



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

GERSON DIEGO PAMPLONA ALBUQUERQUE

**SILÍCIO COMO MITIGADOR DA TOXICIDADE DE ZINCO EM PLANTAS
JOVENS DE *Schizolobium amazonicum* HUBER EX DUCKE**

**BELÉM
2020**

GERSON DIEGO PAMPLONA ALBUQUERQUE

SILÍCIO COMO MITIGADOR DA TOXICIDADE DE ZINCO EM PLANTAS
JOVENS DE *Schizolobium amazonicum* HUBER EX DUCKE

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de doutor.

Área de concentração: Agronomia

Orientador: Prof. Dr. Mário Lopes da Silva Júnior

BELÉM
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A345s Albuquerque, Gerson Diego Pamplona

Silício como mitigador da toxicidade de zinco em plantas jovens de *Schizolobium amazonicum*
Huber ex Ducke / Gerson Diego Pamplona Albuquerque. - 2020.
65 f. : il.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA), Campus
Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2020.
Orientador: Prof. Dr. Mario Lopes da Silva Junior

1. Elemento benéfico. 2. Fitorremediação. 3. Metal pesado. 4. Paricá.. I. Silva Junior, Mario
Lopes da, *orient.* II. Título

GERSON DIEGO PAMPLONA ALBUQUERQUE

**SILÍCIO COMO MITIGADOR DA TOXICIDADE DE ZINCO EM PLANTAS
JOVENS DE *Schizolobium amazonicum* HUBER EX DUCKE**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de doutor.
Área de concentração: Agronomia

30 de fevereiro de 2020
DATA DA APROVAÇÃO

Banca Examinadora

M. Junior
Dr. Mário Lopes da Silva Júnior - Orientador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA

Luma Castro de Souza
Dra. Luma Castro de Souza - 1º Examinador
PREFEITURA MUNICIPAL DE CAPITÃO POÇO

Glauco André dos Santos Nogueira
Dr. Glauco André dos Santos Nogueira - 2º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA

Waldemar Viana de Andrade Júnior
Dr. Waldemar Viana de Andrade Júnior - 3º Examinador
SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE - SEMAS

Hellen Sílvia Demétrio Barros
Dra. Hellen Sílvia Demétrio Barros - 4º Examinador
SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL - SENAR

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me conceder a vida, saúde, paz, proteção, sabedoria, por toda a força concedida diante das dificuldades e por todas as vitórias alcançadas.

À Universidade Federal Rural da Amazônia, pela formação profissional e a oportunidade de realizar o curso de Doutorado em Agronomia;

Ao Programa de Pós-graduação em Agronomia, pela oportunidade concedida.

Ao Instituto Ciberespacial da UFRA por ter permitido que eu desenvolvesse a tese.

Ao Professor Dr. Mário Lopes da Silva Junior pela amizade, orientação, ensinamentos e conhecimentos repassados.

Ao Professor Dr. Cândido Ferreira de Oliveira Neto pela amizade, acolhimento, incentivo, atenção e contribuição para a realização deste trabalho

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia pelos ensinamentos transmitidos durante o curso.

Ao Grupo de Pesquisa Estudos da Biodiversidade de Plantas Superiores (EBPS - UFRA), onde pude desenvolver as pesquisas com todo apoio necessário.

Aos amigos Ana Ecídia, Vitor Resende, Andressa Paiva, Jéssica Suellen, Myriam Neves, Glauco Nogueira, Luciana Sousa, Diana Julia e Juscelino palheta, pela ajuda e companheirismo nas etapas deste trabalho, pela amizade, pela agradável convivência, por dividirem comigo todos os momentos de dificuldade durante a execução do experimento e por me incentivar e ensinar através de suas experiências e competências. Pelos bons momentos de descontração e por toda atenção e carinho a mim dispensado.

Aos meus pais, Laurimar da Silva Albuquerque (*in memoriam*) e Edna Maria Pamplona Albuquerque, pelos os seus sacrifícios, incentivos, apoio incondicional para me manter em meus estudos e por estarem sempre comigo. Muito obrigado pela força e por acreditarem em meu crescimento profissional.

À minha noiva, Helaine Cristine Gonçalves Pires, por todo amor, carinho, força, paciência, companheirismo e compreensão ao longo desta jornada.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

O zinco é um elemento essencial às plantas, entretanto, em excesso pode ser tóxico ao vegetal. A fitorremediação de solo contaminado por Zn é eficaz para reduzir os efeitos tóxicos desse metal ao meio ambiente. Por isso, necessita-se identificar espécies tolerantes a essas condições. O *Schizolobium amazonicum* é uma espécie arbórea nativa da Amazônia utilizada na recuperação de áreas degradadas. O silício é um elemento benéfico que aumenta a tolerância da planta à estresses bióticos e abióticos. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos do silício no crescimento, no estado nutricional e na fisiologia de plantas jovens de *S. amazonicum* submetidas à níveis tóxicos de zinco. Utilizou-se um delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial 4 x 2, com quatro concentrações de zinco (1, 150, 300 e 600 μM) e duas concentrações de silício (0 e 1.5 mM) com cinco repetições por 30 dias. Avaliou-se o estado nutricional, o crescimento, a fluorescência da clorofila *a*, as trocas gasosas e o teor de pigmentos fotossintéticos nas mudas. Os resultados mostraram que os elevados níveis de zinco reduziram o crescimento vegetal, a absorção de nutrientes avaliados e a fotossíntese, com efeitos principalmente associados à limitação fotoquímica e à redução na capacidade de fixação de CO_2 no mesófilo, contudo, a aplicação de Si atenuou esse efeito. O *S. Amazonicum* apresentou baixa translocação e tolerância moderada e alta às concentrações de Zn indicando que esta espécie pode ser utilizada como fitoestabilizadora desse metal.

Palavras-chave: Elemento benéfico. Fitorremediação. Metal pesado. Paricá.

ABSTRACT

Zinc is an essential element for plants, however, in excess it can be toxic to plants. Phytoremediation of soil contaminated by Zn is effective in reducing the toxic effects of this metal on the environment. Therefore, it is necessary to identify species tolerant to these conditions. *Schizolobium amazonicum* is a tree species native to the Amazon used to recover degraded areas. Silicon is a beneficial element that increases the plant's tolerance to biotic and abiotic stresses. Therefore, the objective of this work was to evaluate the effects of silicon on growth, nutritional status and physiology of young plants of *S. amazonicum* submitted to toxic levels of zinc. A randomized block design was used in a 4 x 2 factorial scheme, with four concentrations of zinc (1, 150, 300 and 600 μM) and two concentrations of silicon (0 and 1.5 mM) with five repetitions for 30 days. Nutritional status, growth, chlorophyll a fluorescence, gas exchange and photosynthetic pigment content in seedlings were evaluated. The results showed that the high levels of zinc reduced plant growth, the absorption of evaluated nutrients and photosynthesis, with effects mainly associated with the photochemical limitation and the reduction in the capacity of CO_2 fixation in the mesophyll, however, the application of Si attenuated this. *S. Amazonicum* showed low translocation and moderate and high tolerance to Zn concentrations, indicating that this species can be used as a phytostabilizer of this metal.

Keywords: Beneficial element. Phytoremediation. Heavy metal. Paricá.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Número de folíolos (NF), área foliar (AF), altura da parte aérea (AP), diâmetro do colo (DC) e relação entre altura da parte aérea e diâmetro do colo (H/D) de plantas de *S. amazonicum* tratadas com Si e expostas à toxicidade de Zn 31
- Tabela 2. Matéria seca radicular (MSR), matéria da parte aérea (MSPA), matéria seca total (MST) e relação entre a matéria seca radicular e a matéria seca da parte aérea (R/PA) de plantas de *S. amazonicum* tratadas com Si e expostas à toxicidade de Zn 31
- Tabela 3. Teores de Zn e Si em plantas de *S. amazonicum* tratadas com Si e expostas à toxicidade de Zn 32
- Tabela 4. Teores de nutrientes em plantas de *S. amazonicum* tratadas com Si e expostas à toxicidade de Zn 35
- Tabela 5. Fator de bioconcentração (FBC), fator de translocação (FT) e índice de tolerância (IT) de plantas de *S. amazonicum* tratadas com Si e expostas à toxicidade de Zn 37

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - (a) Taxa de assimilação líquida de CO₂ (P_N), (b) condutância estomática (g_s), (c) concentração intercelular de CO₂ (C_i), (d) transpiração foliar (E), (e) eficiência do uso da água (WUE) e (f) eficiência instantânea de carboxilação (P_N/C_i) em plantas de *S. amazonicum* tratadas com Si e expostas à toxicidade de Zn. Letras maiúsculas diferentes entre tratamentos de Si (0 e 1.5 mM Si sob mesma concentração de Zn) e letras minúsculas entre tratamentos de Zn (1, 150, 300 e 600 μM Zn sob mesma concentração de Si) indicam diferenças significativas pelo teste de Scott-Knott ($P < 0.05$). Colunas descritas correspondem à médias de cinco repetições e DP. 62
- Figura 2 - (a) Eficiência fotoquímica máxima do PSII (F_v/F_m), (b) eficiência fotoquímica efetiva do PSII (F_v'/F_m'), (c) coeficiente de extinção fotoquímico (q_p), (d) coeficiente de extinção não-fotoquímico (NPQ), (e) rendimento quântico do PSII (Φ_{PSII}) e (f) taxa de transporte de elétrons (ETR) em plantas de *S. amazonicum* tratadas com Si e expostas à toxicidade de Zn. Letras maiúsculas diferentes entre tratamentos de Si (0 e 1.5 mM Si sob mesma concentração de Zn) e letras minúsculas entre tratamentos de Zn (1, 150, 300 e 600 μM Zn sob mesma concentração de Si) indicam diferenças significativas pelo teste de Scott-Knott ($P < 0.05$). Colunas descritas correspondem à médias de cinco repetições e DP. 63
- Figura 3 - (a) Clorofila *a* (CHL *a*), (b) clorofila *b* (CHL *b*), (c) clorofila total (CHL Total), (d) relação entre as clorofilas *a* e *b* (CHL *a*/CHL *b*), (e) Carotenóides (CAR) e (f) relação entre clorofila total e carotenóides (CHL Total/CAR) em plantas de *S. amazonicum* tratadas com Si e expostas à toxicidade de Zn. Letras maiúsculas diferentes entre tratamentos de Si (0 e 1.5 mM Si sob mesma concentração de Zn) e letras minúsculas entre tratamentos de Zn (1, 150, 300 e 600 μM Zn sob mesma concentração de Si) indicam diferenças significativas pelo teste de Scott-Knott ($P < 0.05$). Colunas descritas correspondem à médias de cinco repetições e DP. 64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AF – Área foliar
- AP – Altura da planta
- CAR - Carotenóides
- CHL *a*/ CHL *b* - Relação entre as clorofilas *a* e *b*
- CHL Total - Clorofila total
- CHL Total/CAR - Relação entre clorofila total e carotenóides
- CHL *a* – Clorofila *a*
- CHL *b* – Clorofila *b*
- C_i - Concentração intercelular de CO₂
- DC – Diâmetro do colo
- DNA - Ácido desoxirribonucleico
- DP – Desvio-padrão
- E* - Transpiração foliar
- ETR* - Taxa de transporte de elétrons
- F'0* - Fluorescência inicial adaptada à luz
- F'm* - Fluorescência máxima adaptada à luz
- $F'v/F'm$ - Eficiência fotoquímica efetiva do PSII
- F0* - Fluorescência inicial
- FBC - Fator de bioconcentração
- Fm* - Fluorescência máxima
- FT - Fator de translocação
- Fv/Fm - Eficiência fotoquímica máxima do PSII
- g_s - Condutância estomática
- H/D - Relação entre altura da parte aérea e diâmetro do colo
- IT - Índice de tolerância
- MF – Matéria fresca
- MS – Matéria seca
- MSPA – Matéria seca da parte aérea
- MSR – Matéria seca da raiz
- MST – Matéria seca total
- NADPH - Fosfato de dinucleótido de nicotinamida e adenina
- NF – Número de folíolos

NPQ - Coeficiente de extinção não-fotoquímico

PAR - Radiação fotossinteticamente ativa

P_N - Taxa de assimilação líquida de CO₂

P_N/C_i - Eficiência instantânea de carboxilação

PPFD - Densidade do fluxo de fótons fotossintéticos

PSI – Fotossistema I

PSII – Fotossistema II

Qa - Receptor primário de plastoquinona

Qb - Receptor secundário de plastoquinona

qP - coeficiente de extinção fotoquímico

R/PA - Relação entre a matéria seca radicular e a matéria seca da parte aérea

RNA - Ácido ribonucleico

RuBisCO - Ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase oxigenase

WUE - Eficiência do uso da água

Φ_{PSII} - Rendimento quântico real do transporte de elétrons do PSII

SUMÁRIO

1. CONTEXTUALIZAÇÃO	12
REFERÊNCIAS	18
2. EFEITO DO SILÍCIO NO CRESCIMENTO E NO ESTADO NUTRICIONAL DE MUDAS DE <i>Schizolobium amazonicum</i> HUBER EX DUCKE SUBMETIDAS À TOXICIDADE DE ZINCO*	24
Resumo	24
Abstract	25
2.1. Introdução	26
2.2. Material e métodos	27
2.2.1 Localização do experimento	27
2.2.2 Material vegetal e condições de crescimento	27
2.2.3 Delineamento experimental e avaliação dos tratamentos	28
2.2.4 Medições dos parâmetros morfológicos e acúmulo de biomassa	28
2.2.5 Determinação dos teores de nutrientes	29
2.2.6 Extração e determinação do silício	29
2.2.7 Fator de bioconcentração, fator de translocação e índice de tolerância	29
2.2.8 Análise dos dados	30
2.3. Resultados e discussão	30
2.3.1 Parâmetros morfológicos e acúmulo de biomassa	30
2.3.2 Teores de zinco e silício nos tecidos	32
2.3.3 Efeito do silício e do zinco na concentração de macro e micronutrientes	33
2.3.4 Fator de bioconcentração, fator de translocação e índice de tolerância	36
2.4. Conclusão	39
2.5. Referências	40
3. O SILÍCIO DIMINUI OS EFEITOS NEGATIVOS DO EXCESSO DE ZINCO NAS TROCAS GASOSAS E NA FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA A EM PLANTAS JOVENS DE <i>Schizolobium amazonicum</i>	45
Resumo	45
Abstract	46
3.1 Introdução	47
3.2 Material e métodos	48
3.2.1 Local do experimento	48

3.2.2 Material vegetal e condições de crescimento	48
3.2.3 Tratamentos com zinco e silício e delineamento experimental	49
3.2.4 Medição das trocas gasosas	49
3.2.5 Medição da fluorescência da clorofila <i>a</i>	50
3.2.6 Determinação dos pigmentos fotossintéticos	50
3.2.7 Análise dos dados	51
3.3 Resultados	51
3.3.1 Si melhora as trocas gasosas nas plantas afetadas pelo Zn.....	51
3.3.2 Si melhora a fluorescência da clorofila <i>a</i> em plantas submetidas à toxicidade por Zn...	51
3.3.3 Si aumenta o teor de pigmentos fotossintéticos em plantas expostas ao estresse por Zn	52
3.4 Discussão	52
3.5 Conclusão	56
3.6 Referências	57
CONCLUSÕES GERAIS	65

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

As perturbações antropogênicas da biosfera provocadas por vários fenômenos globais, incluindo a acelerada taxa de industrialização, a agricultura intensiva e a mineração extensiva, acompanhadas do crescimento populacional e da rápida urbanização, não só causam a destruição dos recursos naturais, como também a contaminação generalizada de componentes essenciais à vida no planeta (EMAMVERDIAN et al., 2015). Dentre as consequências das alterações induzidas pelo homem nos ciclos biogeoquímicos naturais, o acúmulo acentuado de metais pesados tem sido um problema de suma importância por razões ecológicas, nutricionais e ambientais (ALI; KHAN; SAJAD, 2013; NAGAJYOTI; LEE; SREEKANTH, 2010).

Os metais pesados pertencem ao grupo dos constituintes químicos inorgânicos não biodegradáveis e persistentes que apresentam massa atômica acima de 23 g e densidade superior a $5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, que causam efeitos citotóxicos, genotóxicos e mutagênicos em humanos, animais e plantas através da contaminação de cadeias alimentares, do solo, da água potável, de aquíferos e da atmosfera circundante (CIRIAKOVÁ, 2009; FLORA; MITTAL; MEHTA, 2008; RASCIO; NAVARI-IZZO, 2011; WUANA; OKIEIMEN, 2011).

Existem três tipos de metais pesados encontrados no solo: Os que são referidos como elementos essenciais para o crescimento normal das plantas (Fe, Mn, Zn, Cu, Mg, Mo e Ni), os benéficos aos vegetais (Co) e os que não apresentam função biológica e fisiológica (Cd, Cr, Pb, Ag e Hg) (RASCIO; NAVARI-IZZO, 2011; SCHUTZENDUBEL; POLLE, 2002; TANGAHU et al., 2011; ZHOU et al., 2014). Esses minerais podem ser absorvidos tanto pela parte aérea quanto pelas raízes das plantas (PATRA et al., 2004).

Os metais pesados classificados como elementos essenciais são importantes para estrutura de enzimas e proteínas, pois as plantas necessitam deles para o seu crescimento, metabolismo e desenvolvimento, no entanto, altas concentrações desses nutrientes podem levar à redução e inibição do crescimento vegetal (ZENGIN; MUNZUROGLU, 2005). Os metais pesados em níveis tóxicos dificultam o funcionamento normal da planta, impedem processos metabólicos, substituem ou interrompem a função de nutrientes em biomoléculas como pigmentos ou enzimas (ALI; KHAN; SAJAD, 2013) e afetam negativamente a integridade da membrana citoplasmática (FARID et al., 2013), causando a inibição de mecanismos vitais às plantas, como por exemplo, a fotossíntese, a respiração e atividades enzimáticas (HOSSAIN et al., 2012).

O zinco, cuja densidade é 7.14 g cm^{-3} , massa atômica 65.38 g e número atômico 30, é um elemento essencial que está envolvido em muitos eventos fisiológicos vitais aos vegetais (SAGARDOY et al., 2009). Ele é componente indispensável de proteínas especiais conhecidas

como dedos de zinco que se ligam ao DNA e ao RNA e contribui para sua regulação e estabilização (GUPTA et al., 2012). Além disso, é um constituinte da metaloenzima ou cofator de várias enzimas, como anidrases, desidrogenases, oxidases e peroxidases (MOUSAVI; GALAVI; REZAEI, 2013), e desempenha um papel importante na regulação do metabolismo de nitrogênio, na multiplicação celular, na fotossíntese e na síntese da auxina, dos ácidos nucleicos e das proteínas em plantas (KLECKEROVA et al., 2011).

