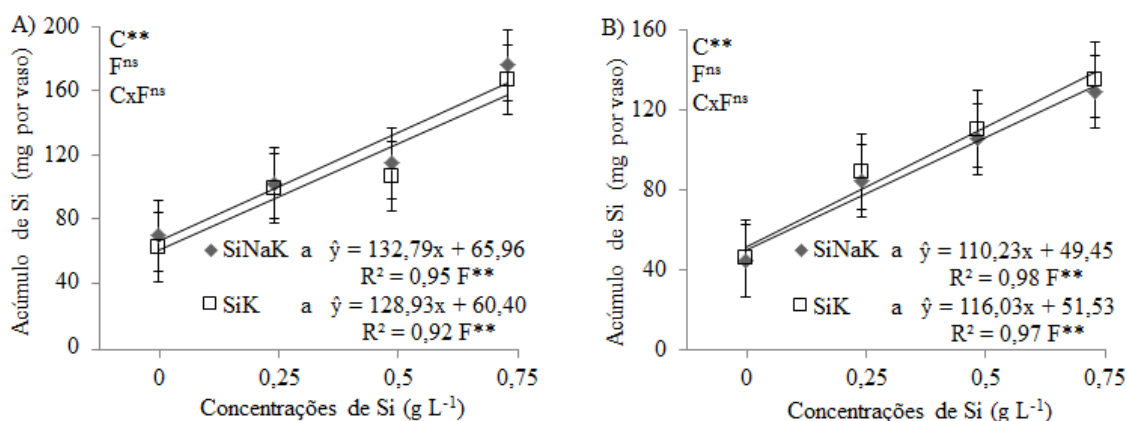


Figura 1: Acúmulo de silício (Si) da forrageira BRS Zuri (*Panicum maximum*) na primeira (A) e na segunda coleta (B) em função das concentrações de silício aplicadas via foliar (C) e nas fontes (F): silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaK) e silicato de potássio (SiK). *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre as fontes, pelo teste pelo teste F de Tukey. Max: ponto de máximo da regressão.

O número de perfilhos apresentou acréscimo com ajuste linear na primeira (Figura 2A) e na segunda coleta (Figura 2B) independente da fonte utilizada. O

mesmo efeito foi observado para o número de folhas na primeira coleta (Figura 2C). Já para a segunda coleta o ajuste foi linear quando a fonte utilizada foi o SiK e quadrático para a fonte SiNaK, no qual atingiu o ponto de máximo em 131,2 g na concentração de 0,45 g L⁻¹ de Si (Figura 2D).

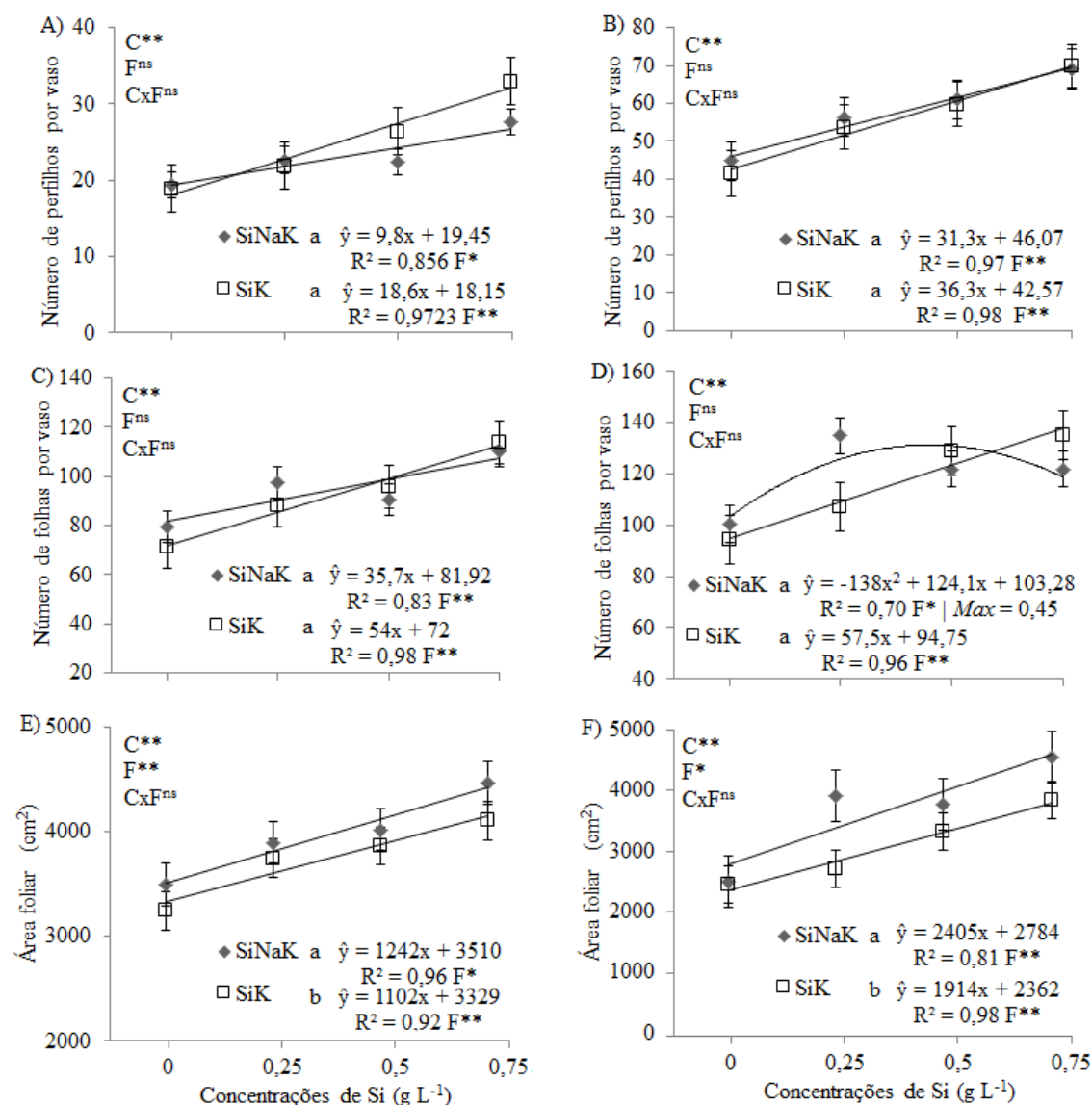


Figura 2: Número de perfilhos, número de folhas e área foliar da forrageira *Panicum maximum* cv. BRS Zuri na primeira (A, C e E) e na segunda coleta (B, D e F) em função das concentrações de silício aplicadas via foliar (C) e nas fontes (F): silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaK) e silicato de potássio (SiK). *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre as fontes, pelo teste pelo teste F de Tukey. Max: ponto de máximo da regressão.