O estado divalente (Zn^{2+}) é a forma mais difusa encontrada no solo e adquirida pelas plantas (BUCHER; SCHENK, 2000). A biodisponibilidade de Zn depende de várias variáveis, incluindo a concentração total de Zn no solo, os teores de calcário e matéria orgânica do solo, tipo de argila, presença de outros metais pesados, pH do solo e quantidade de sais no substrato (AREF, 2011; BUCHER; SCHENK, 2000). Destes, o pH é o fator mais importante que influencia a disponibilidade de Zn (BROADLEY et al., 2007), pois meios básicos estão geralmente associados à absorção reduzida de zinco pelas plantas (AREF, 2011).

O Zn pode estar presente em resíduos ou rejeitos antrópicos produzidos em alta quantidade (SILVA et al., 2018), como os descartes de equipamentos eletrônicos (MOUSAVI; GALAVI; REZAEI, 2013), dejetos de suínos (BASSO et al., 2012), lodo de esgoto, biossólidos (KABATA-PENDIAS, 2011) e rejeitos de mineração e da indústria metalúrgica (BORGES JÚNIOR et al., 2008). Além disto, a aplicação, sucessiva e contínua, por 10 anos, de fungicidas contendo zinco provoca um aumento desse elemento no solo (BRUNETTO et al., 2014). Desse modo, todos os dias, diversas fontes de zinco podem agir no solo e possibilitar a elevação de suas concentrações no meio ambiente.

O zinco em altas concentrações no solo (150 a 300 $\mu g g^{-1}$) é altamente tóxico (YADAV, 2010) e sua toxicidade, além dos fatores de biodisponibilidade, depende do tipo de planta e do estágio de desenvolvimento vegetal (BARAN, 2013). Os sinais visuais de distúrbios em plantas como resultado da toxicidade de Zn são relatados como sendo clorose em folhas jovens devido à deficiência de ferro ou manganês (SIVASANKAR; KALAIKANDHAN; VIJAYARENGAN, 2012) e aparência de cor vermelho-arroxeadas nas folhas devido à deficiência de fósforo (YADAV, 2010), que indicam que o Zn^{2+} em excesso pode facilmente substituir outros metais, especialmente aqueles com raios iônicos similares nos sítios ativos de enzimas ou transportadores (FUKAO et al., 2011). Além disso, manchas necróticas internervais nas folhas maduras (MIYASAKA; HAMASAKI; PENA, 2002) e a epinastia foliar (SAGARDOY et al., 2009) também são atribuídas à toxicidade do Zn.

O excesso de Zn^{2+} nas células pode produzir espécies reativas de oxigênio e influenciar negativamente a integridade e a permeabilidade da membrana (HOSSEINI; POORAKBAR,

2013; MISHRA; PRAKASH, 2010). A toxicidade de Zn dificulta a funcionalidade e eficiência do sistema fotossintético em diferentes espécies de plantas. Vassilev et al. (2011) em *Phaseolus vulgaris* L., Mirshekali et al. (2012) em *Sorghum bicolor* L. e Lalelou, Shafagh-Kolvanagh e Fateh (2013) em *Cucurbita pepo* L. mostraram que a concentração excessiva de Zn^{2+} reduziu o conteúdo de pigmentos fotossintéticos como a CHL *a* e CHL *b* ao inibir a absorção e translocação de Fe e Mg ao cloroplasto. O elevado nível de Zn^{2+} pode causar um declínio na fluorescência inicial e máxima da clorofila, resultando na diminuição da atividade do PSII (TSONEV; LIDON, 2012).

O crescimento e a estrutura do vegetal também podem ser afetados negativamente pela toxicidade do Zn. Todeschini et al. (2011) demonstraram que o Zn em *Populus alba* L. alterou drasticamente a morfologia das folhas e causou a formação de cristais de oxalato de cálcio. Vijayarengan e Mahalakshmi (2013) mostraram que a toxicidade desse metal reduziu o comprimento da raiz e da parte aérea, assim como a área foliar em *Solanum lycopersicum* L..

Uma das alternativas de sanar os problemas causados pela contaminação com metais pesados consiste na remediação de áreas contaminadas com técnicas de remoção, contenção ou redução da concentração do elemento contaminante no ambiente (SHEORAN; SHEORAN; POONIA, 2010). Contudo, as implicações técnicas e financeiras tornam a remediação do solo uma tarefa difícil (BARCELÓ; POSCHENRIEDER, 2003). Nas últimas décadas, vários métodos biológicos, físicos e químicos foram usados para alcançar esse objetivo (WUANA; OKIEIMEN, 2011). Geralmente, estes métodos têm limitações, isto é, trabalho intensivo, alto custo, perturbação da microflora do solo e alterações irreversíveis nas propriedades físico-químicas do solo (BOLAN et al., 2014).

Dentre as diferentes técnicas de remediação de solos contaminados por metais pesados, *in situ*, destaca-se as tecnologias de fitorremediação (SARMA, 2011). O termo fitorremediação é formado por *phyto*, que está relacionado à planta, e *remedium*, que significa coisa que cura, logo, a fitorremediação baseia-se na utilização de plantas naturais ou geneticamente modificadas capazes de extrair substâncias perigosas como metais pesados, radionuclídeos, pesticidas, bifenilos policlorados e hidrocarbonetos aromáticos polinucleares do ambiente, tornando-os indisponíveis ao meio ambiente (KALVE et al., 2011; SINGH; PRASAD, 2011; VITHANAGE et al., 2012).

A fitorremediação prevê vários mecanismos de descontaminação sendo que para áreas contaminadas com metais pesados, destaca-se a fitoestabilização e a fitoextração (KOTRBA et al., 2009). A fitoestabilização visa reduzir o potencial de dano ao ambiente, pela redução da mobilidade e disponibilidade do contaminante no solo, sendo as plantas, neste caso, escolhidas

por tolerar as condições da área, controlar a erosão e a lixiviação e evitar a translocação do contaminante para a parte aérea (MCINTYRE, 2003). Na fitoextração, as plantas agem removendo, armazenando, transferindo e tornando inofensivos os metais pesados presentes no solo (YANG; DENG; LI, 2008). Essas plantas são capazes de tolerar, absorver e translocar altos níveis de contaminantes que seriam tóxicos a qualquer outro organismo (KHAN et al., 2000). Sendo assim, a fitoextração compreende a extração de poluentes do solo e seu posterior acúmulo em tecidos de plantas denominadas acumuladoras (HALIM; CONTE; PICCOLO, 2003).

Baseando-se nas implicações econômicas, o objetivo da fitorremediação pode ser: (1) extração de metais com benefício financeiro, como por exemplo, o níquel; (2) minimização de riscos (fitoestabilização); e (3) manejo sustentável do solo, no qual a fitorremediação aumenta a fertilidade do solo, favorecendo o crescimento das culturas vegetais (GARBISU; ALKORTA, 2003; VAN AKEN, 2009; VANGRONSVELD et al., 2009). Nesse contexto, espécies arbóreas que apresentem capacidade de desenvolvimento em solos com baixa disponibilidade de nutrientes, um sistema radicular profundo, elevada produção de biomassa e crescimento rápido, como por exemplo, o *Populus nigra* L., o *Jatropha curcas* L. e o *Salix alba* L., podem ser exploradas para o duplo propósito de produção de matéria-prima para indústria madeireira e para fitorremediação (ABHILASH et al., 2012; PILON-SMITS; LEDUC, 2009; PRASAD, 2003).

O 'paricá' (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke), Fabaceae - Caesalpinioideae, é uma espécie arbórea de grande porte que pode atingir até 40 m de altura e 100 cm de diâmetro, e que pode ser encontrada na Amazônia brasileira, venezuelana, colombiana, peruana e boliviana (CARVALHO et al., 2019). Na floresta amazônica está presente na mata primária e secundária de terra firme e várzea alta dos estados do Pará, Rondônia, Amazonas e Mato Grosso e tem sido amplamente utilizado na recuperação de áreas degradadas e na indústria madeireira na fabricação de compensados e celulose (CARVALHO et al., 2016). Este vegetal apresenta um crescimento excessivamente rápido e sua madeira possui coloração branco-amarelo-claro, às vezes com tonalidade róseo-pálida com superfície sedosa, lisa e lustrosa. (COELHO, 2004). Essa planta é considerada pioneira com bom desenvolvimento em solos de baixa fertilidade desde que apresentem boas características físicas e biológicas e, por isso, está incluída na seleção de espécies de leguminosas para consórcios agroflorestais na Amazônia (BARBOZA et al., 2011). Também foi verificado que o *S. amazonicum* pode ser um potencial fitorremediador por ter sido capaz de acumular cádmio em seus tecidos (NOGUEIRA et al., 2019).

As plantas que podem ser usadas como fitorremediadoras utilizam diversas estratégias de tolerância ou desintoxicação sempre que estão em condições estressantes causadas pelas altas concentrações de metais pesados (SYTAR et al., 2013). Como um primeiro passo para lidar com a intoxicação por metais, os vegetais restringem a absorção desses elementos do solo, impedindo a entrada deles pela raiz (VIEHWEGER, 2014). Isso ocorre devido a alguns mecanismos, como a imobilização de metais por associação micorrízica ou complexação com exsudatos orgânicos pelo sistema radicular (DALVI; BHALERAO, 2013; PATRA et al., 2004). No estágio seguinte, se essas estratégias falharem e os metais conseguirem penetrar nos tecidos vegetais, os mecanismos de tolerância à desintoxicação serão ativados, incluindo a compartimentalização em várias estruturas intracelulares (por exemplo, vacúolo) (PATRA et al., 2004), ligação do contaminante à parede celular, biossíntese ou acumulação de osmólitos e osmoprotetores, como por exemplo a prolina, a complexação intracelular ou quelação de íons metálicos, devido a liberação de várias substâncias, tais como, ácidos orgânicos, polissacarídeos, fitoquelatinas e metalotioneínas (DALVI; BHALERAO, 2013; JOHN et al., 2012; MEMON et al., 2001; PRASAD, 2004), e, eventualmente, se todas essas medidas se mostrarem ineficientes e as plantas apresentarem toxicidade do metal, a ativação de mecanismos de defesa antioxidante será utilizada (MANARA, 2012).

Outra maneira de aumentar a tolerância de plantas ao estresse, consiste na utilização de elementos benéficos como o silício, que é um íon muito importante, pois constitui cerca de 28% da crosta terrestre (SOMMER et al., 2006). Este elemento costuma amenizar os efeitos deletérios dos metais pesados em plantas cultivadas em solos contaminados (CHEN et al., 2000). Alguns experimentos demonstraram que certas culturas se beneficiam significativamente com a aplicação de Si, quando cultivadas em solos com a presença de metais pesados, como Zn, Cd, Pb, Cr ou Cu (ALI et al., 2013; CUNHA; NASCIMENTO, 2009; KELLER et al., 2015; LI et al., 2012; PINTO et al., 2009; TAKAHASHI; MA; MIYAKE, 1990). Embora o Si não seja essencial para plantas superiores, ele apresenta uma estreita relação com a diminuição da fitotoxicidade do metal pesado (EPSTEIN, 1999; LIANG; SUN, 2007).

Os silicatos são capazes de converter as frações solúvel e trocável de metais no solo em formas quimicamente estáveis, diminuindo a biodisponibilidade do metal. Essa redução na biodisponibilidade do contaminante é atribuída às reações de precipitação, humificação e redox provocadas pelo silício (CHENG; HSEU, 2002). Os ânions SiO_3^{2-} são protonados na solução do solo, aumentando o pH e diminuindo a atividade do metal devido à precipitação dos compostos metal-hidroxila (SOMMER et al., 2006). Além disso, a adição de silicato ao solo promove a polimerização de compostos de silicato, referidos como potenciais complexantes de

metais pesados (DIETZEL, 2000).

Diante disso, a hipótese geral deste trabalho é que o silício mitiga os efeitos tóxicos do excesso de zinco em mudas de *S. amazonicum* e que esta espécie pode ser utilizada para fitorremediar áreas contaminadas com esse metal. O objetivo geral deste estudo foi avaliar os efeitos do silício no crescimento, no estado nutricional e na fisiologia de plantas jovens de *S. amazonicum* submetidas à níveis tóxicos de zinco.

REFERÊNCIAS

- ABHILASH, P. C. et al. Plant–microbe interactions: novel applications for exploitation in multipurpose remediation technologies. **Trends in biotechnology**, v. 30, n. 8, p. 416–420, 2012.
- ALI, H.; KHAN, E.; SAJAD, M. A. Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. **Chemosphere**, v. 91, n. 7, p. 869–881, 1 maio 2013.
- ALI, S. et al. The influence of silicon on barley growth, photosynthesis and ultra-structure under chromium stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 89, p. 66–72, 1 mar. 2013.
- AREF, F. Concentration and uptake of zinc and boron in corn leaf as affected by zinc sulfate and boric acid fertilizers in a deficient soil. **Life Science Journal**, v. 8, n. 1, p. 26–32, 2011.
- BARAN, A. Assessment of *Zea mays* Sensitivity to Toxic Content of Zinc in Soil. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 22, n. 1, p. 77–83, 1 jan. 2013.
- BARBOZA, E. et al. Fertilidade de solos em Rondônia. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 13, p. 586–594, 2011.
- BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, C. Phytoremediation: principles and perspectives. **Contributions to science**, v. 2, n. 3, p. 333–344, 2003.
- BASSO, C. J. et al. Teores totais de metais pesados no solo após aplicação de dejetos líquidos de suínos. **Ciência Rural**, v. 42, n. 4, p. 653–659, abr. 2012.
- BOLAN, N. et al. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils – To mobilize or to immobilize? **Journal of Hazardous Materials**, v. 266, p. 141–166, 15 fev. 2014.
- BORGES JÚNIOR, M. et al. Valores de referência local e avaliação da contaminação por zinco em solos adjacentes a áreas mineradas no município de Vazante-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. spe, p. 2883–2893, dez. 2008.
- BROADLEY, M. R. et al. Zinc in plants. **New Phytologist**, v. 173, n. 4, p. 677–702, mar. 2007.
- BRUNETTO, G. et al. Frações de cobre e zinco em solos de vinhedos no Meio Oeste de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 8, p. 805–810, ago. 2014.
- BUCHER, A. S.; SCHENK, M. K. Concentration of zinc and boron in corn leaf as affected by zinc sulfate and boric acid fertilizers in a deficient soil. **Scientia Horticulturae**, v. 83, n. 3–4, p. 339–352, 31 mar. 2000.
- CARVALHO, A. O. et al. Initial growth of ‘paricá’ (*Schizolobium amazonicum*) seedlings under different nitrogen doses. **Nativa**, v. 4, n. 2, p. 112–115, 28 abr. 2016.
- CARVALHO, M. B. F. et al. Métodos de superação de dormência da *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 2, n. 1, p. 490–500, 12 mar. 2019.

CHEN, H. . et al. Chemical methods and phytoremediation of soil contaminated with heavy metals. **Chemosphere**, v. 41, n. 1–2, p. 229–234, 1 jul. 2000.

CHENG, S.-F.; HSEU, Z.-Y. In-Situ Immobilization of Cadmium and Lead by Different Amendments in Two Contaminated Soils. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 140, n. 1/4, p. 73–84, 2002.

CIRIAKOVÁ, A. Heavy metals in the vascular plants of Tatra mountains. **Oecologia Montana**, v. 18, n. 1–2, p. 23–26, 2009.

COELHO, M. L. P. Exigências nutricionais do paricá (*Schizolobium Amazonicum*, Herb.) na fase de muda. **Cerne**, v. 10, n. 2, p. 167–183, 2004.

CUNHA, K. P. V.; NASCIMENTO, C. W. A. Silicon Effects on Metal Tolerance and Structural Changes in Maize (*Zea mays* L.) Grown on a Cadmium and Zinc Enriched Soil. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 197, n. 1–4, p. 323–330, 13 fev. 2009.

DALVI, A. A.; BHALERAO, S. A. Response of plants towards heavy metal toxicity: an overview of avoidance, tolerance and uptake mechanism. **Ann Plant Sci**, v. 2, n. 9, p. 362–368, 2013.

DIETZEL, M. Dissolution of silicates and the stability of polysilicic acid. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 64, n. 19, p. 3275–3281, 1 out. 2000.

EMAMVERDIAN, A. et al. Heavy Metal Stress and Some Mechanisms of Plant Defense Response. **The Scientific World Journal**, v. 2015, p. 1–18, 2015.

EPSTEIN, E. SILICON. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 50, n. 1, p. 641–664, 28 jun. 1999.

FARID, M. et al. Morphological, physiological and biochemical responses of different plant species to Cd stress. **Int. J. Chem. Biochem. Sci**, v. 3, p. 53–60, 2013.

FLORA, S. J. S.; MITTAL, M.; MEHTA, A. Heavy metal induced oxidative stress & its possible reversal by chelation therapy. **Indian Journal of Medical Research**, v. 128, n. 4, p. 501, 2008.

FUKAO, Y. et al. iTRAQ Analysis Reveals Mechanisms of Growth Defects Due to Excess Zinc in Arabidopsis. **Plant Physiology**, v. 155, n. 4, p. 1893–1907, 1 abr. 2011.

GARBISU, C.; ALKORTA, I. Basic concepts on heavy metal soil bioremediation. **The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection**, v. 3, n. 1, p. 58–66, 2003.

GUPTA, S. K. et al. Comparative Analysis of Zinc Finger Proteins Involved in Plant Disease Resistance. **PLoS ONE**, v. 7, n. 8, p. 1–15, 15 ago. 2012.

HALIM, M.; CONTE, P.; PICCOLO, A. Potential availability of heavy metals to phytoextraction from contaminated soils induced by exogenous humic substances. **Chemosphere**, v. 52, n. 1, p. 265–275, 1 jul. 2003.

HOSSAIN, M. A. et al. Molecular Mechanism of Heavy Metal Toxicity and Tolerance in

Plants: Central Role of Glutathione in Detoxification of Reactive Oxygen Species and Methylglyoxal and in Heavy Metal Chelation. **Journal of Botany**, v. 2012, p. 1–37, 2 abr. 2012.

HOSSEINI, Z.; POORAKBAR, L. Zinc toxicity on antioxidative response in (*Zea mays* L.) at two different pH. **Journal of Stress Physiology & Biochemistry**, v. 9, n. 1, p. 66–73, 2013.

JOHN, R. et al. Heavy metal toxicity: Effect on plant growth, biochemical parameters and metal accumulation by *Brassica juncea* L. **Gorgan University of Agricultural Sciences**, v. 3, n. 3, p. 65–76, 29 jul. 2012.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.

KALVE, S. et al. Arsenic and chromium hyperaccumulation by an ecotype of *Pteris vittata*—prospective for phytoextraction from contaminated water and soil. **Current Science**, p. 888–894, 2011.

KELLER, C. et al. Effect of silicon on wheat seedlings (*Triticum turgidum* L.) grown in hydroponics and exposed to 0 to 30 μ M Cu. **Planta**, v. 241, n. 4, p. 847–860, 17 abr. 2015.

KHAN, A. . et al. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation. **Chemosphere**, v. 41, n. 1–2, p. 197–207, 1 jul. 2000.