A área foliar teve incremento linear com a pulverização de Si nas duas fontes na primeira (Figura 2E) e na segunda coleta (Figura 2F). Para essa

variável foi observado efeito da fonte sendo que o SiNaK apresentou maiores valores que o SiK em ambas as coletas (Figuras 2E e 2F).

Em relação à massa seca da lâmina foliar com a pulverização de Si foi observado, que independente da fonte houve aumento linear na primeira (Figura 3A) e na segunda coleta (Figura 3B). Já a massa seca do colmo apresentou na primeira coleta ajuste quadrático nas duas fontes (Figura 3C), atingindo o ponto máximo em 14,7 g na concentração 0,44 g L⁻¹ e 14,8 g em 0,50 g L⁻¹, nas fontes SiNaK e SiK, respectivamente. Já na segunda coleta a variável apresentou ajuste linear para as fontes utilizadas (Figura 3D).

A pulverização de Si independente das fontes promoveram incremento com ajuste quadrático na massa seca da parte aérea, com ponto de máximo em 62,3 g na concentração 0,57 g L⁻¹ quando utilizado o SiNaK e 64,9 em 0,72 g L⁻¹ para o SiK (Figura 3E). Na segunda coleta a pulverização de Si aumentou a massa seca total com ajuste linear nas duas fontes (Figura 3F). Já a massa seca acumulada apresentou incremento com ajuste linear em ambas as coletas e independente da fonte (Figura 3G).

O teor de N na parte aérea apresentou aumento com ajuste linear na primeira coleta (Figura 4A) com a pulverização de Si nas duas fontes. Já na segunda coleta a resposta em função às concentrações foi diferente entre as fontes, o SiNaK apresentou ajuste linear e o SiK o ajuste foi quadrático, com ponto de máximo em 17,93 g kg⁻¹ na concentração 0,63 g L⁻¹ (Figura 4B). Para esse parâmetro verificou-se que a fonte de silício que apresentou melhor resultado em ambas as coletas foi o SiK (Figura 4 A e 4B).