KLECKEROVA, A. et al. Cadmium(II) and Zinc(II) Ions Effects on Maize Plants revealed by Spectroscopy and Electrochemistry. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 6, n. 12, p. 6011–6031, 2011.

KOTRBA, P. et al. Genetically modified plants in phytoremediation of heavy metal and metalloids soil and sediment pollution. **Biotechnology Advances**, v. 27, n. 6, p. 799–810, 1 nov. 2009.

LALELOU, F. S.; SHAFAGH-KOLVANAGH, J.; FATEH, M. Effect of various concentrations of zinc on chlorophyll, starch, soluble sugars and proline in naked pumpkin (*Cucurbita pepo*). **International Journal of Farming and Allied Sciences**, v. 2, n. 24, p. 1198–1202, 2013.

LI, P. et al. Silicon ameliorates manganese toxicity by regulating manganese transport and antioxidant reactions in rice (*Oryza sativa* L.). **Plant and Soil**, v. 354, n. 1–2, p. 407–419, 9 maio 2012.

LIANG, Y.; SUN, W. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. **Environmental Pollution**, v. 147, n. 2, p. 422–428, 1 maio 2007.

MANARA, A. Plant Responses to Heavy Metal Toxicity. In: FURINI, A. (Ed.). **Plants and heavy metals**. SpringerBr ed. Dordrecht: Springer, 2012. p. 27–53.

MCINTYRE, T. Phytoremediation of heavy metals from soils. **Advances in biochemical engineering/biotechnology**, v. 78, p. 97–123, 2003.

MEMON, A. R. et al. Heavy metal accumulation and detoxification mechanisms in plants. **Turkish Journal of Botany**, v. 25, n. 3, p. 111–121, 2001.

MIRSHEKALI, H. et al. Effect of zinc toxicity on plant productivity, chlorophyll and Zn contents of sorghum (*Sorghum bicolor*) and common lambsquarter (*Chenopodium album*). **International journal of agriculture: research and review**, v. 2, n. 3, p. 247–254, 2012.

MISHRA, P. K.; PRAKASH, V. Response of non-enzymatic antioxidants to zinc Induced stress at different pH in *Glycine max* L. cv. Merrill. **Academic Journal of Plant Sciences**, v. 3, n. 1, p. 1–10, 2010.

MIYASAKA, S.; HAMASAKI, R.; PENA, R. S. **Nutrient Deficiencies and Excesses in Taro**. Hawai'i at Mānoa: SCM-4, 2002.

MOUSAVI, S. R.; GALAVI, M.; REZAEI, M. Zinc (Zn) importance for crop production - a review. **International Journal of Agronomy and Plant Production**, v. 4, n. 1, p. 64–68, 2013.

NAGAJYOTI, P. C.; LEE, K. D.; SREEKANTH, T. V. M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 8, n. 3, p. 199–216, 28 set. 2010.

NOGUEIRA, G. A. S. et al. Physiological and Growth Responses in the (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) Seedlings Subjected to Cadmium Doses. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 8, p. 217–224, 15 jun. 2019.

PATRA, M. et al. Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 52, n. 3, p. 199–223, 1 dez. 2004.

PILON-SMITS, E. A.; LEDUC, D. L. Phytoremediation of selenium using transgenic plants. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 20, n. 2, p. 207–212, 1 abr. 2009.

PINTO, S. I. DO C. et al. Silício como amenizador da fitotoxicidade de zinco em plantas jovens de *Eucalyptus urophylla* cultivadas em solução nutritiva. **Revista Árvore**, v. 33, n. 6, p. 1005–1014, dez. 2009.

PRASAD, M. N. V. Phytoremediation of metal-polluted ecosystems: hype for commercialization. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 50, n. 5, p. 686–701, 2003.

PRASAD, M. N. V. Phytoremediation of metals in the environment for sustainable development. **Proceedings-Indian National Science Academy Part B**, v. 70, n. 1, p. 71–98, 2004.

RASCIO, N.; NAVARI-IZZO, F. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? **Plant Science**, v. 180, n. 2, p. 169–181, 1 fev. 2011.

SAGARDOY, R. et al. Effects of zinc toxicity on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants grown in hydroponics. **Plant Biology**, v. 11, n. 3, p. 339–350, 1 maio 2009.

SARMA, H. Metal hyperaccumulation in plants: a review focusing on phytoremediation technology. **Journal of Environmental Science and Technology**, v. 4, n. 2, p. 118–138, 2011.

SCHUTZENDUBEL, A.; POLLE, A. Plant responses to abiotic stresses: heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhization. **Journal of experimental botany**, v. 53, n.

372, p. 1351–1365, 2002.

SHEORAN, V.; SHEORAN, A. S.; POONIA, P. Role of Hyperaccumulators in Phytoextraction of Metals From Contaminated Mining Sites: A Review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 41, n. 2, p. 168–214, 30 dez. 2010.

SILVA, R. F. DA et al. Growth and tolerance of *Enterolobium contortisiliquum* Vell. Seedlings grown in contaminated soil with zinc. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 979–986, 2018.

SINGH, A.; PRASAD, S. M. Reduction of heavy metal load in food chain: technology assessment. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 10, n. 3, p. 199–214, 2011.

SIVASANKAR, R.; KALAIKANDHAN, R.; VIJAYARENGAN, P. Phytoremediating capability and nutrient status of four plant species under zinc stress. **International Journal of Research in Plant Science**, v. 2, n. 1, p. 7–14, 2012.

SOMMER, M. et al. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes—a review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 169, n. 3, p. 310–329, 1 jun. 2006.

SYTAR, O. et al. Heavy metal-induced oxidative damage, defense reactions, and detoxification mechanisms in plants. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 35, n. 4, p. 985–999, 13 abr. 2013.

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

TANGAHU, B. V. et al. A Review on Heavy Metals (As, Pb, and Hg) Uptake by Plants through Phytoremediation. **International Journal of Chemical Engineering**, v. 2011, p. 1–31, 16 ago. 2011.

TODESCHINI, V. et al. Effects of high zinc concentration on poplar leaves: a morphological and biochemical study. **Environmental and Experimental Botany**, v. 71, n. 1, p. 50–56, 2011.

TSONEV, T.; LIDON, F. J. C. Zinc in plants - An overview. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, v. 24, n. 4, p. 322–333, 2012.

VAN AKEN, B. Transgenic plants for enhanced phytoremediation of toxic explosives. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 20, n. 2, p. 231–236, 2009.

VANGRONSVELD, J. et al. Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 16, n. 7, p. 765–794, 2009.

VASSILEV, A. et al. Effects of excess Zn on growth and photosynthetic performance of young bean plants. **Journal of phytology**, v. 6, p. 58–62, 2011.

VIEHWEGER, K. How plants cope with heavy metals. **Botanical Studies**, v. 55, n. 1, p. 1–12, 20 dez. 2014.

VIJAYARENGAN, P.; MAHALAKSHMI, G. Zinc toxicity in tomato plants. **World Applied Sciences Journal**, v. 24, n. 5, p. 649–653, 2013.

VITHANAGE, M. et al. Arsenic uptake by plants and possible phytoremediation applications:

a brief overview. **Environmental chemistry letters**, v. 10, n. 3, p. 217–224, 2012.

WUANA, R. A.; OKIEIMEN, F. E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. **Isrn Ecology**, v. 2011, p. 1–20, 2011.

YADAV, S. K. Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. **South African Journal of Botany**, v. 76, n. 2, p. 167–179, 1 abr. 2010.

YANG, S. X.; DENG, H.; LI, M. S. Manganese uptake and accumulation in a woody hyperaccumulator, *Schima superba*. **Plant Soil Environ**, v. 54, n. 10, p. 441–446, 2008.

ZENGIN, F. K.; MUNZUROGLU, O. Effects of some heavy metals on content of chlorophyll, proline and some antioxidant chemicals in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings. **Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica**, v. 47, n. 2, p. 157–164, 2005.

ZHOU, B. et al. The Metallothionein Gene, TaMT3, from *Tamarix androssowii* Confers Cd²⁺ Tolerance in Tobacco. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 15, n. 6, p. 10398–10409, 10 jun. 2014.

2. EFEITO DO SILÍCIO NO CRESCIMENTO E NO ESTADO NUTRICIONAL DE MUDAS DE *Schizolobium amazonicum* HUBER EX DUCKE SUBMETIDAS À TOXICIDADE DE ZINCO*

*Artigo aceito para publicação na revista Australian Journal of Crop Science, v. 11, n. 3, de fevereiro de 2020.

Resumo

O zinco é um elemento essencial às plantas, mas em excesso pode causar sérios danos ao vegetal. O *Schizolobium amazonicum* é uma espécie nativa da Amazônia que apresenta características desejáveis para remediar ambientes contaminados por metais pesados. O silício apresenta como efeito benéfico a redução da fitotoxidez de contaminantes. O objetivo do estudo foi avaliar o efeito do Si no crescimento e no estado nutricional de mudas de *S. amazonicum* submetidas à toxicidade de zinco. Utilizou-se um delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial 4 x 2, com quatro concentrações de zinco (1, 150, 300 e 600 μM) e duas concentrações de silício (0 e 1.5 mM) com cinco repetições por 30 dias. O aumento das concentrações de Zn na solução nutritiva reduziu o crescimento da planta e os teores de Ca, P, Mg, Fe, Mn e Cu nos tecidos vegetais, elevou as concentrações de S e provocou maior toxicidade nas raízes, em relação à parte aérea, das plantas de *S. amazonicum*. O fornecimento de Si à solução nutritiva promoveu aumento do crescimento vegetal, na absorção dos macro e micronutrientes avaliados e na tolerância das plantas, sugerindo que esse elemento mitiga os efeitos fitotóxicos do excesso de zinco. O índice de tolerância indicou que a espécie apresentou tolerância moderada e alta às doses do metal avaliadas. Os fatores de bioconcentração e de translocação demonstram a baixa capacidade do *S. amazonicum* em fitoextrair Zn e sugerem que a espécie pode ser promissora para fins de fitoestabilização desse metal.

Palavras-chave: fator de bioconcentração, fator de translocação, fitorremediação, metal pesado, paricá

Abstract

Zinc is an essential element to plants; however, excessive zinc levels can severely damage them. *Schizolobium amazonicum* is an Amazon native species that presents desirable features to remediate environments contaminated with heavy metals. Silicon has the beneficial effect of reducing the toxicity of different contaminants. The aim of the current study is to investigate the effect of Si on the growth and nutritional status of *S. amazonicum* seedlings subjected to zinc toxicity. The study followed a randomized block design at 4 x 2 factorial arrangement based on four zinc (1, 150, 300 and 600 μM) and two silicon (0 and 1.5 mM) concentrations, with five repetitions for 30 days. Increasing Zn concentrations in the nutrient solution reduced the growth of the plant and Ca, P, Mg, Fe, Mn and Cu contents in plant tissues, increased S concentrations and led to higher toxicity in the roots than in the shoot of *S. amazonicum* plants. Si addition to the nutrient solution increased plant growth, the absorption of the evaluated macro and micronutrients, as well as plant tolerance levels, which suggested that this element mitigated the phytotoxic effects of the excess of zinc. Based on the tolerance index, the species presented moderate and high tolerance to the evaluated metal doses. Bioconcentration and translocation factors have indicated the low Zn-phytoextraction capacity of *S. amazonicum* and suggested that the species may be promising for Zn phytostabilization purposes.

Keywords: bioconcentration factor, heavy metal, paricá, phytoremediation, translocation factor

2.1. Introdução

A contaminação dos solos por metais pesados tem provocado sérios danos aos ecossistemas e à saúde humana (HUANG et al., 2016; SHAHID et al., 2017). O manejo inadequado de resíduos provenientes da mineração, indústria metalúrgica, defensivos agrícolas, fertilizantes e do lixo urbano causam poluição ambiental com esses elementos, que dependendo da sua concentração, podem acarretar em toxicidade em vegetais e animais (NIAZI; SINGH; MINASNY, 2015).

Um modo de descontaminar solos com metais pesados, consiste no cultivo de plantas, como técnica fitorremediadora (BURGES et al., 2018). A fitostabilização é um dos métodos de fitorremediação de solos, que consiste no uso da raiz da planta para reduzir a mobilidade e a biodisponibilidade do metal em solos contaminados (EISSA, 2019). Entretanto, o sucesso do processo de fitostabilização depende da tolerância das plantas ao estresse metálico, ao acúmulo dos metais nas raízes e baixa translocação para parte aérea (EISSA; AHMED, 2016). Espécies florestais que toleram altos teores de metais que produzem elevada biomassa e apresentam sistema radicular bastante desenvolvido são recomendadas para imobilizar esses contaminantes por longos períodos (NIKOLIĆ et al., 2017).

O zinco é um elemento essencial para o metabolismo das plantas e é o segundo metal de transição mais abundante (MATEOS-NARANJO et al., 2018). Contudo, em níveis elevados, pode provocar danos ao vegetal (KAYA; ASHRAF; AKRAM, 2018). O excesso de Zn pode causar crescimento anormal e redução na absorção e translocação de elementos essenciais nas plantas (ANDREJIĆ et al., 2018). Estudos acerca de espécies lenhosas nativas da Amazônia para fitorremediação de Zn ainda são escassos.

O *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke é uma espécie nativa da Amazônia conhecida como paricá (GOMES et al., 2019). Esta planta é muito usada em reflorestamento e apresenta uma área de cultivo de 90 mil hectares no Brasil (PEREIRA et al., 2017). O interesse por esse vegetal deve-se ao seu rápido crescimento, pois apresenta produtividade de $38 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, à capacidade de adaptação à diversas condições edafoclimáticas e servir como matéria prima na produção de laminados e compensados (OHASHI; YARED; FARIAS NETO, 2010). Nogueira et al. (2019) verificaram que *S. amazonicum* também pode ser utilizado para fins de fitorremediação, pois foi capaz de acumular cádmio em suas raízes.

O silício é o segundo elemento mais abundante no solo (SAHEBI et al., 2015). As plantas podem absorvê-lo pelas raízes na forma de ácido silícico $[\text{Si}(\text{OH})_4]$ e translocá-lo para a parte aérea através do xilema (YANG; ZHANG, 2018). Apesar de não ser considerado um elemento

essencial, seus efeitos benéficos sobre o estresse biótico e abiótico, como o causado devido à toxicidade por metais pesados, foram encontrados em outras espécies (HADDAD et al., 2018; PEREIRA et al., 2018, PINTO et al., 2009). Esse caráter benéfico pode ocorrer pela imobilização de metais no solo, estimulação da atividade de enzimas antioxidantes, co-precipitação, complexação e compartimentalização do silício com íons metálicos nos tecidos vegetais (GARG; SINGH, 2018; LIANG et al., 2015). Especificamente para o *S. amazonicum*, a provável estratégia usada para evitar a toxicidade de Zn é atualmente desconhecida.

O objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito do Si no crescimento e no estado nutricional de mudas de *S. amazonicum* submetidas à toxicidade de zinco.

2.2. Material e métodos

2.2.1 Localização do experimento

O experimento foi conduzido em uma casa de vegetação no Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) em Belém, Pará, Brasil (1°27'17.3"S 48°26'18.0"O), no período de 8 de maio de 2018 a 17 de julho 2018. De acordo com Koppen, o clima regional é classificado como Af (equatorial) (LOPES et al., 2018). Durante o período experimental, a temperatura média e a umidade relativa do ar foram de $26.7 \pm 2.9^\circ \text{C}$ e $79.9 \pm 13.3\%$ (média \pm desvio-padrão), respectivamente.

2.2.2 Material vegetal e condições de crescimento

As sementes de *S. amazonicum* foram oriundas da Associação das Indústrias Exportadoras de Madeira do Estado do Pará (AIMEX) em Benevides, Pará, Brasil (1°20'04.9"S 48°14'24.5"O). Estas sementes foram escarificadas e embebidas em água destilada por 24 h e posteriormente foram germinadas em vasos de Leonard de 5 L adaptados com garrafas pet, preenchidos com areia lavada e esterilizada, e cultivadas de maneira semi-hidropônica.

Quatro sementes foram colocadas em cada vaso e, ao 7º dia após a emergência, ocorreu o desbaste limitando-se a uma muda por vaso. Todas as plantas, durante sete dias, receberam apenas água destilada. Após esse período ocorreu o fornecimento de solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) preparada com reagentes puros para análise, constituída por 5 mM KNO₃, 5 mM Ca(NO₃)₂.4H₂O, 1 mM KH₂PO₄, 2 mM Mg(SO₄)₂.7H₂O, 46,26 µM H₃BO₃, 9,15

μM $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $1 \mu\text{M}$ $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $0,50 \mu\text{M}$ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $0,09 \mu\text{M}$ $\text{H}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $89,00 \mu\text{M}$ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $89,57 \mu\text{M}$ Na_2EDTA , num volume total de 800 ml por vaso. O pH foi ajustado para $5,8 \pm 0,1$ usando HCl ou NaOH. A força iônica iniciou em 25% e foi modificada para 50% e 100%, em intervalos regulares de sete dias. As mudas receberam solução nutritiva com força iônica total do 22° ao 40° dia após a instalação do experimento.

2.2.3 Delineamento experimental e avaliação dos tratamentos

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em um esquema fatorial 4 x 2 com quatro concentrações de Zn, na ausência e presença de Si, com cinco repetições, totalizando 40 unidades experimentais, com uma planta em cada unidade. As concentrações de Zn utilizadas foram: 1 (controle), 150, 300 e 600 μM na forma de $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ e as concentrações de Si foram: 0 e 1.5 mM na forma de $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. As doses de zinco utilizadas foram baseadas em concentrações que este metal provocou sintomas de toxicidade em *Psidium guajava* (NATALE et al., 2005), *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* (PINTO et al., 2009) e *Thlaspi caerulescens* (BROWN et al., 1995). A concentração de silício, escolhida em nosso estudo, foi fundamentada naquela que reduziu a toxicidade causada por cádmio em *Vigna unguiculata* (PEREIRA et al., 2018), e zinco em *E. urophylla* (PINTO et al., 2009) e *Zea mays* (ŠIMKOVÁ et al., 2018)

Os tratamentos foram aplicados às mudas por 30 dias (41° ao 70° dia após a instalação do experimento). No 70° dia, após a observação dos sintomas visuais da toxicidade de Zn, os parâmetros morfológicos foram medidos em todas as plantas e as raízes e parte aérea, foram colhidas para análise nutricional.

2.2.4 Medições dos parâmetros morfológicos e acúmulo de biomassa

Foram avaliadas as seguintes características: número de folíolos vivos (NF); área foliar (AF), determinada com medidor LI-COR Mod. LI- 3100; altura da parte aérea (AP) medida da superfície do solo até o ápice da planta, com o uso de uma régua milimetrada e diâmetro do colo (DC), medido com o uso de um paquímetro. A matéria seca da raiz (MSR), da parte aérea (MSPA) e a total (MST) foram quantificadas após a secagem em estufa com circulação de ar a 65 °C. A partir desses dados calculou-se a relação entre a altura e o diâmetro do colo (H/D) e a relação entre a MSR e a MSPA (R/PA).