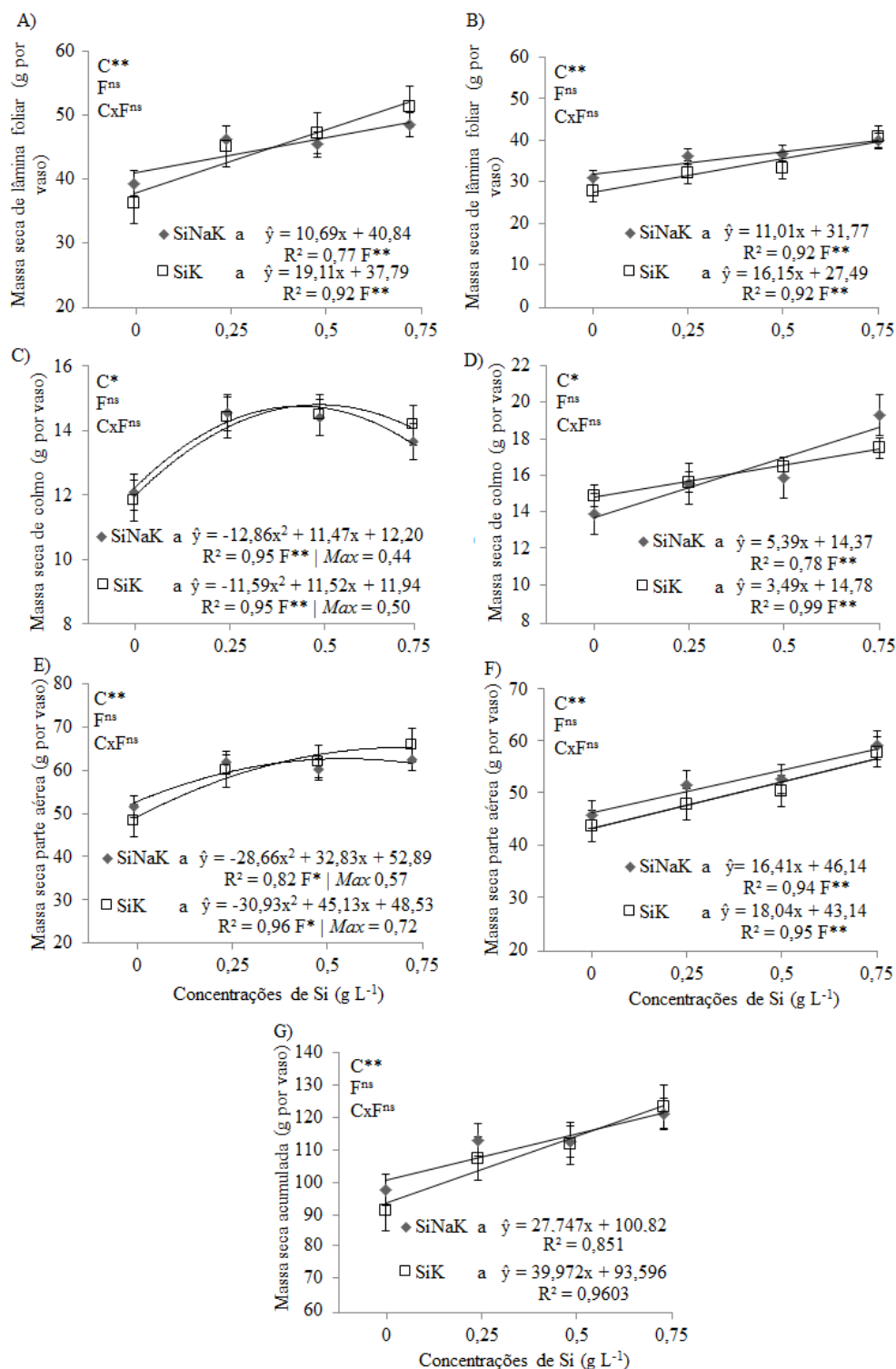


Figura 3: Massa seca lamina foliar, massa seca de colmo, massa seca parte aérea e massa seca acumulada da forrageira *Panicum maximum* cv. BRS Zuri na primeira (A, C e E) e na segunda coleta (B, D e F em função das concentrações de silício aplicadas via foliar (C) e nas fontes (F): silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaK) e silicato de potássio (SiK). *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre as fontes, pelo teste F de Tukey. Max: ponto de máximo da regressão.

A pulverização de Si nas duas fontes geraram incremento com ajuste quadrático na proteína bruta na primeira coleta (Figura 4C) com ponto de máximo em 11,50% na concentração 0,70 g L⁻¹ e 12,60% em 0,73 g L⁻¹, nas fontes SiK e SiNaK, respectivamente. Na segunda coleta o ajuste foi linear para a fonte SiNaK e quadrático para a fonte SiK apresentando o ponto de máximo na concentração 0,59 g L⁻¹ com teor de proteína de 12,99% (Figura 4D). Nas duas coletas a proteína bruta foi maior quando a fonte aplicada foi o SiK (Figura 4C e 4D).

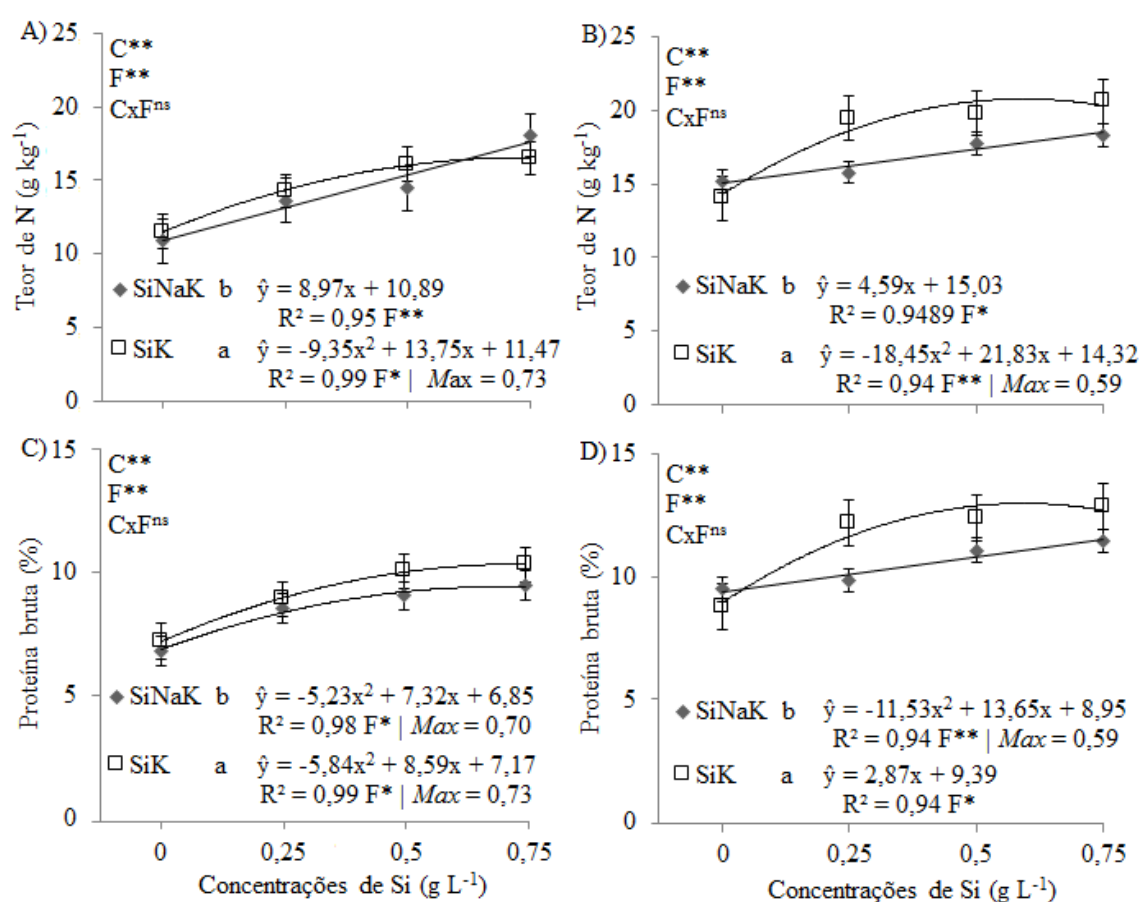


Figura 4: Teor de nitrogênio e proteína bruta (C e D) da forrageira *Panicum maximum* cv. BRS Zuri na primeira (A e C) e na segunda coleta (B e D) em função das concentrações de silício aplicadas via foliar (C) e nas fontes (F): silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaK) e silicato de potássio (SiK). *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre as fontes, pelo teste pelo teste F de Tukey. Max: ponto de máximo da regressão.

3.2 Experimento 2

Na forrageira BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*) a aplicação de Si via foliar não apresentou interação entre as concentrações de silício utilizadas e as fontes nas variáveis estudadas, indicando que os efeitos do silício independe da fonte empregada.

O acúmulo de Si apresentou aumento com ajuste linear na primeira (Figura 5A) e na segunda coleta (Figura 5B) com a pulverização de Si nas duas fontes.

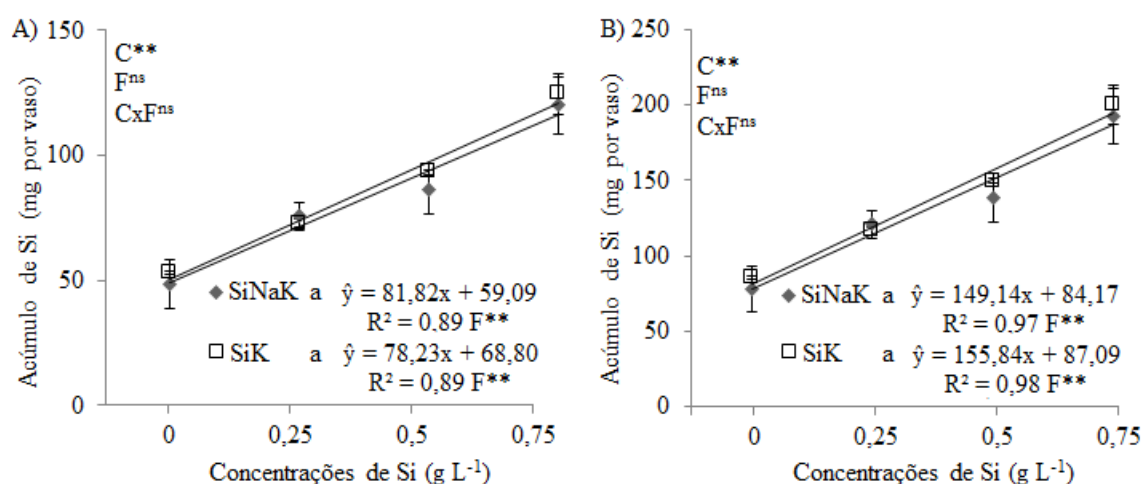


Figura 5: Acúmulo de silício (Si) da forrageira BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria Ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*) (A) e na segunda coleta (B) em função das concentrações de silício aplicadas via foliar (C) e nas fontes (F): silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaK) e silicato de potássio (SiK). *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre as fontes, pelo teste pelo teste F de Tukey. Max: ponto de máximo da regressão.

Em relação ao número de perfilhos, a pulverização silicatada independente da fonte utilizada apresentou acréscimo com ajuste linear na primeira (Figura 6A) e na segunda coleta (Figura 6B), efeito esse observado também para o número de folhas na primeira coleta (Figura 6C). Na segunda coleta o ajuste foi quadrático nas duas fontes, com ponto de máximo em 294 e 301 nas concentrações de 0,43 e 0,46 g L⁻¹ de Si, para as fontes SiNaK e SiK, respectivamente (Figura 6D).

Na área foliar a pulverização de Si promoveu incremento linear para a fonte SiNaK na primeira (Figura 6E) e segunda coleta (Figura 6F). A fonte SiK apresentou efeito quadrático na primeira coleta com ponto máximo de 5603 cm² na concentração de 0,5 g L⁻¹ de Si e na segunda coleta o aumento foi linear.