2.2.5 Determinação dos teores de nutrientes

Amostras com 100 mg de matéria seca (MS) moída foram colocadas em tubos cônicos de 50 ml (*Falcon, Corning*, México) e pré-digeridas (48 h) com 2 ml de HNO₃ sub-destilado (*DST 1000, Savillex*, EUA). Posteriormente, foram adicionados 8 ml de uma solução contendo 4 ml de H₂O₂ (30% v/v, *Synth*, Brasil) e 4 ml de água ultrapura (*Milli-Q System, Millipore*, EUA) e a mistura foi transferida para um recipiente de digestão de teflon, fechado e aquecido em um bloco digestor (*EasyDigest®*, *Analab*, França) de acordo com o seguinte programa: 100°C durante 30 min (1); 150 °C durante 30 min (2); 130 °C durante 10 min (3); 100°C durante 30 min e (4), resfriamento (5). O volume foi completado para 50 ml com água ultrapura e o irídio foi utilizado como padrão interno a 10 µg l⁻¹. Materiais de referência certificados (*NIST 1570a* e *NIST 1577c*) foram executados em cada análise para fins de controle de qualidade. Todos os valores encontrados estavam de acordo com os valores certificados. As determinações dos teores de nutrientes foram realizadas utilizando um espectrômetro de massa de plasma indutivamente acoplado (*ICP-MS 7900, Agilent*, EUA), em acordo com Paniz et al. (2018).

2.2.6 Extração e determinação do silício

Amostras com 100 mg de MS moída foram adicionadas em tubos de polipropileno de 100 ml contendo 2 ml de H₂O₂ (30% v/v) e 3 ml de NaOH (25mol L⁻¹). Os tubos foram fechados e levados para digestão em autoclave por 1 hora a 123°C e 0,15MPa. Após o resfriamento, adicionou-se 45 ml de água destilada. Desse extrato, foi retirada uma alíquota de 1 ml que foi transferida para um frasco contendo 19 ml de água destilada, 1 ml de HCl (500 g l⁻¹), 2 ml de molibdato de amônio (100g l⁻¹) e 2 ml de ácido oxálico (75 g l⁻¹). A concentração de silício foi determinada por espectrofotometria no comprimento de onda de 410 nm de acordo com Korndörfer et al. (2004).

2.2.7 Fator de bioconcentração, fator de translocação e índice de tolerância

Para avaliar a capacidade de fitoextração e a tolerância do *S. amazonicum* ao excesso de zinco, calculou-se: o fator de bioconcentração (FBC); o fator de translocação (FT) e o índice de tolerância (IT) com as equações 1, 2 e 3 descritas por Wang et al. (2018).

$$FBC = Z_{np} \text{ (mg kg}^{-1}\text{)} / Z_{n_{sn}} \text{ (mg l}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

onde Z_{np} representa a concentração de Zn na planta e $Z_{n_{sn}}$ representa a concentração de Zn na solução nutritiva.

$$FT = Z_{n_{pa}} \text{ (mg kg}^{-1}\text{)} / Z_{nr} \text{ (mg kg}^{-1}\text{)}, \quad (2)$$

onde $Z_{n_{pa}}$ representa a concentração de Zn na parte aérea e Z_{nr} representa a concentração de Zn nas raízes.

$$IT = MS_{pZn} \text{ (g)} \times 100 / MS_{pc} \text{ (g)} \quad (3)$$

onde MS_{pZn} corresponde à MST das plantas cultivadas em solução enriquecida com Zn e MS_{pc} equivale à MST das plantas controle.

2.2.8 Análise dos dados

Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Os desvios padrão (DP) foram calculados para cada tratamento. As análises estatísticas foram realizadas com o software SISVAR (FERREIRA, 2014).

2.3. Resultados e discussão

2.3.1 Parâmetros morfológicos e acúmulo de biomassa

O crescimento das plantas de *S. amazonicum* foi afetado pelas concentrações de zinco e silício na solução nutritiva (Tabelas 1 e 2). O incremento da concentração de Zn no meio de cultivo proporcionou redução do crescimento das mudas. A concentração de 600 μM de Zn causou, às plantas sem adição de Si, um decréscimo de 46 (NF), 66 (AF), 48 (AP), 61 (DC), 62 (MSR), 55 (MSPA), 57 (MST) e 17% (R/PA), em comparação ao controle. Quando as mudas que foram tratadas com Si, esses percentuais de redução diminuíram acentuadamente para 35, 51, 36, 47, 53, 46, 48 e 11%, nessa ordem. A redução da R/PA, promovida pelo aumento do

teor de zinco na solução, mostra que o metal promove mais dano ao sistema radicular do que à parte aérea.

Tabela 1. Número de folíolos (NF), área foliar (AF), altura da parte aérea (AP), diâmetro do colo (DC) e relação entre altura da parte aérea e diâmetro do colo (H/D) de plantas de *S. amazonicum* tratadas com Si e expostas à toxicidade de Zn

Si (mM)	Zn (μ M)	NF	AF (dm ²)	AP (cm)	DC (mm)	H/D
0	1	66.4 \pm 1.1 Ba	21.2 \pm 0.5 Ba	27.7 \pm 0.8 Ba	12.5 \pm 0.5 Ba	2.21 \pm 0.02 Ad
	150	45.4 \pm 0.9 Bb	13.2 \pm 0.3 Bb	18.4 \pm 0.7 Bb	7.1 \pm 0.2 Bb	2.60 \pm 0.04 Ac
	300	39.8 \pm 0.8 Bc	10.0 \pm 0.6 Bc	16.8 \pm 0.6 Bc	6.2 \pm 0.2 Bc	2.69 \pm 0.02 Ab
	600	35.8 \pm 0.8 Bd	7.2 \pm 0.6 Bd	14.4 \pm 0.5 Bd	4.9 \pm 0.2 Bd	2.94 \pm 0.05 Aa
1.5	1	77.4 \pm 1.5 Aa	27.7 \pm 1.2 Aa	30.3 \pm 0.7 Aa	14.9 \pm 0.4 Aa	2.03 \pm 0.03 Bd
	150	48.4 \pm 0.9 Ab	15.9 \pm 0.7 Ab	21.4 \pm 0.5 Ab	9.0 \pm 0.2 Ab	2.39 \pm 0.01 Bc
	300	44.4 \pm 0.5 Ac	12.1 \pm 0.7 Ac	18.6 \pm 0.5 Ac	7.5 \pm 0.2 Ac	2.49 \pm 0.02 Bb
	600	43.1 \pm 0.6 Ad	10.2 \pm 0.6 Ad	17.7 \pm 0.5 Ad	6.5 \pm 0.2 Ad	2.71 \pm 0.04 Ba

Colunas com letras maiúsculas diferentes entre tratamentos de Si (0 e 1.5 mM Si sob mesma concentração de Zn) e letras minúsculas entre tratamentos de Zn (1, 150, 300 e 600 μ M Zn sob mesma concentração de Si) indicam diferenças significativas pelo teste de Scott-Knott ($P < 0.05$). Valores descritos correspondem à médias de cinco repetições e DP

Tabela 2. Matéria seca radicular (MSR), matéria da parte aérea (MSPA), matéria seca total (MST) e relação entre a matéria seca radicular e a matéria seca da parte aérea (R/PA) de plantas de *S. amazonicum* tratadas com Si e expostas à toxicidade de Zn

Si (mM)	Zn (μ M)	MSR	MSPA (g)	MST	R/PA
0	1	10.2 \pm 0.1 Ba	23.4 \pm 0.2 Ba	33.6 \pm 0.3 Ba	0.437 \pm 0.004 Ba
	150	6.3 \pm 0.1 Bb	16.0 \pm 0.1 Bb	22.3 \pm 0.0 Bb	0.395 \pm 0.006 Bb
	300	4.6 \pm 0.1 Bc	12.3 \pm 0.3 Bc	16.9 \pm 0.5 Bc	0.377 \pm 0.002 Bc
	600	3.8 \pm 0.1 Bd	10.5 \pm 0.3 Bd	14.4 \pm 0.4 Bd	0.365 \pm 0.003 Bd
1.5	1	11.1 \pm 0.2 Aa	23.8 \pm 0.2 Aa	34.9 \pm 0.4 Aa	0.464 \pm 0.005 Aa
	150	7.3 \pm 0.1 Ab	17.6 \pm 0.2 Ab	24.9 \pm 0.2 Ab	0.416 \pm 0.003 Ab
	300	6.0 \pm 0.2 Ac	15.0 \pm 0.3 Ac	21.0 \pm 0.5 Ac	0.397 \pm 0.003 Ac
	600	4.8 \pm 0.1 Ad	12.4 \pm 0.2 Ad	17.2 \pm 0.3 Ad	0.386 \pm 0.004 Ad

Colunas com letras maiúsculas diferentes entre tratamentos de Si (0 e 1.5 mM Si sob mesma concentração de Zn) e letras minúsculas entre tratamentos de Zn (1, 150, 300 e 600 μ M Zn sob mesma concentração de Si) indicam diferenças significativas pelo teste de Scott-Knott ($P < 0.05$). Valores descritos correspondem à médias de cinco repetições e DP

O aumento da H/D com o acréscimo das concentrações de Zn indica que houve maior crescimento em AP em detrimento ao DC. Os maiores valores dessa relação (2.21 a 2.94) foram obtidos em mudas cultivadas sem silício. A relação entre esses dois parâmetros avalia a qualidade de mudas, pois espera-se que haja um equilíbrio no seu desenvolvimento, e o menor valor da relação H/D, observado nas mudas tratadas com Si, implica em plantas mais resistentes (ARAÚJO NETO et al., 2000).

Entre os sintomas da toxicidade de Zn, a redução no crescimento de plantas tem sido bastante observada. (ANWAAR et al., 2015; MATEOS-NARANJO et al., 2018; MEHRABANJOUBANI et al., 2015; ŠIMKOVÁ et al., 2018). Quanto ao Si, seu efeito benéfico, no crescimento vegetativo, foi verificado em estudos com *E. urophylla* (PINTO et al., 2009), *Z. mays* (PAULA et al., 2015), *G. hirsutum* (ANWAAR et al., 2015) e *O. sativa* (MEHRABANJOUBANI et al., 2015) cultivados em solução nutritiva enriquecidas com zinco. Nestes trabalhos, constatou-se um aumento do crescimento das plantas após a adição de Si no substrato contaminado, corroborando o caráter mitigador do silício na toxicidade causada por zinco no crescimento vegetal.

2.3.2 Teores de zinco e silício nos tecidos

O incremento das concentrações de Zn na solução nutritiva causou um aumento dos teores desse metal e diminuição dos teores de Si nas raízes e na parte aérea do *S. amazonicum*. Por outro lado, o Si adicionado à solução, diminuiu os teores de zinco nos tecidos vegetais (Tabela 3).

Tabela 3. Teores de Zn e Si em plantas de *S. amazonicum* tratadas com Si e expostas à toxicidade de Zn

Si (mM)	Zn (μ M)	Zn (mg kg^{-1} MS)		Si (mg kg^{-1} MS)	
		Parte aérea	Raiz	Parte aérea	Raiz
0	1	10.4 \pm 0.4 Ad	15.7 \pm 0.9 Ad	-	-
	150	64.0 \pm 2.6 Ac	1385.6 \pm 14.8 Ac	-	-
	300	92.6 \pm 1.2 Ab	2643.4 \pm 111.0 Ab	-	-
	600	109.4 \pm 3.2 Aa	3707.9 \pm 172.3 Aa	-	-
1.5	1	9.1 \pm 0.3 Ad	15.7 \pm 0.6 Ad	445.7 \pm 5.4 a	1547.5 \pm 24.3 a
	150	46.8 \pm 1.4 Bc	1174.4 \pm 9.2 Bc	405.1 \pm 3.3 b	1382.5 \pm 19.3 b
	300	70.3 \pm 2.4 Bb	2110.3 \pm 81.0 Bb	356.0 \pm 3.2 c	1114.8 \pm 4.0 c
	600	92.5 \pm 3.4 Ba	3192.6 \pm 131.0 Ba	205.6 \pm 2.6 d	250.1 \pm 4.5 d

Colunas com letras maiúsculas diferentes entre tratamentos de Si (0 e 1.5 mM Si sob mesma concentração de Zn) e letras minúsculas entre tratamentos de Zn (1, 150, 300 e 600 μ M Zn sob mesma concentração de Si) indicam diferenças significativas pelo teste de Scott-Knott ($P < 0.05$). Valores descritos correspondem à médias de cinco repetições e DP

Os maiores teores de zinco, 3707.9 (tratamento sem Si) e 3192.6 mg kg^{-1} (tratamento com Si), foram detectados nas raízes das plantas cultivadas na solução com 600 μ M, que equivaleram a 236.2 e 203.4 vezes superiores, respectivamente, aos teores encontrados no tratamento controle. Sob esta mesma dose de Zn, a parte aérea apresentou teores de metal de 109.4 (0.0 μ M de Si) e 92.5 mg kg^{-1} (1.5 μ M de Si), que correspondem a aumentos na

concentração do metal de 10.5 e 8.9 vezes, respectivamente, comparado ao controle. Isso mostra que as raízes de *S. amazonicum* são mais importantes que a parte aérea, na remoção Zn em solos contaminados, devido apresentarem maiores concentrações desse metal em seus tecidos. Resultados semelhantes foram encontrados por Feng et al (2018) em *Sesuvium portulacastrum*.

O maior teor Si ($1547.5 \text{ mg kg}^{-1}$) foi encontrado quando este elemento foi disponibilizado na solução com $1 \mu\text{M}$ de Zn. Esta concentração de silício é 3.5 vezes maior que a observada na parte aérea das plantas submetidas à mesma concentração de metal e 6.2 vezes superior àquela encontrada nas raízes que cresceram em $600 \mu\text{M}$ de Zn e 1.5 mM de Si.

Os maiores teores de Si nas raízes podem ser explicados pela forma de absorção do Si, pois assim como a maioria das dicotiledôneas, o *S. amazonicum* absorve silício passivamente pelo sistema radicular e transloca esse elemento para a parte aérea pelo xilema, via fluxo de massa, diferentemente das monocotiledôneas, em que esse transporte ocorrer de forma ativa (IMTIAZ et al., 2016). Mitani, Yamaji e Ma (2009) observaram que dicotiledônias como o *Cucumis sativus* e *Solanum lycopersicum* são incapazes de acumular grandes quantidade de Si na parte aérea.

Marques e Nascimento (2014) e Neumann e Zur Nieden (2001) observaram em *Cardaminopsis halleri* e *R. communis* que há uma co-precipitação do silício com o zinco em silicatos de zinco, que acumulam-se no vacúolo das células radiculares, causando redução na disponibilidade metabólica e na translocação de Zn e Si para a parte aérea, o que acarreta em um aumento na tolerância de plantas ao efeito tóxico desse metal.

O Si também pode reduzir os efeitos da concentração de Zn nos tecidos vegetais e, conseqüentemente, sua toxicidade, devido esse elemento benéfico estar associado à síntese de compostos fenólicos, que complexam o agente contaminante, e à diluição do metal devido à maior produção de MS (KIDD et al., 2001). Essa ação também é descrita em outros estudos que avaliaram a associação desses elementos em plantas (ANWAAR et al., 2015; MEHRABANJOUANI et al., 2015; PAULA et al., 2015).

2.3.3 Efeito do silício e do zinco na concentração de macro e micronutrientes

Exceto para o enxofre, o aumento da concentração de zinco na solução nutritiva foi inversamente proporcional aos teores dos nutrientes avaliados nos tecidos vegetais (Tabela 4). Comparadas ao controle, a parte aérea de plantas com 0.0 mM de Si e $600 \mu\text{M}$ de Zn apresentou uma diminuição em 19, 26, 26, 31, 36 e 47% nos teores de Ca, P, Mg, Fe, Mn e Cu, respectivamente. Nas raízes, o percentual de redução subiu para 22, 35, 36, 30, 31 e 51%, nessa

ordem. Com o fornecimento de 1.5 mM de Si na solução nutritiva, o decréscimo dos teores de macro e micronutrientes, no *S. amazonicum*, foi atenuado, diminuindo o percentual de redução nas concentrações de Ca, P, Mg, Fe, Mn e Cu para 14, 20, 21, 18, 34 e 35% na parte aérea e 9, 33, 23, 25, 26 e 42% nas raízes, respectivamente.

O menor acúmulo de nutrientes, causado pelo excesso Zn, é uma característica de fitotoxicidade de metais que pode retardar o crescimento vegetativo (PEREIRA et al., 2018; RIZWAN et al., 2019; SANTOS; BATISTA; LOBATO, 2018). Marques e Nascimento (2014) verificaram diminuição nos acúmulos de K, Mg, P, N, Ca, Cu, B, Fe, Mo e Mn em plantas de *R. communis* tratadas com níveis tóxicos de Zn. Em meio contaminado com esse elemento, Mateos-Naranjo et al., (2018) observaram diminuição dos teores de K, Mg, Ca, P e Mn em *Juncus acutus*. Os mesmos autores afirmam que a redução dos teores desses nutrientes pode também provocar alterações em processos metabólicos, como a fotossíntese.

A redução do teor de P, devido ao excesso de Zn, pode estar relacionada ao antagonismo entre esses dois elementos e à formação de complexos P-Zn, na forma de fosfatos ou fitatos de Zn, que são imobilizados na superfície radicular e inibem a translocação do metal para as folhas, como estratégia de proteção à planta contra a fitotoxicidade (PRASAD; SHIVAY; KUMAR, 2016). Cao et al. (2003), estudando um solo contaminado com metais pesados, observaram a relação antagonista entre esses íons, ao detectarem que o fornecimento de P na forma de ácido fosfórico ou uma combinação desse ácido com fosfato monocálcico diminuiu os teores de Zn nas raízes de *Stenotaphrum secundatum* de 355 mg kg⁻¹ para 208 mg kg⁻¹ e de 195 mg kg⁻¹ para 128 mg kg⁻¹ na parte aérea.

As raízes das mudas de *S. amazonicum* submetidas a níveis tóxicos de zinco apresentaram menor produção de MS, nas maiores concentrações do metal (150, 300 e 600 µM). Segundo Pinto et al. (2009), essa característica, possivelmente, ocorreu devido à inibição da absorção de cálcio provocada pelo excesso de Zn, pois o Ca²⁺ atua na alongação e divisão celular e é componente dos pectatos de Ca da lamela média da parede celular. Marques e Nascimento (2014) também relataram menores teores de Ca nos tecidos de *R. communis* devido à fertilização com Zn.

Tabela 4. Teores de nutrientes em plantas de *S. amazonicum* tratadas com Si e expostas à toxicidade de Zn

Si	Zn	Ca	P	S	Mg	Fe	Mn	Cu	
(mM)	(μ M)	-----(g kg^{-1} MS)-----				-----(mg kg^{-1} MS)-----			
Parte aérea									
0	1	14.8 \pm 0.3 Ba	3.78 \pm 0.04 Ba	2.17 \pm 0.05 Bc	2.43 \pm 0.03 Ba	43.8 \pm 1.0 Aa	34.5 \pm 0.5 Ba	1.73 \pm 0.05 Ba	
	150	12.6 \pm 0.2 Bd	3.18 \pm 0.03 Bb	2.45 \pm 0.02 Bb	2.06 \pm 0.04 Bb	39.8 \pm 0.8 Bb	27.2 \pm 0.9 Bb	1.17 \pm 0.03 Bb	
	300	12.2 \pm 0.1 Bc	2.89 \pm 0.05 Bc	2.54 \pm 0.04 Ba	2.01 \pm 0.02 Bb	36.3 \pm 0.2 Bc	24.2 \pm 0.9 Bc	1.08 \pm 0.03 Bc	
	600	12.0 \pm 0.2 Bc	2.78 \pm 0.07 Bc	2.58 \pm 0.02 Ba	1.81 \pm 0.03 Bc	30.4 \pm 0.5 Bd	22.0 \pm 0.5 Bd	0.91 \pm 0.03 Bd	
1.5	1	16.6 \pm 0.2 Aa	3.98 \pm 0.02 Aa	2.27 \pm 0.04 Ac	2.67 \pm 0.04 Aa	44.8 \pm 0.3 Aa	37.0 \pm 0.8 Aa	1.83 \pm 0.01 Aa	
	150	13.8 \pm 0.2 Ab	3.37 \pm 0.07 Ab	2.58 \pm 0.01 Ab	2.29 \pm 0.02 Ab	41.0 \pm 0.4 Ab	29.6 \pm 1.0 Ab	1.29 \pm 0.04 Ab	
	300	13.5 \pm 0.2 Ab	3.34 \pm 0.07 Ab	2.66 \pm 0.02 Aa	2.09 \pm 0.03 Ac	38.4 \pm 0.4 Ac	26.6 \pm 0.6 Ac	1.19 \pm 0.02 Ac	
	600	12.8 \pm 0.2 Ac	3.01 \pm 0.06 Ac	2.69 \pm 0.02 Aa	1.93 \pm 0.02 Ad	35.9 \pm 0.4 Ad	22.8 \pm 0.3 Ad	1.12 \pm 0.02 Ad	
Raiz									
0	1	17.1 \pm 0.5 Ba	5.78 \pm 0.11 Ba	3.70 \pm 0.05 Bc	8.69 \pm 0.06 Ba	1027.5 \pm 14.0 Aa	129.4 \pm 0.9 Ba	7.03 \pm 0.19 Ba	
	150	15.0 \pm 0.2 Bb	4.40 \pm 0.09 Bb	5.77 \pm 0.04 Bb	7.33 \pm 0.10 Bb	843.8 \pm 8.6 Bb	96.9 \pm 2.7 Bb	5.31 \pm 0.14 Bb	
	300	14.7 \pm 0.1 Bc	4.31 \pm 0.14 Bb	5.85 \pm 0.10 Bb	6.67 \pm 0.05 Bc	772.9 \pm 9.8 Bc	94.3 \pm 2.1 Bb	4.76 \pm 0.06 Ac	
	600	13.4 \pm 0.3 Bd	3.75 \pm 0.10 Ac	6.64 \pm 0.14 Ba	5.54 \pm 0.22 Bd	724.2 \pm 16.5 Bd	88.8 \pm 2.1 Bc	3.43 \pm 0.33 Bd	
1.5	1	18.8 \pm 0.6 Aa	6.66 \pm 0.20 Aa	4.05 \pm 0.28 Ac	8.90 \pm 0.25 Aa	1035.5 \pm 21.3 Aa	138.8 \pm 0.8 Aa	8.27 \pm 0.36 Aa	
	150	16.6 \pm 0.2 Ab	4.87 \pm 0.08 Ab	6.57 \pm 0.26 Ab	7.77 \pm 0.14 Ab	895.8 \pm 11.0 Ab	113.8 \pm 1.3 Ab	5.94 \pm 0.22 Ab	
	300	15.6 \pm 0.3 Ac	4.71 \pm 0.10 Ab	6.66 \pm 0.07 Ab	7.68 \pm 0.08 Ab	876.4 \pm 16.5 Ab	110.3 \pm 1.6 Ab	4.98 \pm 0.38 Ac	
	600	15.5 \pm 0.4 Ac	3.89 \pm 0.16 Ac	7.64 \pm 0.29 Aa	6.70 \pm 0.16 Ac	774.0 \pm 17.3 Ac	95.4 \pm 2.3 Ac	4.10 \pm 0.11 Ad	

Colunas com letras maiúsculas diferentes entre tratamentos de Si (0 e 1.5 mM Si sob mesma concentração de Zn) e letras minúsculas entre tratamentos de Zn (1, 150, 300 e 600 μ M Zn sob mesma concentração de Si) indicam diferenças significativas pelo teste de Scott-Knott ($P < 0.05$). Valores descritos correspondem à médias de cinco repetições e DP

Monnet et al. (2001) descreveram que a diminuição dos teores de Mg, Mn, Cu, Ca e Fe, indica inibição desses elementos pelo Zn. Devido serem cátions bivalentes, estes elementos competem pelos mesmos sítios bioativos, podendo proporcionar desequilíbrios em nível metabólico (NOCITO et al., 2011). Isto ocorre, por exemplo, na substituição do Mg por Zn na molécula de clorofila, em condições de toxicidade de zinco, provocando alterações na capacidade fotossintética (KÜPPER; KÜPPER; SPILLER, 1998).

Comparadas ao controle, as mudas submetidas à concentração de 600 μM de zinco apresentaram elevação de 79 e 19% (plantas sem adição de Si) e de 106 e 24% (plantas tratadas com Si) nos teores de S nas raízes e parte aérea, respectivamente. A maior presença de enxofre nos órgãos vegetativos, provocado pelo excesso de zinco, pode ser explicada pela diminuição da seletividade da membrana celular, originando influxo passivo deste mineral no vegetal (ŠIMKOVÁ et al., 2018). Este acréscimo no teor de S também pode estar relacionado a mecanismos de tolerância à toxicidade no *S. amazonicum*, que pode ser induzido a produzir compostos orgânicos intercelulares formados por enxofre, tais como: o tiol, presente nos componentes da parede celular (MEHES-SMITH; NKONGOLO; CHOLEW, 2013); a glutathione (HASANUZZAMAN et al., 2017); as metalotioneínas e as fitoquelatinas (HERNÁNDEZ et al., 2015) que agem como quelantes, complexando metais e auxiliam no transporte deles para os vacúolos, evitando que liguem-se à proteínas que atuam em processos fisiológicos (PARROTTA, 2015).

O fornecimento de silício às mudas de *S. amazonicum* diminuiu os efeitos negativos do excesso de Zn ao atenuar a redução das concentrações dos nutrientes avaliados nos tecidos vegetais, conferindo maior disponibilidade e assimilação desses minerais e proporcionando maior crescimento às plantas. O efeito do Si como mitigador do decréscimo dos teores de nutrientes, em plantas submetidas à toxicidade por metais, também foi verificado em *O. sativa* (MEHRABANJOUANI et al., 2015; WANG; WANG; GAO, 2015), *E. urophylla* (PINTO et al., 2009) e *V. unguiculata* (PEREIRA et al., 2018).

2.3.4 Fator de bioconcentração, fator de translocação e índice de tolerância

Os maiores valores de FBC foram 183.8 (0.0 mM de Si) e 171.5 (1.5 mM de Si), encontrados nas plantas cultivadas em solução com 1 μM de Zn. A concentração de 600 μM de Zn decresceu o FBC em 85% e o Si aumentou essa redução para 87%, em relação as plantas controle (Tabela 5). Isso indica que o excesso de Zn na solução reduz a capacidade do *S.*

amazonicum de extrair este metal da solução e o silício interfere na absorção e assimilação do zinco.

A deposição de silício na endoderme radicular causa um impedimento físico na absorção e no transporte de Zn pelo apoplasto da raiz, inibindo a translocação do metal para a parte aérea (CUNHA; NASCIMENTO, 2009). Estes resultados estão de acordo com os observados em *G. hirsutum* (ANWAAR et al., 2015) e *O. sativa* (MEHRABANJOUBANI et al., 2015). Zayed, Gowthaman e Terry (2010) caracterizam o FBC como um bom indicador da capacidade de acumulação de metais nos vegetais, porque leva em conta a concentração do agente contaminante no substrato e descreveram que plantas com boa capacidade de acumular metais devem ter um $FBC > 1000$. Isso demonstra que *S. amazonicum* não é um bom acumulador de metais.

Tabela 5. Fator de bioconcentração (FBC), fator de translocação (FT) e índice de tolerância (IT) de plantas de *S. amazonicum* tratadas com Si e expostas à toxicidade de Zn

Si (mM)	Zn (μ M)	FBC	FT	IT (%)
0	1	183.8 \pm 7.6 Aa	0.667 \pm 0.030 Aa	-
	150	44.7 \pm 0.6 Ab	0.046 \pm 0.002 Ab	66.2 \pm 0.5 Ba
	300	40.3 \pm 1.5 Ac	0.035 \pm 0.001 Ab	50.3 \pm 1.5 Bb
	600	27.3 \pm 1.2 Ad	0.030 \pm 0.001 Ab	42.8 \pm 1.6 Bc
1.5	1	171.5 \pm 3.4 Ba	0.583 \pm 0.033 Ba	-
	150	38.5 \pm 0.3 Bb	0.040 \pm 0.001 Ab	74.1 \pm 0.8 Aa
	300	33.1 \pm 1.2 Bc	0.033 \pm 0.002 Ab	62.5 \pm 1.3 Ab
	600	24.4 \pm 1.0 Ad	0.029 \pm 0.001 Ab	51.3 \pm 1.2 Ac

Colunas com letras maiúsculas diferentes entre tratamentos de Si (0 e 1.5 mM Si sob mesma concentração de Zn) e letras minúsculas entre tratamentos de Zn (1, 150, 300 e 600 μ M Zn sob mesma concentração de Si) indicam diferenças significativas pelo teste de Scott-Knott ($P < 0.05$). Valores descritos correspondem à médias de cinco repetições e DP

Os valores de FT variaram de 0.667, no controle, até 0.029, em 1.5 mM Si associado à 600 μ M de Zn, o que corresponde à uma redução de 96%. Este fator avalia a fitoextração de metais, pois leva em consideração a capacidade da planta em absorver agentes contaminantes, a partir do solo ou da água, e transferi-los para o caule e as folhas (GALAL; SHEHATA, 2015).

De acordo com Zvobgo et al. (2018), o FT é classificado em: baixo ($FT < 0.01$), moderadamente baixo ($0.01 \leq FT < 0.10$), alto ($0.10 \leq FT < 0.50$) e muito alto ($FT \geq 0.50$). FTs baixos e moderadamente baixos indicam a presença de mecanismos que restringem o contaminante nas raízes para reduzir seus níveis tóxicos na parte aérea (BRANZINI; GONZÁLEZ; ZUBILLAGA, 2012). Saraswat e Rai (2011) descrevem que plantas com essas características são mais tolerantes à toxicidade por metal, pois reduzem os efeitos danosos de altas concentrações de Zn nas folhas. Em contrapartida, FTs elevados caracterizam a atuação

de mecanismos fisiológicos que propiciam altos teores de metais pesados na parte aérea dos vegetais (LIN; AARTS, 2012). Desse modo, o *S. amazonicum* apresentou uma capacidade de fitoextração de zinco muito alta somente em 1 μM de Zn no substrato e moderadamente baixa nas demais doses dele na solução, demonstrando que o excesso desse elemento e a presença de Si promoveram um maior acúmulo de zinco nas raízes e menor transporte dele para a parte aérea.

Os valores de IT variaram de 66.2 a 42.8 % nas plantas não tratadas com silício e de 74.1 a 51.3% nas plantas com 1.5 mM de Si. Este índice também é utilizado para classificar a tolerância de vegetais à toxicidade por contaminantes e baseia-se na produção de MST das plantas (ZVOBGO et al., 2018). Como as mudas tratadas com Si apresentaram valores de IT mais elevados, isso sugere que este elemento aumenta a adaptação do *S. amazonicum* ao ambiente contaminado com zinco, diminuindo seu efeito tóxico. Os ITs verificados em nosso estudo foram semelhantes aos de outras espécies como *Enterolobium contortisiliquum* (SILVA et al., 2018) e *S. portulacastrum* (FENG et al., 2018). Lux et al. (2004) classificaram o IT como: baixo ($\text{IT} < 35$), moderado ($35 \leq \text{IT} < 60$) e alto ($\text{IT} > 60$). Dessa forma, observamos que o *S. amazonicum* apresentou alta tolerância quando submetido a 150 μM , no tratamento sem Si, e até 300 μM de Zn, quando houve associação com 1.5 mM de silício. Nas demais concentrações, a tolerância ao zinco foi considerada moderada.

De acordo com Masarovičová, Král'ová e Kummerová (2010), os FBCs, TFs e ITs apresentados pelo *S. amazonicum*, nas condições do nosso experimento, mostram que esta espécie é considerada uma fitoestabilizadora de zinco, pois estas espécies são capazes de tolerar o efeito nocivo do metal e acumulá-lo nas raízes e no substrato, restringido seu transporte para a parte aérea, tornando possível a fitoestabilização (HOSMAN et al., 2017).

2.4. Conclusão

O aumento das concentrações de Zn na solução nutritiva reduziu o crescimento e os teores de cálcio, fosforo, magnésio, ferro, manganês e cobre, elevou as concentrações de enxofre e provocou maior toxicidade nas raízes, em relação à parte aérea, nas plantas de *S. amazonicum*.

A adição do Si na solução nutritiva promoveu aumento no crescimento e na absorção dos macro e micronutrientes avaliados, sugerindo que esse elemento benéfico mitiga os efeitos fitotóxicos do excesso de zinco.

Os FBCs, FTs e ITs demonstram a baixa capacidade do *S. amazonicum* em fitoextrair Zn e sugerem que a espécie pode ser promissora para fins de fitoestabilização desse metal.

2.5. Referências

- ANDREJIĆ, G. et al. Zinc accumulation, photosynthetic gas exchange, and chlorophyll a fluorescence in Zn-stressed *Miscanthus × giganteus* plants. **Photosynthetica**, v. 56, n. 4, p. 1249–1258, 21 dez. 2018.
- ANWAAR, S. A. et al. Silicon (Si) alleviates cotton (*Gossypium hirsutum* L.) from zinc (Zn) toxicity stress by limiting Zn uptake and oxidative damage. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 5, p. 3441–3450, 18 mar. 2015.
- ARAÚJO NETO, S. E. et al. Crescimento de mudas de melancia em diferentes volumes de recipientes e tipos de substratos. **Horticultura Brasileira**, v. 20, n. 2, p. 482–492, 28 dez. 2000.
- BRANZINI, A.; GONZÁLEZ, R. S.; ZUBILLAGA, M. Absorption and translocation of copper, zinc and chromium by *Sesbania virgata*. **Journal of Environmental Management**, v. 102, p. 50–54, 15 jul. 2012.
- BROWN, S. L. et al. Zinc and Cadmium Uptake by Hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* Grown in Nutrient Solution. **Soil Science Society of America Journal**, v. 59, n. 1, p. 125, 1995.
- BURGES, A. et al. From phytoremediation of soil contaminants to phytomanagement of ecosystem services in metal contaminated sites. **International Journal of Phytoremediation**, v. 20, n. 4, p. 384–397, 21 mar. 2018.
- CAO, R. X. et al. Phosphate-induced metal immobilization in a contaminated site. **Environmental Pollution**, v. 122, n. 1, p. 19–28, 1 mar. 2003.
- CUNHA, K. P. V.; NASCIMENTO, C. W. A. Silicon effects on metal tolerance and structural changes in maize (*Zea mays* L.) grown on a cadmium and zinc enriched soil. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 197, n. 1–4, p. 323–330, 13 fev. 2009.
- EISSA, M. A. Effect of Compost and Biochar on Heavy Metals Phytostabilization by the Halophytic Plant Old Man Saltbush [*Atriplex Nummularia* Lindl]. **Soil and Sediment Contamination**, v. 28, n. 2, p. 135–147, 17 fev. 2019.
- EISSA, M. A.; AHMED, E. M. Nitrogen and Phosphorus Fertilization for some *Atriplex* Plants Grown on Metal-contaminated Soils. **Soil and Sediment Contamination**, v. 25, n. 4, p. 431–442, 18 maio 2016.
- FENG, J. et al. Tolerance and bioaccumulation of combined copper, zinc, and cadmium in *Sesuvium portulacastrum*. **Marine Pollution Bulletin**, v. 131, p. 416–421, jun. 2018.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e agrotecnologia**, v. 38, n. 2, p. 109–112, 2014.
- GALAL, T. M.; SHEHATA, H. S. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Plantago major* L. grown in contaminated soils under the effect of traffic pollution. **Ecological Indicators**, v. 48, p. 244–251, 1 jan. 2015.
- GARG, N.; SINGH, S. Arbuscular Mycorrhiza *Rhizophagus irregularis* and Silicon Modulate

Growth, Proline Biosynthesis and Yield in *Cajanus cajan* L. Millsp. (pigeonpea) Genotypes Under Cadmium and Zinc Stress. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 37, n. 1, p. 46–63, 22 mar. 2018.

GOMES, J. M. et al. *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby can be used in enrichment planting in gaps caused by logging in Amazonia. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 1, p. 417, 4 abr. 2019.

HADDAD, C. et al. Silicon Promotes Growth of *Brassica napus* L. and Delays Leaf Senescence Induced by Nitrogen Starvation. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 516, 23 abr. 2018.

HASANUZZAMAN, M. et al. Glutathione in plants: biosynthesis and physiological role in environmental stress tolerance. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 23, n. 2, p. 249–268, 10 abr. 2017.

HERNÁNDEZ, L. E. et al. Contribution of glutathione to the control of cellular redox homeostasis under toxic metal and metalloid stress. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 10, p. 2901–2911, maio 2015.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. **The water culture method for growing plants without soils**. 2. ed. Berkeley: California Agricultural Experimental Station, 1950. v. 347

HOSMAN, M. E. et al. Mechanism of Phytoremediation Potential of Flax (*Linum usitatissimum* L.) to Pb, Cd and Zn. **Pelagia Research Library Asian Journal of Plant Science and Research**, v. 7, n. 4, p. 30–40, 2017.

HUANG, G. et al. Chemical immobilization of Pb, Cu, and Cd by phosphate materials and calcium carbonate in contaminated soils. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 16, p. 16845–16856, 20 ago. 2016.

IMTIAZ, M. et al. Silicon occurrence, uptake, transport and mechanisms of heavy metals, minerals and salinity enhanced tolerance in plants with future prospects: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 183, p. 521–529, 1 dez. 2016.