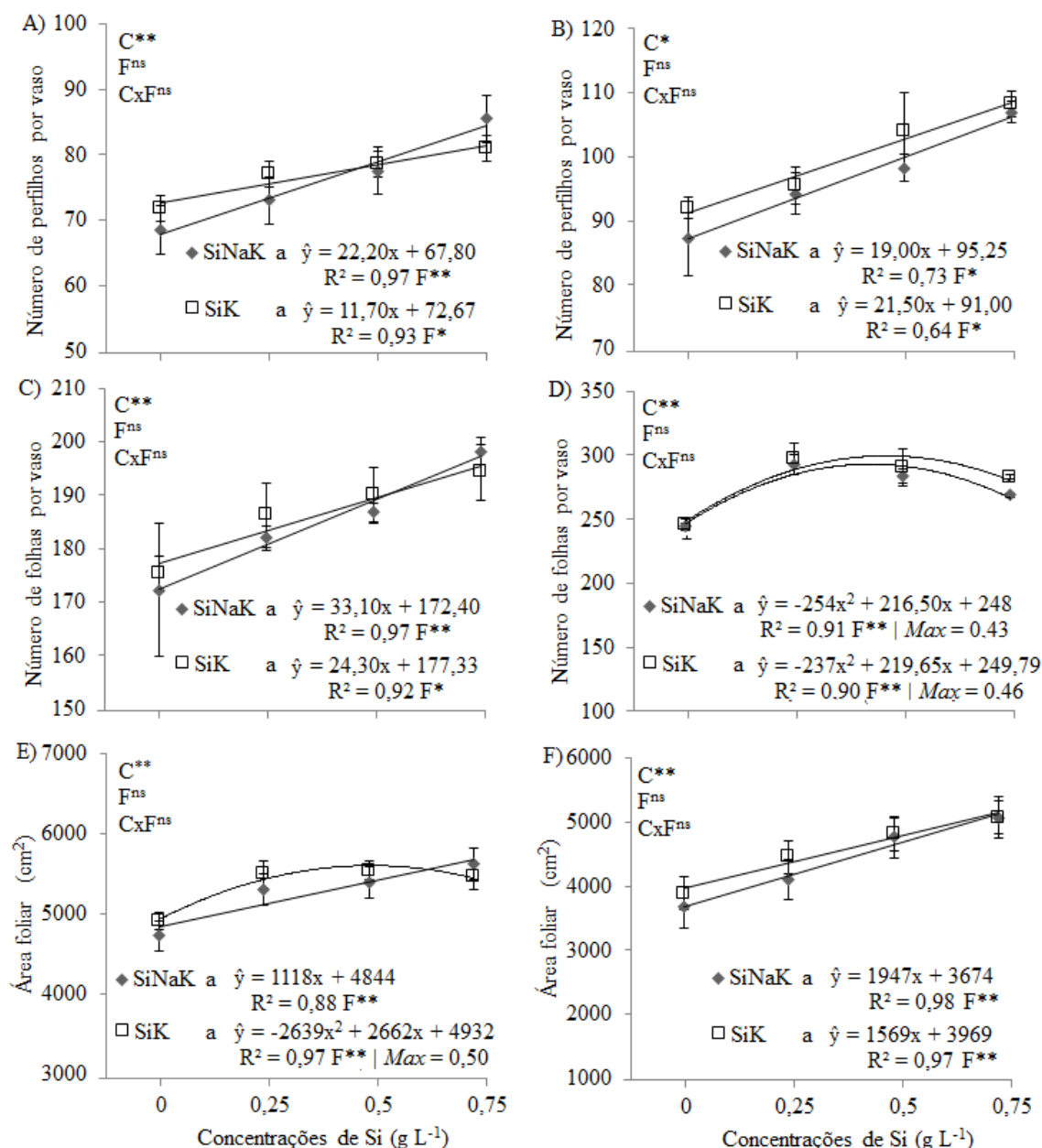


Figura 6: Número de perfilhos, número de folhas e área foliar da forrageira BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*) na primeira (A, C e E) e na segunda coleta (B, D e F) em função das concentrações de silício aplicadas via foliar (C) e nas fontes (F): silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaK) e silicato de potássio (SiK). *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre as fontes, pelo teste pelo teste F de Tukey. Max: ponto de máximo da regressão.

Em relação à massa seca de lâmina foliar a pulverização silicatada apresentou na primeira coleta (Figura 7A), ajuste quadrático independente da fonte com pontos de máximo de 41,8 e 42,9 g nas concentrações de 0,55 e 0,48 g L⁻¹, nas fontes SiNaK e SiK, respectivamente.

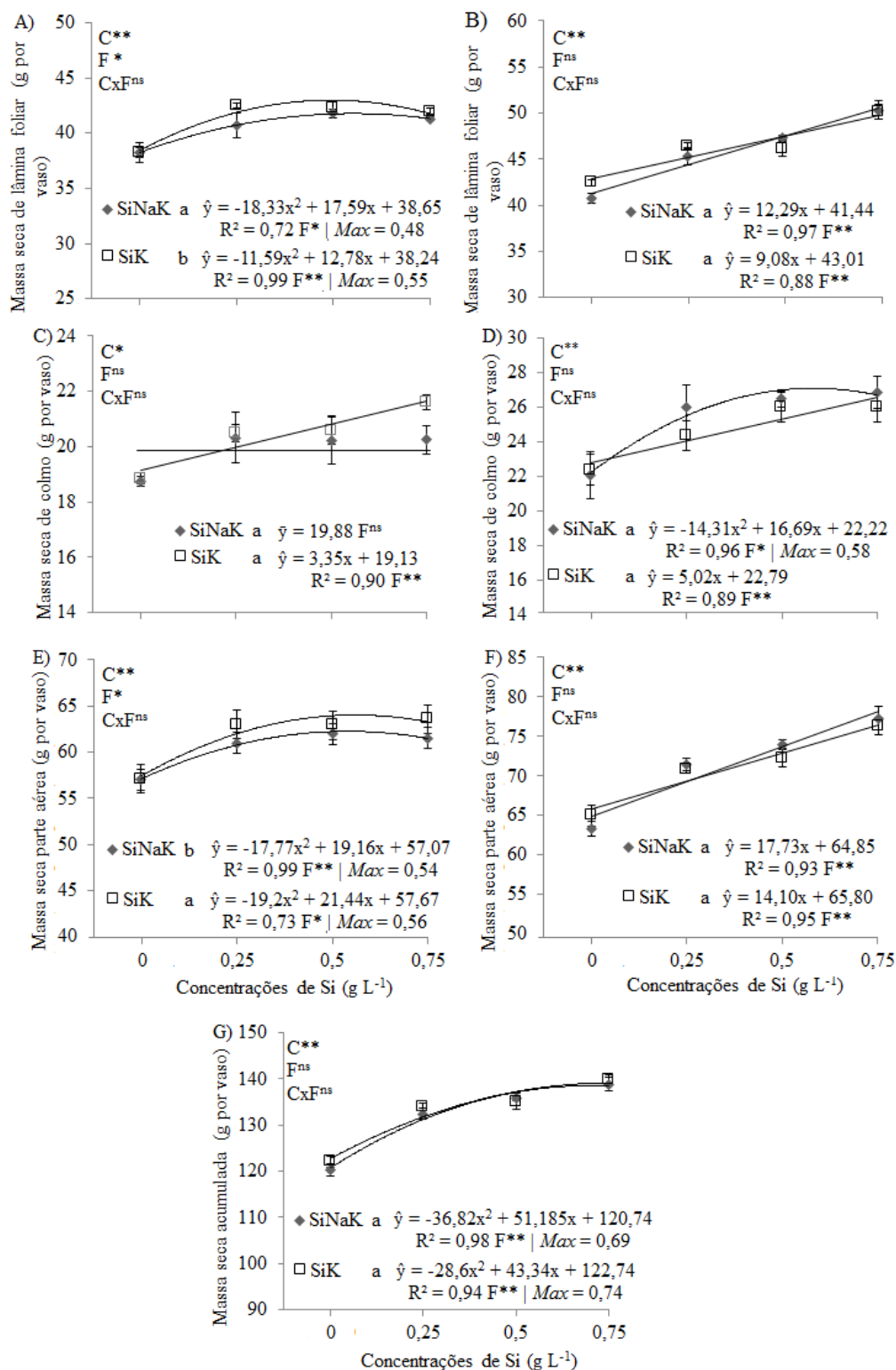


Figura 7: Massa seca lamina foliar, massa seca de colmo, massa seca total e massa seca acumulada da forrageira BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*) na primeira (A, C e E) e na segunda coleta (B, D e F) em função das concentrações de silício aplicadas via foliar (C) e nas fontes (F): silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaK) e silicato de potássio (SiK). *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre as fontes, pelo teste pelo teste F de Tukey. Max: ponto de máximo da regressão.