KAYA, C.; ASHRAF, M.; AKRAM, N. A. Hydrogen sulfide regulates the levels of key metabolites and antioxidant defense system to counteract oxidative stress in pepper (*Capsicum annuum* L.) plants exposed to high zinc regime. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 13, p. 12612–12618, 21 maio 2018.

KIDD, P. S. et al. The role of root exudates in aluminium resistance and silicon-induced amelioration of aluminium toxicity in three varieties of maize (*Zea mays* L.). **Journal of Experimental Botany**, v. 52, n. 359, p. 1339–1352, 1 jun. 2001.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLA, A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. 2. ed. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Ciências Agrárias, Grupo de Pesquisa em Silício, 2004. v. 1

KÜPPER, H.; KÜPPER, F.; SPILLER, M. In situ detection of heavy metal substituted chlorophylls in water plants. **Photosynthesis Research**, v. 58, n. 2, p. 123–133, 1998.

LIANG, Y. et al. Silicon-Mediated Tolerance to Metal Toxicity. In: **Silicon in Agriculture**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015. p. 83–122.

- LIN, Y.-F.; AARTS, M. G. M. The molecular mechanism of zinc and cadmium stress response in plants. **Cellular and Molecular Life Sciences**, v. 69, n. 19, p. 3187–3206, 18 out. 2012.
- LOPES, M. J. S. et al. Light and plant growth-promoting rhizobacteria effects on *Brachiaria brizantha* growth and phenotypic plasticity to shade. **Grass and Forage Science**, v. 73, n. 2, p. 493–499, 1 jun. 2018.
- LUX, A. et al. Differences in structure of adventitious roots in *Salix* clones with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity. **Physiologia Plantarum**, v. 120, n. 4, p. 537–545, abr. 2004.
- MARQUES, M. C.; NASCIMENTO, C. W. A. DO. Tolerância de mamona a zinco avaliada por fluorescência de clorofila e nutrição das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 850–857, jun. 2014.
- MASAROVIČOVÁ, E.; KRÁĽOVÁ, K.; KUMMEROVÁ, M. Principles of classification of medicinal plants as hyperaccumulators or excluders. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 32, n. 5, p. 823–829, 9 set. 2010.
- MASUDA, H. et al. Iron biofortification in rice by the introduction of multiple genes involved in iron nutrition. **Scientific Reports**, v. 2, n. 1, p. 543, 30 dez. 2012.
- MATEOS-NARANJO, E. et al. Salinity alleviates zinc toxicity in the saltmarsh zinc-accumulator *Juncus acutus*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 163, p. 478–485, 15 nov. 2018.
- MEHES-SMITH, M.; NKONGOLO, K.; CHOLEW, E. Coping Mechanisms of Plants to Metal Contaminated Soil. In: SILVERN, S.; YOUNG, S. (Eds.). **Environmental Change and Sustainability**. Rijeka: IntechOpen, 2013. p. 53–90.
- MEHRABANJOUBANI, P. et al. Impacts of silicon nutrition on growth and nutrient status of rice plants grown under varying zinc regimes. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 27, n. 1, p. 19–29, 21 mar. 2015.
- MITANI, N.; YAMAJI, N.; MA, J. F. Identification of Maize Silicon Influx Transporters. **Plant and Cell Physiology**, v. 50, n. 1, p. 5–12, 1 jan. 2009.
- MONNET, F. et al. Relationship between PSII activity, CO₂ fixation, and Zn, Mn and Mg contents of *Lolium perenne* under zinc stress. **Journal of Plant Physiology**, v. 158, n. 9, p. 1137–1144, 1 jan. 2001.
- NATALE, W. et al. Resposta de mudas de goiabeira à aplicação de zinco. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 24, n. 3, p. 770–773, dez. 2005.
- NEUMANN, D.; ZUR NIEDEN, U. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants. **Phytochemistry**, v. 56, n. 7, p. 685–692, 1 abr. 2001.
- NIAZI, N. K.; SINGH, B.; MINASNY, B. Mid-infrared spectroscopy and partial least-squares regression to estimate soil arsenic at a highly variable arsenic-contaminated site. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 12, n. 6, p. 1965–1974, 29 jun. 2015.
- NIKOLIĆ, N. et al. Assessment of cadmium tolerance and phytoextraction ability in young

Populus deltoides L. And *populus* × *euramericana* plants through morpho-anatomical and physiological responses to growth in cadmium enriched soil. **IForest**, v. 10, n. 3, p. 635–644, 2017.

NOCITO, F. F. et al. Cadmium retention in rice roots is influenced by cadmium availability, chelation and translocation. **Plant, Cell and Environment**, v. 34, n. 6, p. 994–1008, 1 jun. 2011.

NOGUEIRA, G. A. S. et al. Physiological and Growth Responses in the (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) Seedlings Subjected to Cadmium Doses. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 8, p. 217, 15 jun. 2019.

OHASHI, S. T.; YARED, J. A. G.; FARIAS NETO, J. T. DE. Variabilidade entre procedências de paricá *Schizolobium parahyba* var *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby plantadas no município de Colares - Pará. **Acta Amazonica**, v. 40, n. 1, p. 81–88, mar. 2010.

PANIZ, F. P. et al. Effective procedures for the determination of As, Cd, Cu, Fe, Hg, Mg, Mn, Ni, Pb, Se, Th, Zn, U and rare earth elements in plants and foodstuffs. **Analytical Methods**, v. 10, n. 33, p. 4094–4103, 23 ago. 2018.

PARROTTA, L. Target or barrier? The cell wall of early- and later-diverging plants vs cadmium toxicity: differences in the response mechanisms. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, 2015.

PAULA, L. DE S. et al. Silicon (Si) ameliorates the gas exchange and reduces negative impacts on photosynthetic pigments in maize plants under Zinc (Zn) toxicity. **Australian Journal of Crop Science**, v. 9, n. 10, p. 901–908, 2015.

PEREIRA, K. D. et al. Morphological and physiological changes on *Schizolobium parahyba* var. *Amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby plants intoxicated by glyphosate. **CERNE**, v. 23, n. 2, p. 267–274, jun. 2017.

PEREIRA, T. S. et al. Silicon deposition in roots minimizes the cadmium accumulation and oxidative stress in leaves of cowpea plants. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 24, n. 1, p. 99–114, 19 jan. 2018.

PINTO, S. I. DO C. et al. Silício como amenizador da fitotoxicidade de zinco em plantas jovens de *Eucalyptus urophylla* cultivadas em solução nutritiva. **Revista Árvore**, v. 33, n. 6, p. 1005–1014, dez. 2009.

PRASAD, R.; SHIVAY, Y. S.; KUMAR, D. Interactions of Zinc with Other Nutrients in Soils and Plants - A Review. **Indian Journal of Fertilisers**, v. 12, n. 5, p. 16–26, 2016.

RIZWAN, M. et al. A critical review on the effects of zinc at toxic levels of cadmium in plants. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 7, p. 6279–6289, 11 mar. 2019.

SAHEBI, M. et al. Importance of Silicon and Mechanisms of Biosilica Formation in Plants. **BioMed Research International**, v. 2015, p. 1–16, 2015.

SANTOS, L. R.; BATISTA, B. L.; LOBATO, A. K. S. Brassinosteroids mitigate cadmium toxicity in cowpea plants. **Photosynthetica**, v. 56, n. 2, p. 591–605, 8 jun. 2018.

SARASWAT, S.; RAI, J. P. N. Complexation and detoxification of Zn and Cd in metal accumulating plants. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 10, n. 4, p. 327–339, 31 dez. 2011.

SHAHID, M. et al. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. **Journal of Hazardous Materials**, v. 325, p. 36–58, mar. 2017.

SILVA, R. F. DA et al. Growth and tolerance of *Enterolobium contortisiliquum* Vell. Seedlings grown in contaminated soil with zinc. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 979–986, 2018.

ŠIMKOVÁ, L. et al. The Effect of Silicon on the Activity and Isozymes Pattern of Antioxidative Enzymes of Young Maize Roots under Zinc Stress. **Silicon**, v. 10, n. 6, p. 2907–2910, 6 nov. 2018.

WANG, C. et al. The effect of excess Zn on mineral nutrition and antioxidative response in rapeseed seedlings. **Chemosphere**, v. 75, n. 11, p. 1468–1476, 1 jun. 2009.

WANG, S.; WANG, F.; GAO, S. Foliar application with nano-silicon alleviates Cd toxicity in rice seedlings. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 4, p. 2837–2845, 14 fev. 2015.

WANG, W. HONG et al. Ramie (*Boehmeria nivea*)’s uranium bioconcentration and tolerance attributes. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 184–185, p. 152–157, abr. 2018.

YANG, J.-L.; ZHANG, G.-L. Silicon cycling by plant and its effects on soil Si translocation in a typical subtropical area. **Geoderma**, v. 310, p. 89–98, jan. 2018.

ZAYED, A.; GOWTHAMAN, S.; TERRY, N. Phytoaccumulation of Trace Elements by Wetland Plants: I. Duckweed. **Journal of Environment Quality**, v. 27, n. 3, p. 715, 2010.

ZVOBGO, G. et al. The Tolerance Index and Translocation Factor were Used to Identify the Barley Genotypes with High Arsenic Stress Tolerance. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 49, n. 1, p. 50–62, 2 jan. 2018.

3. O SILÍCIO DIMINUI OS EFEITOS NEGATIVOS DO EXCESSO DE ZINCO NAS TROCAS GASOSAS E NA FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA A EM PLANTAS JOVENS DE *Schizolobium amazonicum*

Resumo

O zinco é um elemento essencial constituinte de muitas enzimas e desempenha um papel estrutural como estabilizador de proteínas vegetais. O silício é um elemento benéfico que pode aumentar a tolerância das plantas contra estresses abióticos. O *Schizolobium amazonicum* é uma espécie amazônica que apresenta características desejáveis para fitorremediar solos contaminados por metais pesados. O objetivo do estudo foi avaliar o efeito do Si nas trocas gasosas e na fluorescência da clorofila *a* de mudas de *S. amazonicum* submetidas à toxicidade de zinco. Utilizou-se um delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial 4 x 2, com quatro concentrações de zinco (1, 150, 300 e 600 μM) e duas concentrações de silício (0 e 1.5 mM) com cinco repetições por 30 dias. O excesso de zinco na solução nutritiva causou efeitos negativos à fotossíntese, à fluorescência da clorofila *a* e ao teor de pigmentos fotossintéticos e provocou incremento ao coeficiente de extinção não-fotoquímico e à concentração intercelular de CO_2 , indicando que este efeito é devido à limitação fotoquímica e menor assimilação CO_2 no mesofilo. Contudo, foi verificado que o Si foi capaz de atenuar a toxicidade de zinco na fisiologia do *S. amazonicum* e sua aplicação pode ser uma potencial estratégia para aumentar a tolerância das mudas ao excesso desse metal.

Palavras chave: estresse abiótico, fitorremediação, fotossíntese, metal pesado, paricá

Abstract

Zinc is an essential element made up of many enzymes and plays a structural role as a stabilizer of plant proteins. Silicon is a beneficial element that can increase the tolerance of plants against abiotic stresses. *Schizolobium amazonicum* is an Amazonian species that presents desirable resources for soils contaminated by heavy metals. The aim of the study was to evaluate the effect of self on gas exchange and chlorophyll fluorescence *a* from *S. amazonicum* seedlings submitted to zinc toxicity. Use a randomized block design in a 4 x 2 factorial scheme, with four zinc filters (1, 150, 300 and 600 μM) and two silicon skills (0 and 1.5 mM) with five repetitions for 30 days. The excess of zinc in the nutritional solution causes negative effects on photosynthesis, chlorophyll *a* fluorescence and the photosynthetic pigment content and causes an increase in the non-photochemical extinction coefficient and in the CO_2 intercellularity, when this effect is caused by photochemical limitation and less assimilation of CO_2 in the mesophyll. However, it was selected that Si was able to attenuate the toxicity of zinc in the physiology of *S. amazonicum* and its application may be a potential strategy to increase seedling tolerance by exceeding this metal.

Keywords: abiotic stress, phytoremediation, photosynthesis, heavy metal, paricá

3.1 Introdução

A poluição provocada por metais pesados tornou-se um grande problema ambiental ao redor do mundo, pois os poluentes metálicos são particularmente difíceis de serem remediados do solo, da água e do ar, porque, diferentemente dos poluentes orgânicos, que podem degradar pequenas moléculas inofensivas, elementos tóxicos, como chumbo, mercúrio, cádmio, cobre e zinco, são imutáveis por reações bioquímicas (AYANGBENRO; BABALOLA, 2017).

O zinco é um elemento essencial para o crescimento e desenvolvimento vegetal, contudo, em excesso no solo, esse metal pode ser extremamente tóxico para as células das plantas (ANDREJIĆ et al., 2018). Em altas concentrações, o Zn pode interferir na captação, transporte e homeostase de íons essenciais, interromper processos metabólicos, reduzir o crescimento vegetal, alterar a morfologia radicular, causar clorose foliar e provocar distúrbios na atividade mitótica, na permeabilidade da membrana e na cadeia de transporte de elétrons (RIZWAN et al., 2019; SANTOS et al., 2019).

A tecnologia de fitorremediação é muito importante no processo de remoção de metais pesados do solo e da água (FENG et al., 2018). Algumas plantas são capazes de fitorremediar locais poluídos por metais, por tolerarem, absorverem e translocarem elevados níveis de contaminantes que seriam tóxicos para a maioria dos organismos (WANG et al., 2018).

O Paricá (*Schizolobium amazonicum*), espécie amazônica que apresenta um elevado potencial econômico, tem adquirido cada vez mais importância entre as espécies utilizadas para reflorestamento no Brasil, pelo seu rápido crescimento em altura e diâmetro que garantem sua utilização em poucos anos (ANDRADE et al., 2019). A madeira produzida por essa espécie tem características tecnológicas favoráveis à indústria de painéis (BARBOSA et al., 2019). Nogueira et al. (2019) observaram que o *S. amazonicum* também pode ser um potencial fitorremediador, pois esta espécie foi capaz de acumular cádmio em seus tecidos.

O silício é um elemento benéfico para os vegetais, que pode diminuir os efeitos nocivos de alguns metais pesados, aumentando, assim, a tolerância das plantas a ambientes de estresse (ASHFAQUE et al., 2017; JAN et al., 2018; SHI et al., 2018). O Si mitiga a toxicidade de metais pesados, devido estimular a produção de enzimas antioxidantes na planta, reduzir a disponibilidade de elementos contaminantes no substrato, regular a translocação de metais da raiz para a parte aérea, modular a capacidade de ligação de cátions à parede celular e complexar e co-precipitar íons metálicos tóxicos no citoplasma, sequestrando esses metais no vacúolo (FLORA et al., 2019; JAN et al., 2018; ŠIMKOVÁ et al., 2018). Apesar dos benefícios

descritos, a potencial contribuição do Si ao *S. amazonicum*, cultivado em substrato com elevados níveis de Zn, ainda não foi claramente estabelecida.

O objetivo do estudo foi avaliar o efeito do silício nas trocas gasosas e na fluorescência da clorofila *a* em mudas de *S. amazonicum* submetidas à toxicidade de zinco.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Local do experimento

O experimento foi conduzido em uma casa de vegetação na Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) em Belém, Pará, Brasil (1°27'17.3"S 48°26'18.0"O), de 8 de maio de 2018 a 17 de julho de 2018. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é classificado como Af, clima equatorial, caracterizado por temperatura média anual de 26,4 °C, umidade relativa do ar de 84%, precipitação média anual de 3001 mm e radiação solar média anual de 2.338,3 h (OLIVEIRA et al., 2017). Durante o período experimental, a temperatura média e a umidade relativa do ar foram de 26.7±2.9° C e 79.9±13.3% (média ± desvio-padrão), respectivamente.

3.2.2 Material vegetal e condições de crescimento

Foram utilizadas sementes de *S. amazonicum* provenientes da Associação das Indústrias Exportadoras de Madeira do Estado do Pará (AIMEX), localizada em Benevides, Pará, Brasil (1°20'04.9"S 48°14'24.5"O). O processo para produção das mudas de procedeu-se com a escarificação das sementes, embebição em água destilada por 24 h, germinação em vasos de Leonard de 5 L adaptados com garrafas pet, contendo areia lavada e esterilizada, e cultivo de maneira semi-hidropônica.

Foram germinadas quatro sementes em cada vaso e, sete dias após o semeio, houve o desbaste deixando-se apenas uma planta por vaso. Todas as plantas, durante esse período, receberam apenas água destilada. A seguir, forneceu-se à cada muda 800 ml de solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) constituída por 5 mM KNO₃, 5 mM Ca(NO₃)₂·4H₂O, 1 mM KH₂PO₄, 2 mM Mg(SO₄)₂·7H₂O, 46,26 µM H₃BO₃, 9,15 µM MnCl₂·4H₂O, 1 µM ZnSO₄·7H₂O, 0,50 µM CuSO₄·5H₂O, 0,09 µM H₂MoO₄·H₂O, 89,00 µM FeSO₄·7H₂O, 89,57 µM Na₂EDTA,. A força iônica inicial da solução nutritiva foi de 25%, que foi alterada para 50% e 100%, em intervalos regulares de sete dias. Ajustou-se o pH da solução nutritiva para 5,8±0,1 com HCl

ou NaOH. O fornecimento de solução nutritiva com 100% da força iônica ocorreu do 22° ao 40° dia após o semeio

3.2.3 Tratamentos com zinco e silício e delineamento experimental

Os tratamentos consistiram na combinação de quatro doses de zinco e duas doses de silício, em esquema fatorial 4×2 , com cinco repetições distribuídas em delineamento em blocos ao acaso, totalizando 40 unidades experimentais, com uma planta em cada unidade. As concentrações avaliadas foram 1 (controle), 150, 300 e 600 μM de Zn na forma de $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ e a 0 e 1.5 mM de Si na forma de $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. As doses de zinco utilizadas foram baseadas em concentrações que este elemento causou toxicidade em *Psidium guajava* (NATALE et al., 2005), *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* (PINTO et al., 2009) e *Thlaspi caerulescens* (BROWN et al., 1995) e, a concentração de silício avaliada foi aquela que diminuiu a toxicidade provocada por cádmio em *Vigna unguiculata* (PEREIRA et al., 2018), e zinco em *E. urophylla* (PINTO et al., 2009) e *Zea mays* (ŠIMKOVÁ et al., 2018).

As plantas foram submetidas aos tratamentos por 30 dias (41° ao 70° dia após a instalação do experimento). No 70° dia, após a observação dos sintomas visuais da toxicidade de Zn, os parâmetros fisiológicos foram avaliados em todas as plantas e os tecidos foliares foram colhidos para determinação dos teores de pigmentos fotossintéticos.

3.2.4 Medição das trocas gasosas

As avaliações das trocas gasosas foram realizadas entre 9h e 11h, em dia sem nebulosidade, representando o período diurno em que a fotossíntese atinge os valores máximos, conforme determinado a partir das curvas diurnas das trocas gasosas foliares. As medições foram realizadas na região mediana de folíolos individuais completamente expandidos, localizadas na terceira folha contada a partir do ápice. A taxa de assimilação líquida de CO_2 (P_N), a condutância estomática (g_s), a transpiração foliar (E) e a concentração intercelular de CO_2 (C_i) foram avaliadas usando um analisador de gás infravermelho portátil (LI-6400XT, LI-COR Biosciences Inc., Lincon, NE, EUA) equipado com uma fonte de luz azul / vermelha (LI-6400-02B, LI-COR) sob um fluxo de radiação fotossinteticamente ativa de $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e fluxo de CO_2 $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$, de acordo com Silvestre et al. (2017). A partir desses dados, calculou-se a eficiência do uso da água (WUE), estimada pela razão (P_N/E), e a eficiência instantânea de carboxilação (P_N/C_i) de acordo com Paula et al. (2015). Todas as medidas foram

realizadas com temperatura do ar de $34 \pm 1^\circ \text{C}$, umidade relativa do ar de $56 \pm 5\%$, radiação incidente de $463 \pm 132 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e déficit de pressão de vapor de ar de $2,6 \pm 0,6 \text{ kPa}$. A quantidade de luz azul foi ajustada para 10% da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) para otimizar a abertura estomática.

3.2.5 Medição da fluorescência da clorofila *a*

A fluorescência da clorofila *a* foi analisada no folíolo oposto ao utilizado para avaliar as trocas gasosas, utilizando o equipamento LI-6400XT (LI-COR Biosciences Inc., Lincoln, NE, EUA). Estes folíolos foram adaptados ao escuro por 30 min e em seguida, iluminados com um pulso fraco de radiação modulada para obter a fluorescência inicial (F_0). Em seguida, uma saturação de pulso de luz branca de $6000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ foi aplicada por 0,8 s para assegurar a emissão de fluorescência máxima (F_m). Nas amostras adaptadas ao escuro, a máxima eficiência fotoquímica do fotossistema II (PSII) foi estimada pela razão entre fluorescência variável e máxima [$F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$]. Posteriormente, pulsos saturantes de luz branca foram aplicados para atingir a máxima fluorescência ($F'm$). Em seguida, a luz actínica foi desligada e a radiação vermelha distante ligada para medir F_0 adaptada à luz ($F'0$). A eficiência fotoquímica efetiva do PSII ($F'v/F'm$) foi estimada como a razão entre $(F'm - F'0)/F'm$. O coeficiente de extinção fotoquímica (qP) foi calculado como $qP = (F'm - F_s)/(F'm - F'0)$ e o coeficiente de extinção não-fotoquímico (NPQ) foi determinado a partir da equação de Stern - Volmer [$NPQ = (F_m/F'm) - 1$] (KRAUSE; WEIS, 1991). O rendimento quântico real do transporte de elétrons do PSII (Φ_{PSII}) foi calculado como $(F'm - F_s)/F'm$ (GENTY; BRIANTAIS; BAKER, 1989). A taxa de transporte de elétrons (ETR) foi calculada como $ETR = \Phi_{PSII} \times PPF D \times f \times \alpha$, em que $PPFD$ é a densidade do fluxo de fótons fotossintéticos; f é um fator que contribui para a compartimentação de energia entre PSII e fotossistema I (PSI) equivalente a 0,5; o que indica que a energia de excitação é distribuída igualmente entre os dois fotossistemas; e α é a absorvância da folha pelos tecidos fotossintetizantes e corresponde a 0,84 (MAXWELL; JOHNSON, 2000).

3.2.6 Determinação dos pigmentos fotossintéticos

Amostras com 100 mg de matéria fresca (MF) de tecido foliar foram maceradas e homogeneizadas no gelo e no escuro, na presença de 25 mL de acetona (80%). Posteriormente, o homogenato foi centrifugado a 2000 rpm por 2 minutos. O sobrenadante foi removido e os

teores de clorofilas *a* (CHL *a*), clorofila *b* (CHL *b*) e carotenóides (CAR) foram quantificados usando um espectrofotômetro (modelo SP-220; Biospectro) (SIMS; GAMON, 2002). A partir desses dados calculou-se a clorofila total (CHL Total), a relação entre a CHL *a* e CHL *b* (CHL *a*/CHL *b*) e a relação entre CHL Total e CAR (CHL Total/CAR) de acordo Pereira et al. (2019).

3.2.7 Análise dos dados

Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Os desvios padrão (DP) foram calculados para cada tratamento. As análises estatísticas foram realizadas com o software SISVAR (FERREIRA, 2014).

3.3 Resultados

3.3.1 Si melhora as trocas gasosas nas plantas afetadas pelo Zn

O incremento da concentração de zinco na solução nutritiva provocou uma redução em todas as variáveis relacionadas às trocas gasosas, exceto a C_i (Figura 1). A concentração de 600 μM de Zn causou, às plantas sem adição de Si, um decréscimo de 79, 65, 63, 43 e 92% em P_N , g_s , E , WUE e P_N/C_i , respectivamente, e um aumento de 149% em C_i , em comparação ao controle. Contudo, nas plantas tratadas com Si, esses percentuais de redução foram diminuídos para 66 (P_N), 54 (g_s), 58 (E), 21 (WUE), 86 (P_N/C_i) e o aumento da C_i foi alterado para 132%.

3.3.2 Si melhora a fluorescência da clorofila *a* em plantas submetidas à toxicidade por Zn

Com exceção de NPQ , o excesso de zinco na solução causou uma redução nas variáveis relacionadas à fluorescência da clorofila *a* (Figura 2). No tratamento com 600 μM de Zn e sem o fornecimento de Si, os valores de F_v/F_m , F_v'/F_m' , qP , $\Phi PSII$ e ETR foram reduzidos em 12, 16, 70, 65 e 68%, respectivamente, em relação as plantas controle. Porém o fornecimento de silício atenuou esses percentuais de redução para 7, 11, 56, 62 e 62%. Quanto ao NPQ , o aumento da concentração de Zn na solução, provocou um incremento dessa variável. Em 600 μM de Zn, o NPQ observado foi 482% maior, em comparação ao tratamento controle, contudo a aplicação Si diminuiu esse percentual para 414%.

3.3.3 Si aumenta o teor de pigmentos fotossintéticos em plantas expostas ao estresse por Zn

O aumento das doses de zinco na solução nutritiva proporcionou uma diminuição dos teores de pigmentos fotossintéticos (Figura 3). Quando comparadas ao controle, as plantas submetidas à concentração de 600 μM de zinco, apresentaram decréscimos de 56, 40, 52, 28, 25 e 36% nos valores de CHL *a*, CHL *b*, CHL Total, CHL *a*/ CHL *b*, CAR e CHL Total/CAR, respectivamente. Contudo, a aplicação de silício amenizou essa redução para 53, 36, 49, 27, 22 e 34%, nessa ordem, nas plantas sob essa mesma dose do metal na solução nutritiva.

3.4 Discussão

O decréscimo da g_s , causado pelo aumento das doses de Zn, pode ser explicado devido ao fechamento estomático e à redução do tamanho e da quantidade de estômatos (ANJUM et al., 2017). Emamverdian et al. (2018b) e Ouni et al. (2016) também observaram essa característica em *Indocalamus latifolius* e em *Polypogon monspeliensi*, cultivados sob níveis tóxicos de zinco, e descreveram isso como uma possível estratégia de tolerância, na qual há uma alteração na anatomia foliar, para tentar diminuir a absorção de zinco e manter água nos tecidos vegetais, afim de garantir a sobrevivência das plantas (EMAMVERDIAN et al., 2018b; OUNI et al., 2016).

A E é responsável pela dinâmica do transporte de nutrientes do substrato para as raízes e folhas (PER et al., 2016) e a diminuição dos valores dessa variável, em plantas cultivadas em substratos com altos níveis de Zn, pode ser causada pela diminuição de g_s , também como estratégia de tolerância ao efeito tóxico do metal (SZOPIŃSKI et al., 2019). A limitação causada pelos estômatos pode reduzir as taxas de E , e assim, diminuir a perda de água da planta para a atmosfera e restringir a absorção de altas doses de zinco, pelo sistema radicular, para amenizar os efeitos fitotóxicos do excesso do metal à planta (ABBAS et al., 2017). Zhou et al. (2018) também observaram redução na E em plantas de *Kosteletzkya pentacarpos* submetidas a altas concentrações de Zn.

A redução da P_N e g_s , juntamente com o aumento de C_i , em plantas de *S. amazonicum*, em virtude da exposição ao excesso de zinco, indica que o decréscimo em P_N não está associado a menor absorção de CO_2 pelos estômatos, e sim à diminuição da fixação dessa molécula no mesófilo (RIZWAN et al., 2019). O mesmo comportamento foi observado em *Glycine max* por Santos et al. (2019). Nesse estudo, observou-se que a g_s não impediu a penetração de CO_2 nas folhas, de modo que a diminuição de P_N foi associada à limitações

fotoquímicas ou bioquímicas que ocorrem no sequestro de CO_2 nos cloroplastos, devido à inibição de enzimas ligadas ao ciclo de Calvin, como a RuBisCO, que são responsáveis pela fixação do carbono. Essa condição provoca uma redução da P_N , pois quando o Zn é favorecido na competição local com o Mg pela formação e função catalítica do complexo ternário RuBisCO – CO_2 – metal^{2+} , a afinidade dessa enzima pelo CO_2 diminui (MATEOS-NARANJO et al., 2008).

A P_N/C_i , indica a taxa de aproveitamento do CO_2 disponível na câmara subestomática para fixação de carbono (DUTRA et al., 2018), e, em nosso experimento, o Zn reduziu os valores dessa variável, possivelmente, pelo comprometimento da fotossíntese e da taxa de assimilação de CO_2 . Pzopiński et al. (2019) observaram uma característica semelhante a essa em *Arabidopsis halleri*. Quanto à redução da WUE , que indica quantitativamente o comportamento momentâneo das trocas gasosas nas folhas e a eficiência com que a planta utiliza os recursos hídricos (MATEOS-NARANJO et al., 2018), o estresse por zinco pode ter causado distúrbios no balanço hídrico, em virtude da menor P_N e à inibição da absorção e transporte de água, acarretando em menor produção de fotoassimilados, aspecto semelhante ao descrito por Romeo et al. (2017) em um experimento com *Populus alba*.

Os aumentos dos níveis de P_N , g_s , WUE , E e P_N/C_i e a redução de C_i , proporcionados pelo fornecimento de Si, podem ser explicados devido esse elemento aumentar a atividade do RuBisCO durante a fixação de CO_2 , induzir a atividade antioxidante, que reduz o conteúdo de H_2O_2 e a peroxidação lipídica na planta, diminuir a translocação de Zn para a parte aérea do vegetal e a incrementar a absorção de Mg pelas raízes. (ASHFAQUE et al., 2017; LI et al., 2018; PAULA et al., 2015). O efeito atenuante do silício nessas variáveis, em plantas sob estresse por metais pesados, também foi observado em *Z. mays* por Paula et al (2015), em *Gossypium hirsutum* por Anwaar et al. (2015) e em *Oryza sativa* por LI et al. (2015).

O estresse nas mudas de *S. amazonicum*, causado pelos altos níveis de Zn na solução nutritiva, também foi observado pela redução da F_v/F_m , F_m'/F_v' , qP , $\Phi PSII$ e ETR e o aumento de NPQ . Esse comportamento é semelhante ao observado em outros experimentos que relacionam a redução nos parâmetros da fluorescência da clorofila *a* ao estresse provocado pelo excesso de Zn à outras espécies de plantas (SANTOS et al., 2019; TIECHER et al., 2016a, 2016b). A redução dos valores desses parâmetros, com exceção do NPQ , caracteriza um estado de fotoinibição, com o comprometimento da estrutura dos tilacóides e do fluxo eficiente de elétrons através do PSII, ocasionando em uma menor quantidade de energia absorvida pela planta, através do complexo de antenas, para reduzir o carbono e produzir matéria seca (ALVES; MAGALHÃES; BARJA, 2002).

O aumento do NPQ e a redução do qP , causados pelo excesso de Zn, podem indicar que uma menor quantidade de luz absorvida foi dissipada fotoquimicamente e que houve uma maior dissipação de energia, na forma de calor, o que caracteriza uma estratégia de tolerância ao metal, para proteger o aparato fotossintético, atenuar a fotoinibição nos centros de reação e prevenir a formação de espécies reativas de oxigênio, que danificam proteínas, lipídeos e pigmentos fotossintéticos (ZHANG et al., 2017). Szopiński et al. (2019) descreveram resultados semelhantes um experimento com *A. halleri* e *Arabidopsis arenosa*.

O fornecimento de silício às mudas de *S. amazonicum* proporcionou um incremento nos parâmetros relacionados à fluorescência da clorofila *a* e uma diminuição do NPQ , o que sugere, de acordo com Maxwell e Johnson (2000), que uma maior parte da energia luminosa, absorvida pelas clorofilas associadas ao PSII, foi utilizada na etapa fotoquímica, indicando que esse elemento contribuiu para a manutenção do desempenho fotossintético das plantas. Essa característica mitigadora do Si na fitotoxidez de metais pesados também foi observada em *Nicotiana tabacum* por Flora et al (2019) e em *Pisum sativum* por Jan et al. (2018).

O parâmetro Fv/Fm pode ser considerado como um indicador da performance fotossintética da planta, visto que, valores entre 0.75 e 0.85 caracterizam plantas saudáveis, enquanto que valores abaixo de 0.75 podem indicar que a planta está sofrendo danos causados por algum tipo de estresse biótico ou abiótico, que diminui a capacidade fotoquímica do PSII (FONSECA et al., 2019; ROUTH et al., 2019). A partir desses valores de referência, observamos, em nosso estudo, que as plantas de *S. amazonicum*, sem o tratamento com Si, toleraram até 150 μM de Zn, ao passo que a aplicação de silício aumentou a tolerância das mudas ao metal e permitiu que tolerassem o efeito fitotóxico do excesso de zinco até 300 μM . Este comportamento foi consistente com os valores apresentados por Fv'/Fm' que expressa a eficiência de transporte de elétrons pelo PSII em estado não-oxidado (FALQUETO et al., 2007). Esse aumento de tolerância ao estresse causado por metais, proporcionado pelo Si, também foi observado por Pereira et al. (2018) em um estudo com *V. unguiculata*.

A redução na ETR observada nas mudas de *S. amazonicum*, causada pelo aumento das doses de Zn, foi semelhante à observada por Santos et al. (2019) em *G. max*. A inibição da ETR , devido a danos no aparato fotossintético, provocados pelo excesso de metal, compromete a transferência de elétrons do receptor primário de plastoquinona (Qa) para o receptor secundário de plastoquinona (Qb) no lado aceitador do PSII, causando, assim, uma redução no Φ_{PSII} (SHU et al., 2016). Isto indica que os elétrons foram mais usados em processos secundários, como a fotorrespiração e menos em processos primários, como reduções de NADP^+ durante a fixação bioquímica de CO_2 (SILVA et al., 2012). Entretanto, as mudas de *S. amazonicum* tratadas com

Si, apresentaram um incremento na *ETR*, concomitantemente com uma elevação de $\Phi PSII$, o que indica, de acordo com Samaniego-Gómez et al. (2016), um efeito positivo na proteção dos fotossistemas contra os efeitos danosos das altas doses de Zn, devido ao receptor Qa se apresentar muito oxidado e sua energia de excitação ser usada no transporte de elétrons para o Qb, evitando danos fotooxidativos provocados por espécies reativas de oxigênio.

A redução dos teores de CHL *a*, causada pelo excesso de Zn na solução nutritiva, pode ser explicada devido os altos níveis desse metal diminuírem, nos cloroplastos, a disponibilidade de NADPH (MOUSAVI, 2011), um dos substratos da enzima divinil clorofilida α 8-vinil-redutase, que é responsável pela síntese de CHL *a* (PARHAM; REBEIZ, 1995), e também limitar os processos de absorção, transporte e utilização de Mg^{2+} e Fe^{2+} , substituir o Mg^{2+} em moléculas de clorofila (MATEOS-NARANJO et al., 2018), reduzir a disponibilidade da glutamina (SMIRNOFF; STEWART, 1987), inibir a atividade da enzima δ -aminolevulínico-desidratase e a função do protoclorofila redutase (JIANG; YANG; ZHANG, 2007).

O decréscimo do teor de CHL *b*, causado pelo excesso de Zn, pode ser explicado, de acordo com Santos et al. (2019), pelo estresse oxidativo induzido pelo excesso de produção de espécies reativas de oxigênio, pois estas substâncias são tóxicas para os cloroplastos (PAULA et al., 2015). Devido as reduções dos valores de CHL *a* e CHL *b*, houve a diminuição dos teores de CHL Total observado nas mudas de *S. amazonicum*, sob excesso de zinco.

A diminuição da CHL *a*/CHL *b*, provocada pelas elevadas doses de zinco, pode acontecer porque os metais pesados causam a transformação da CHL *a* em CHL *b*, pela oxidação do grupo metil, presente no anel II da CHL *a*, para aldeído, que provoca a formação de CHL *b*. (SHAKYA; CHETTRI; SAWIDIS, 2008). O decréscimo dos valores dessa relação é considerado um sintoma comum de toxicidade por metais pesados (TIECHER et al., 2016b). Santos et al. (2019), em um estudo com *G. max*, e Andrejić et al. (2018), em um experimento com *Miscanthus Giganteus*, também observaram a redução da CHL *a*/CHL *b* quando as plantas foram submetidas à elevadas doses de zinco.

Os altos níveis de Zn podem ter causado a redução nos teores de CAR, por afetarem a disponibilidade de licopeno, que é o substrato da enzima licopeno ciclase, cuja função é promover a ciclagem e produção de CAR, tais como α e β -caroteno (CUNNINGHAM et al., 1996). Os CAR são importantes para o processo fotossintético, pois influenciam no ciclo da zeaxantina, que participa da regulação da dissipação de calor no PSII e evita a sua fotodegradação, quando este sofre uma sobrecarga energética (NOGUEIRA et al., 2013). Paula et al. (2015) também observaram esse efeito do zinco nos CAR em um experimento com *Z. Mays*.

A diminuição na relação CHL Total/CAR mostra que, segundo Tiecher et al. (2017), ocorreu estresse na planta, provocado pelo aumento das doses do metal aplicadas à solução. A redução desta relação pode indicar um potencial dano fotooxidativo causado por alta irradiação, pois a clorofila tende a ser fotooxidada com alta radiação luminosa e os CAR podem impedir essa fotooxidação (LEE; HENDRY; GRIME, 1993). Essa característica também foi verificada Santos et al. (2019), em experimento com *G. max*.