Na segunda coleta a massa seca de lâmina foliar apresentou ajuste linear nas duas fontes. Já a massa seca do colmo na primeira coleta (Figura 7C) não houve efeito das concentrações de Si para a fonte SiNaK, já para o SiK houve incremento com ajuste linear (Figura 7D).

Na massa seca da parte aérea a pulverização de Si independente das fontes promoveram incremento com ajuste quadrático, com pontos de máximo em 62,2 g na concentração 0,54 g L⁻¹ quando utilizado o SiNaK e 63,6 em 0,56 g L⁻¹ para o SiK (Figura 8E). Já na segunda coleta houve incremento com ajuste linear nas duas fontes (Figura 7F).

A massa seca acumulada apresentou ajuste linear quadrático independente da fonte de Si aplicado, sendo que os pontos de máximo foram de 138,5 e 139,1 nas concentrações 0,69 e 0,74 g L⁻¹, nas fontes SiNaK e SiK, respectivamente (Figura 7G).

O teor de N na parte aérea apresentou aumento com ajuste linear na primeira coleta (Figura 8A) independente da fonte de Si aplicada. Já na segunda coleta, a resposta em função das concentrações foram diferente entre as fontes, o SiNaK apresentou ajuste quadrático, com ponto de máximo em 16,10 g kg⁻¹ na concentração 0,51 g L⁻¹ (Figura 8B) e para o SiK o aumento apresentou ajuste linear.

A proteína bruta apresentou incremento linear com a aplicação de Si na primeira coleta (Figura 8C) nas duas fontes utilizadas. Na segunda coleta, o ajuste foi quadrático para a fonte SiNaK apresentando ponto de máximo de 10,0% de proteína bruta na concentração de 0,51 g L⁻¹. Já para o SiK foi constatado aumento com ajuste linear (Figura 8D).

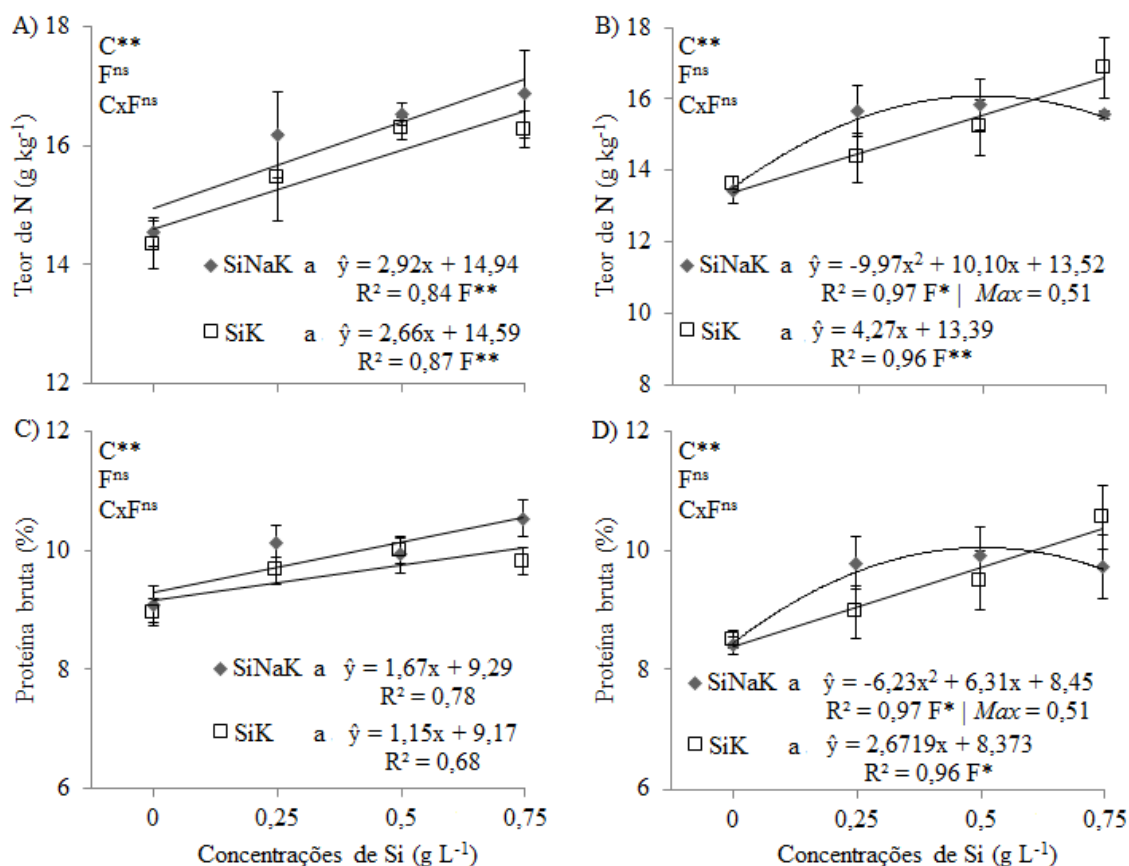


Figura 8: Teor de nitrogênio e proteína bruta (C e D) da forrageira BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria Ruziziensis* x *B. brizantha*) na primeira (A e C) e na segunda coleta (B e D) em função das concentrações de silício aplicadas via foliar (C) e nas fontes (F): silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaK) e silicato de potássio (SiK). *significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre as fontes, pelo teste pelo teste F de Tukey. Max: ponto de máximo da regressão.

4 DISCUSSÃO

As pulverizações foliares empregando as fontes SiNaK e SiK realizadas nas condições dos presente experimentos, foram suficientes para aumentar a absorção de silício nas forrageiras BRS Zuri (*Panicum maximum*) e BRS RB331 Ipyporã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*). A absorção de Si pulverizado nas folhas ocorreu devido alguns fatores que podem ser destacados como, a alta solubilidade em água das duas fontes. As condições propícias do ambiente no momento da pulverização, pois a temperatura e umidade relativa do ar estiveram abaixo de 30°C e acima de 50%, respectivamente, que favorece a absorção foliar de elementos químicos (Raetano, 2011). Soma-se a isto, o fato da realização de três pulverizações que permitiu enriquecer todas as folhas com

Si, fato importante dada a baixa mobilidade desse elemento. Agostinho et al. (2017) relataram que apenas uma pulverização foliar de Si não é suficiente para promover a função estrutural do Si que é a formação da dupla camada sílica abaixo da cutícula nas células epidérmicas das folhas em crescimento e isso só ocorre quando aumenta-se a frequência das pulverizações foliares.

O número de perfilhos nas duas forrageiras aumentou com a aplicação de silício independente da fonte utilizada (Figura 2 e 6) e isso está visível nas imagens das plantas (Figura 9). Resultados semelhantes foram relatados em pastagem (Melo, 2005), arroz (Ahmed et al. 2019; Agostinho et al. 2017; Dorairaj et al. 2017), cana-de-açúcar (Prado e Fernandes, 2001) e trigo (Ali, 2012).

As pulverizações foliares de Si com as duas fontes ao aumentar a sua absorção favoreceram o incremento do número de perfilhos das forrageiras nas duas coletas (Figuras 2 e 6A,B) e refletiram no incremento do número de folhas (Figuras 2 e 6C,D) e conseqüentemente na área foliar (Figuras 2 e 6E,F) e na produção de massa seca da parte aérea e a da massa seca acumulada (Figuras 3 e 7G). Este efeito benéfico do Si foliar no aumento da massa seca foi também relatado em pastagem por Melo et al. 2010 e Sávio et al. 2011. O efeito do Si no incremento da área foliar deve ter recebido contribuição da maior exposição à luz solar associada ao aumento do teor de clorofila dada maior coloração verde das plantas que é notada visualmente nas forrageiras (Figura 9).

A tonalidade mais verde das folhas que receberam o Si ocorreu dado o incremento do teor de N nas duas forrageiras em ambas as coletas. Esse fato pode ter ocorrido pelo efeito do Si no aumento da eficiência fotoquímica do PSII (Al-aghabary, Zhu e Shi, 2005) e da taxa de fotossíntese (Souza Ferraz et al. 2014; Viciado et al., 2019) produzindo energia, importante para favorecer a atividade dos carregadores responsáveis pela absorção do N. Este fato resultou em incremento de produção de massa seca e também na qualidade da forrageira dado aumento do teor de proteínas com emprego das pulverizações foliares de Si (Figuras 4 e 8C,D). Fato semelhante ocorreu com Joudmand e Hajiboland (2019) na cultura da cevada que recebeu Si via solução nutritiva na concentração de 2 mmol L⁻¹.

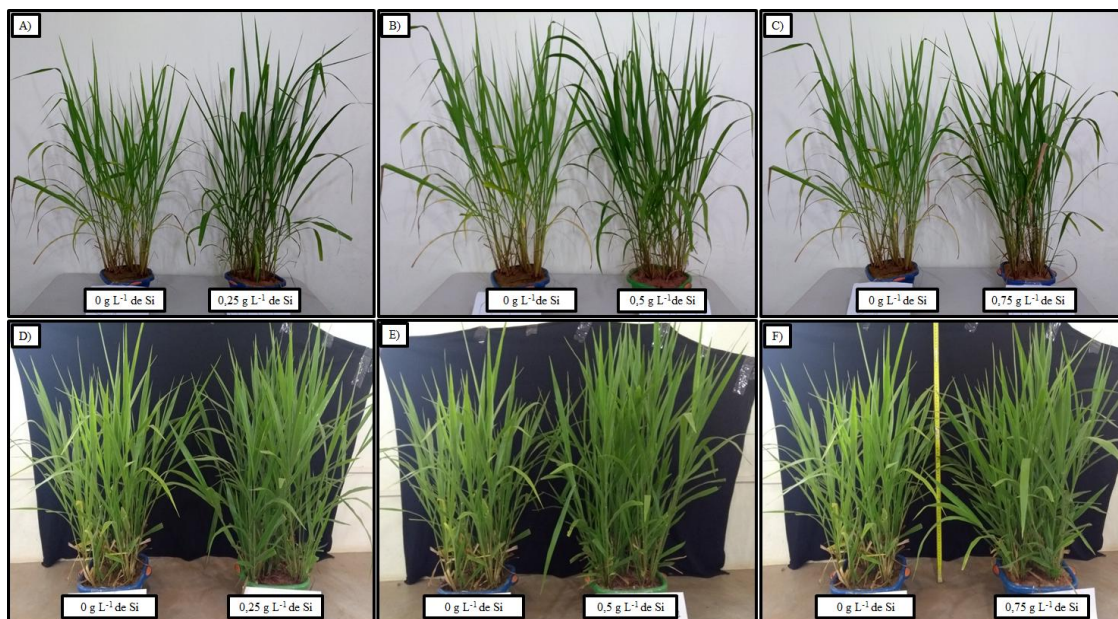


Figura 9: Forrageira BRS Zuri (*Panicum maximum*) cultivada com solução nutritiva em função das concentrações de silício aplicadas via foliar (A, B e C) e forrageira BRS RB331 Ipyorã (híbrido *Brachiaria ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*) cultivada em solução nutritiva completa em função das concentrações de silício aplicadas via foliar (C, D e E).

5 CONCLUSÕES

A aplicação foliar de Si nas duas fontes promovem aumento da produção das forrageiras BRS Zuri (*Panicum maximum*) e BRS RB331 Ipyorã (híbrido *Brachiaria Ruziziensis* x *Brachiaria brizantha*), devido ao aumento do perfilhamento, da área foliar e da qualidade pelo aumento do teor de proteína bruta.

6 REFERÊNCIAS

- Agostinho F, Tubana B, Martins M, Datnoff L (2017) Effect of different silicon sources on yield and silicon uptake of rice grown under varying phosphorus rates. **Plants** 6: 35. doi: 10.3390/plants6030035.
- Ahmed N, Murtaza M, Ali MA, Hussain MB, Mahmood S, Qazi MA, Haider Z (2019). Silicon Improves rice nutrition and productivity under salinity. **Pakistan Journal of Botany** 51:837-843. doi: 10.30848/PJB2019-3(6).
- Al-aghabary K, Zhu Z, Shi Q (2005) Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. **Journal of Plant Nutrition** 27:2101-2115. doi: 10.1081/LPLA-200034641.
- Ali A, Basra SM, Hussain S, Iqbal J (2012) Increased growth and changes in wheat mineral composition through calcium silicate fertilization under normal and saline field conditions. **Chilean Journal of Agricultural Research** 72:98-103. doi:10.4067/s0718-58392012000100016.
- Bataglia OC, Teixeira JPF, Furlani PR, Furlani AMC, Gallo JR (1983) Métodos de análise química de plantas. Instituto Agronômico de Campinas - **Boletim técnico** 78. Campinas, Brasil, 48 p.
- Cavalcante VS, Prado RDM, Vasconcelos RDL, Campos CNS (2016) Iron concentrations in sugar cane (*Saccharum officinarum* L.) cultivated in nutrient solution. **Agrociencia** 50:867-875. Acessado em 20 de Junho de 2019. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30248292007>.
- Crusciol C (2006) Silício para as gramíneas forrageiras. **Revista Campo e Negócios** 4:14-15.
- Dorairaj D, Ismail MR, Sinniah UR, Kar Ban T (2017). Influence of silicon on growth, yield, and lodging resistance of MR219, a lowland rice of Malaysia. **Journal of Plant Nutrition** 40:1111-1124. doi: 10.1080/01904167.2016.1264420.
- Souza Ferraz RLD, Macedo Beltrao NED, Melo ASD, Magalhaes ID, Fernandes PD, e Rocha MDS. 2014. Trocas gasosas e eficiência fotoquímica de cultivares de algodoeiro herbáceo sob aplicação de silício foliar. **Semina-ciencias Agrarias** 35:735-748. doi: 10.5433/1679-0359.2014v35n2p735.
- Ferreira DF (2011) Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e agrotecnologia** 35:1039-1042. doi: 10.1590/S1413-70542011000600001.
- Hoagland DR, Arnon DI (1950) **The water-culture method for growing plants without soil**. Circular. California agricultural experiment station, 347(2nd edit). 396.

Joudmand A, Hajiboland R (2019) Silicon mitigates cold stress in barley plants via modifying the activity of apoplasmic enzymes and concentration of metabolites. **Acta Physiologiae Plantarum** 41:29. doi: 10.1007/S11738-019-2817-X.

Korndörfer GH (2004) **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia.

Korndörfer PH, Silva GCD, Teixeira IRT, Silva AGD, Freitas RSD (2010) Efeito da adubação silicatada sobre gramíneas forrageiras e características químicas do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 40:119-125. doi: 10.5216/pat.v40i2.3922.

Ma JF, Miyake Y, Takahashi E (2001) Silicon as a beneficial element for crop plants. **In Studies in Plant Science** 8(1): 17-39. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80006-9](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80006-9)

McKeague JA, Cline MG (1963). Silica in soils. **In Advances in Agronomy** 15:339-396. doi: 10.1016/S0065-2113(08)60403-4.

Melo SPD (2005). **Silício e fósforo para estabelecimento do capim-Marandu num Latossolo Vermelho-Amarelo**. (Tese Doutorado, Universidade de São Paulo). Acessado em 22 de junho de 2019. <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-05072005-143221/pt-br.php>.

Melo SPD, Korndörfer GH, Korndörfer CM, Lana RMQ, Santana DGD (2003). Silicon accumulation and water deficit tolerance in *Brachiaria* grasses. **Scientia Agricola** 60:755-759. doi: 10.1590/S0103-90162003000400022.

Melo SPD, Monteiro FA, Bona FDD (2010) Silicon distribution and accumulation in shoot tissue of the tropical forage grass *Brachiaria brizantha*. **Plant and Soil** 336:241-249. doi: 10.1007/s11104-010-0472-5.

Prado RDM, Fernandes FM (2001) Resposta da cana-de-açúcar à aplicação da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 25:199-207. doi: 10.1590/S0100-06832001000100021.

Raetano CG (2011). **Introdução ao estudo da tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários**. Tecnologia de aplicação para culturas anuais. Passo Fundo: Aldeia Norte, p. 15-26, 2011.

Sávio FL, Carneiro Da Silva G, Teixeira IR, Borém A (2011) Produção de biomassa e conteúdo de silício em gramíneas forrageiras sob diferentes fontes de silicato. **Semina: Ciências Agrárias** 32:103-110. doi: 10.5433/1679-0359.2011v32n1p103.

Savvas D, Ntatsi G (2015) Biostimulant activity of silicon in horticulture. **Scientia Horticulturae**. 196:66–81. doi: 10.1016/j.scienta.2015.09.010.

Shedeed SI (2018) Assessing effect of potassium silicate consecutive application on forage maize plants (*Zea mays* L.). **Journal of Innovations in Pharmaceutical and Biological Sciences** 5:119-127.

Siddiqi MY, Glass AD (1981) Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition** 4:289-302. doi: 10.1080/01904168109362919.

Viciedo DO, Prado RDM, Toledo RL, Dos Santos LCN, Hurtado CA, Nedd LLT, Gonzalez LC (2019) Silicon Supplementation Alleviates Ammonium Toxicity in Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.). **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 1-7. doi: 10.1007/s42729-019-00043-w.

Yasuhara T, Nokihara K (2001) High-throughput analysis of total nitrogen content that replaces the classic Kjeldahl method. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 49:4581-4583. doi: 10.1021/jf010448z.

Zanao Junior LA, Rodrigues FA, Fontes RLF, Korndörfer GH, Neves JCL (2009) Rice resistance to brown spot mediated by silicon and its interaction with manganese. **Journal of Phytopathology** 157(2): 73-78. doi: 10.1111/j.1439-0434.2008.01447.x.