As mudas que foram tratadas com silício apresentaram maiores teores de pigmentos fotossintéticos, pois esse elemento, possivelmente, aumenta a absorção de Fe^{2+} e Mg^{2+} , diminui a absorção de zinco e reduz a produção e a acumulação, nos tecidos foliares, de espécies reativas de oxigênio que causam danos oxidativos nas estruturas e nas funções das membranas dos tilacóides. (ANWAAR et al., 2015; EMAMVERDIAN et al., 2018a; LI et al., 2018, 2015; MEHRABANJOUBANI et al., 2015; PINTO et al., 2009; SHI et al., 2018). O efeito benéfico do silício nos pigmentos fotossintéticos também foi observado em *Z. Mays* cultivado em um substrato com alta concentração de zinco (PAULA et al., 2015)

3.5 Conclusão

O aumento das concentrações de Zn na solução nutritiva causou a redução da fotossíntese em folhas *S. amazonicum*, com efeitos principalmente associados à limitação fotoquímica e à redução na capacidade de fixação de CO_2 no mesófilo.

As trocas gasosas, a fluorescência da clorofila *a* e o teor de pigmentos fotossintéticos mostraram-se como bons parâmetros para avaliar o estresse causado pelo excesso de zinco em mudas de *S. amazonicum*.

O silício atenuou a toxicidade, provocada pelas elevadas doses de zinco, em mudas de *S. amazonicum*, proporcionando efeitos positivos nos teores de pigmentos fotossintéticos, na fluorescência da clorofila *a* e nas trocas gasosas, indicando que o Si pode ser utilizado para aumentar a tolerância de plantas aos efeitos nocivos desse metal.

3.6 Referências

- ABBAS, M. S. et al. Effectiveness of Zinc and Gypsum Application Against Cadmium Toxicity and Accumulation in Wheat (*Triticum aestivum* L.). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 48, n. 14, p. 1659–1668, 6 ago. 2017.
- ALVES, P. L. D. C. A.; MAGALHÃES, A. C. N.; BARJA, P. R. The phenomenon of photoinhibition of photosynthesis and its importance in reforestation. **Botanical Review**, v. 68, n. 2, p. 193–208, 2002.
- ANDRADE, A. V. N. et al. Growth of *Schizolobium amazonicum* (Huber ex Ducke) seedlings inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi. **Floresta**, v. 49, n. 4, p. 651–660, 2019.
- ANDREJIĆ, G. et al. Zinc accumulation, photosynthetic gas exchange, and chlorophyll a fluorescence in Zn-stressed *Miscanthus × giganteus* plants. **Photosynthetica**, v. 56, n. 4, p. 1249–1258, 21 dez. 2018.
- ANJUM, S. A. et al. Alteration in Growth, Leaf Gas Exchange, and Photosynthetic Pigments of Maize Plants Under Combined Cadmium and Arsenic Stress. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 228, n. 1, 2017.
- ANWAAR, S. A. et al. Silicon (Si) alleviates cotton (*Gossypium hirsutum* L.) from zinc (Zn) toxicity stress by limiting Zn uptake and oxidative damage. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 5, p. 3441–3450, 18 mar. 2015.
- ASHFAQUE, F. et al. Response of silicon on metal accumulation, photosynthetic inhibition and oxidative stress in chromium-induced mustard (*Brassica juncea* L.). **South African Journal of Botany**, v. 111, p. 153–160, 1 jul. 2017.
- AYANGBENRO, A.; BABALOLA, O. A New Strategy for Heavy Metal Polluted Environments: A Review of Microbial Biosorbents. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 14, n. 1, p. 94, 19 jan. 2017.
- BARBOSA, T. P. et al. Crescimento e qualidade de mudas de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* em diferentes substratos. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 62, 2019.
- BROWN, S. L. et al. Zinc and Cadmium Uptake by Hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* Grown in Nutrient Solution. **Soil Science Society of America Journal**, v. 59, n. 1, p. 125, 1995.
- CUNNINGHAM, F. X. et al. Functional analysis of the beta and epsilon lycopene cyclase enzymes of *Arabidopsis* reveals a mechanism for control of cyclic carotenoid formation. **The Plant Cell**, v. 8, n. 9, p. 1613–1626, set. 1996.
- DUTRA, W. F. et al. Introgression of wild alleles into the tetraploid peanut crop to improve water use efficiency, earliness and yield. **PLOS ONE**, v. 13, n. 6, p. e0198776, 11 jun. 2018.
- EMAMVERDIAN, A. et al. Silicon Mechanisms to Ameliorate Heavy Metal Stress in Plants. **BioMed Research International**, v. 2018, p. 1–10, 2018a.

- EMAMVERDIAN, A. et al. Growth Responses and Photosynthetic Indices of Bamboo Plant (*Indocalamus latifolius*) under Heavy Metal Stress. **The Scientific World Journal**, v. 2018, p. 1–6, 15 jul. 2018b.
- FALQUETO, A. R. et al. Características da Fluorescência da Clorofila em cultivares de Arroz com Ciclo Precoce, Médio e Tardio. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, n. 52, p. 579–581, 2007.
- FENG, J. et al. Tolerance and bioaccumulation of combined copper, zinc, and cadmium in *Sesuvium portulacastrum*. **Marine Pollution Bulletin**, v. 131, p. 416–421, jun. 2018.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e agrotecnologia**, v. 38, n. 2, p. 109–112, 2014.
- FLORA, C. et al. Silicon alleviates long-term copper toxicity and influences gene expression in *Nicotiana tabacum*. **Journal of Plant Nutrition**, v. 42, n. 8, p. 864–878, 9 maio 2019.
- FONSECA, V. A. et al. Morpho-physiology, yield, and water-use efficiency of *Opuntia ficus-indica* irrigated with saline water. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 41, n. 1, 2019.
- GENTY, B.; BRIANTAIS, J. M.; BAKER, N. R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. **Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects**, v. 990, n. 1, p. 87–92, 1989.
- HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. **The water culture method for growing plants without soils**. 2. ed. Berkeley: California Agricultural Experimental Station, 1950. v. 347
- JAN, S. et al. Interactive effect of 24-epibrassinolide and silicon alleviates cadmium stress via the modulation of antioxidant defense and glyoxalase systems and macronutrient content in *Pisum sativum* L. seedlings. **BMC Plant Biology**, v. 18, n. 1, 16 jul. 2018.
- JIANG, H. M.; YANG, J. C.; ZHANG, J. F. Effects of external phosphorus on the cell ultrastructure and the chlorophyll content of maize under cadmium and zinc stress. **Environmental Pollution**, v. 147, n. 3, p. 750–756, 1 jun. 2007.
- KRAUSE, G. H.; WEIS, E. Chlorophyll Fluorescence and Photosynthesis: The Basics. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 42, n. 1, p. 313–349, jun. 1991.
- LEE, J. A.; HENDRY, G. A. F.; GRIME, J. P. Methods in Comparative Plant Ecology: A Laboratory Manual. **The Journal of Ecology**, v. 81, n. 4, p. 832, dez. 1993.
- LI, L. et al. Exogenous Silicon Mediates Alleviation of Cadmium Stress by Promoting Photosynthetic Activity and Activities of Antioxidative Enzymes in Rice. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 37, n. 2, p. 602–611, 9 jun. 2018.
- LI, P. et al. Silicon ameliorates manganese toxicity by regulating both physiological processes and expression of genes associated with photosynthesis in rice (*Oryza sativa* L.). **Plant and Soil**, v. 397, n. 1–2, p. 289–301, 8 dez. 2015.
- MATEOS-NARANJO, E. et al. Growth and photosynthetic responses to zinc stress of an invasive cordgrass, *Spartina densiflora*. **Plant Biology**, v. 10, n. 6, p. 754–762, nov. 2008.

MATEOS-NARANJO, E. et al. Salinity alleviates zinc toxicity in the saltmarsh zinc-accumulator *Juncus acutus*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 163, p. 478–485, nov. 2018.

MAXWELL, K.; JOHNSON, G. N. Chlorophyll fluorescence—a practical guide. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 345, p. 659–668, abr. 2000.

MEHRABANJOUBANI, P. et al. Impacts of silicon nutrition on growth and nutrient status of rice plants grown under varying zinc regimes. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 27, n. 1, p. 19–29, 21 mar. 2015.

MOUSAVI, S. R. Zinc in crop production and interaction with phosphorus. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 5, n. 9, p. 1503–1509, 2011.

NATALE, W. et al. Resposta de mudas de goiabeira à aplicação de zinco. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 24, n. 3, p. 770–773, dez. 2005.

NOGUEIRA, G. A. S. et al. Physiological and Growth Responses in the (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) Seedlings Subjected to Cadmium Doses. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 8, p. 217–224, 15 jun. 2019.

NOGUEIRA, N. O. et al. Teor de nitrogênio, clorofila e relação clorofila-carotenoide em café arábica em solo submetido a diferentes corretivos de acidez. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 3, p. 390–395, 2013.

OLIVEIRA, A. L. DE B. et al. Comportamento ingestivo de ovinos alimentados com dietas contendo óleo de fritura residual. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 60, n. 1, p. 90–95, 2017.

OUNI, Y. et al. Interactive effect of salinity and zinc stress on growth and photosynthetic responses of the perennial grass, *Polypogon monspeliensis*. **Ecological Engineering**, v. 95, p. 171–179, 2016.

PARHAM, R.; REBEIZ, C. A. Chloroplast biogenesis 72: A [4-vinyl]chlorophyllide a reductase assay using divinyl chlorophyllide a as an exogenous substrate. **Analytical Biochemistry**, v. 231, n. 1, p. 164–169, 1995.

PAULA, L. DE S. et al. Silicon (Si) ameliorates the gas exchange and reduces negative impacts on photosynthetic pigments in maize plants under Zinc (Zn) toxicity. **Australian Journal of Crop Science**, v. 9, n. 10, p. 901–908, 2015.

PER, T. S. et al. Photosynthetic and growth responses of two mustard cultivars differing in phytocystatin activity under cadmium stress. **Photosynthetica**, v. 54, n. 4, p. 491–501, 13 dez. 2016.

PEREIRA, T. S. et al. Silicon deposition in roots minimizes the cadmium accumulation and oxidative stress in leaves of cowpea plants. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 24, n. 1, p. 99–114, 19 jan. 2018.

PEREIRA, Y. C. et al. Brassinosteroids increase electron transport and photosynthesis in soybean plants under water deficit. **Photosynthetica**, v. 57, n. 1, p. 181–191, 30 jan. 2019.

PINTO, S. I. DO C. et al. Silício como amenizador da fitotoxicidade de zinco em plantas jovens de *Eucalyptus urophylla* cultivadas em solução nutritiva. **Revista Árvore**, v. 33, n. 6, p. 1005–1014, dez. 2009.

RIZWAN, M. et al. A critical review on the effects of zinc at toxic levels of cadmium in plants. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 7, p. 6279–6289, 11 mar. 2019a.

ROMEO, S. et al. High Zn concentration does not impair biomass, cutting radial growth, and photosynthetic activity traits in *Populus alba* L. **Journal of Soils and Sediments**, v. 17, n. 5, p. 1394–1402, 5 maio 2017.

ROUTH, P. K. et al. Retrieval of bio-physical parameters in Sunflower crop (*Helianthus annuus*) using field based hyperspectral remote sensing. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, v. 42, n. 3/W6, p. 623–629, 26 jul. 2019.

SAMANIEGO-GÁMEZ, B. Y. et al. *Bacillus* spp. Inoculation improves photosystem II efficiency and enhances photosynthesis in pepper plants. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 76, n. 4, p. 409–416, 2016.

SANTOS, L. R. et al. 24-Epibrassinolide Improves Root Anatomy and Antioxidant Enzymes in Soybean Plants Subjected to Zinc Stress. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 22 out. 2019.

SHAKYA, K.; CHETTRI, M. K.; SAWIDIS, T. Impact of Heavy Metals (Copper, Zinc, and Lead) on the Chlorophyll Content of Some Mosses. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 54, n. 3, p. 412–421, 25 abr. 2008.

SHI, Z. et al. Silicon alleviates cadmium toxicity in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) by reducing cadmium ion uptake and enhancing antioxidative capacity. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 8, p. 7638–7646, 28 mar. 2018.

SHU, S. et al. The role of 24-epibrassinolide in the regulation of photosynthetic characteristics and nitrogen metabolism of tomato seedlings under a combined low temperature and weak light stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 107, p. 344–353, 1 out. 2016.

SILVA, E. N. et al. Coordinate changes in photosynthesis, sugar accumulation and antioxidative enzymes improve the performance of *Jatropha curcas* plants under drought stress. **Biomass and Bioenergy**, v. 45, p. 270–279, out. 2012.

SILVESTRE, W. V. D. et al. Differential tolerance to water deficit in two açai (*Euterpe oleracea* Mart.) plant materials. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 39, n. 1, 1 jan. 2017.

ŠIMKOVÁ, L. et al. The Effect of Silicon on the Activity and Isozymes Pattern of Antioxidative Enzymes of Young Maize Roots under Zinc Stress. **Silicon**, v. 10, n. 6, p. 2907–2910, 6 nov. 2018.

SIMS, D. A.; GAMON, J. A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n. 2–3, p. 337–354, 2002.

SMIRNOFF, N.; STEWART, G. R. Glutamine synthetase and ammonium assimilation in roots

of zinc-tolerant and non-tolerant clones of *Deschampsia cespitosa* (L.) Beauv. And *Anthoxanthum odoratum*. **New Phytologist**, v. 107, n. 4, p. 659–670, dez. 1987.

SZOPIŃSKI, M. et al. Toxic Effects of Cd and Zn on the Photosynthetic Apparatus of the *Arabidopsis halleri* and *Arabidopsis arenosa* Pseudo-Metallophytes. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, 6 jun. 2019.

TIECHER, T. L. et al. Effects of zinc addition to a copper-contaminated vineyard soil on sorption of Zn by soil and plant physiological responses. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 129, p. 109–119, 1 jul. 2016a.

TIECHER, T. L. et al. Physiological and nutritional status of black oat (*Avena strigosa* Schreb.) grown in soil with interaction of high doses of copper and zinc. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 106, p. 253–263, 1 set. 2016b.

TIECHER, T. L. et al. Tolerance and translocation of heavy metals in young grapevine (*Vitis vinifera*) grown in sandy acidic soil with interaction of high doses of copper and zinc. **Scientia Horticulturae**, v. 222, p. 203–212, 19 ago. 2017.

WANG, W. HONG et al. Ramie (*Boehmeria nivea*)’s uranium bioconcentration and tolerance attributes. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 184–185, p. 152–157, abr. 2018.

ZHANG, K. et al. Physiological properties and chlorophyll biosynthesis in a Pak-choi (*Brassica rapa* L. ssp. *chinensis*) yellow leaf mutant, pylm. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 39, n. 1, 1 jan. 2017.

ZHOU, M.-X. et al. NaCl impact on *Kosteletzkya pentacarpos* seedlings simultaneously exposed to cadmium and zinc toxicities. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 18, p. 17444–17456, 14 jun. 2018.

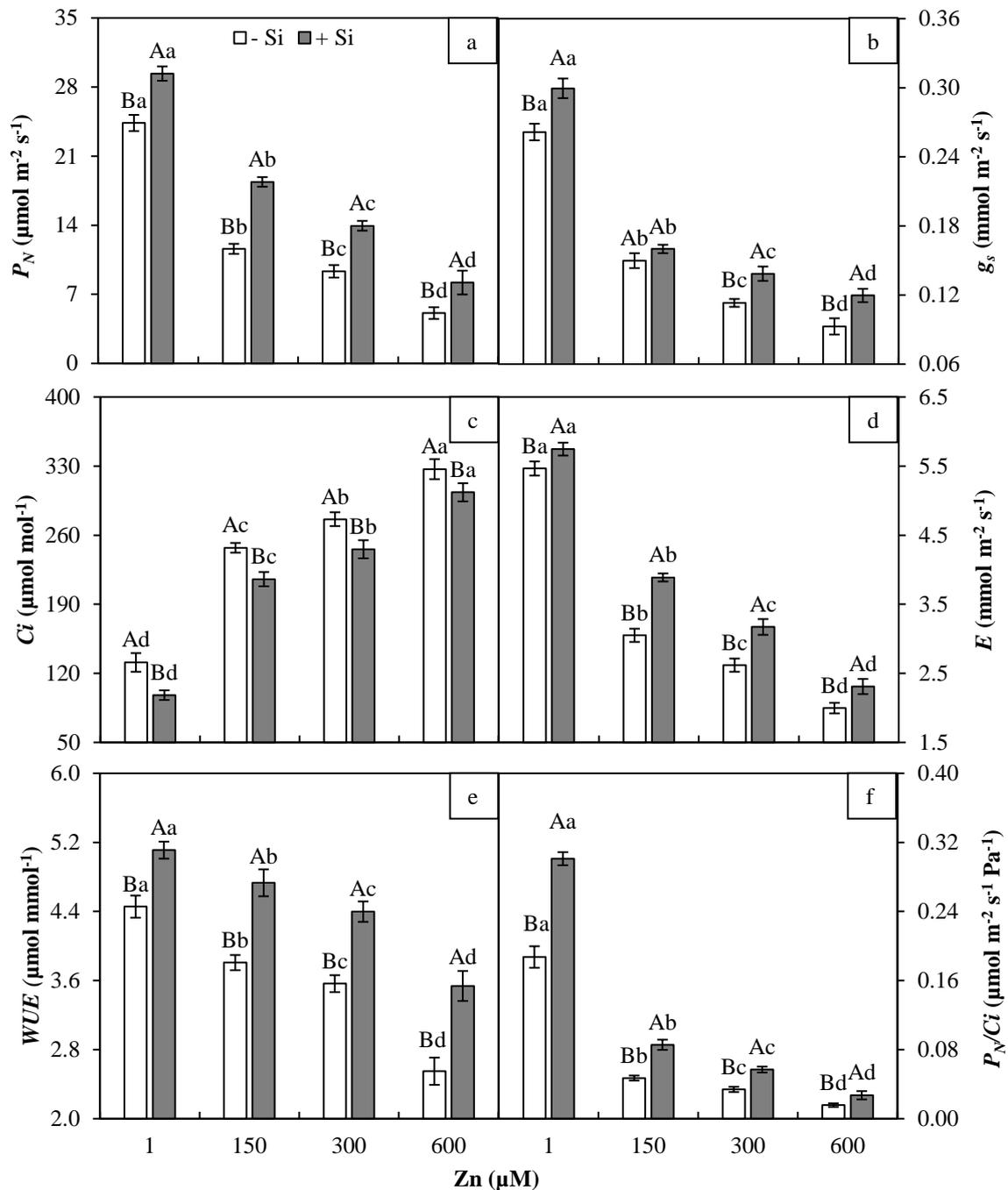


Figura 1 - (a) Taxa de assimilação líquida de CO_2 (P_N), (b) condutância estomática (g_s), (c) concentração intercelular de CO_2 (C_i), (d) transpiração foliar (E), (e) eficiência do uso da água (WUE) e (f) eficiência instantânea de carboxilação (P_N/C_i) em plantas de *S. amazonicum* tratadas com Si e expostas à toxicidade de Zn. Letras maiúsculas diferentes entre tratamentos de Si (0 e 1.5 mM Si sob mesma concentração de Zn) e letras minúsculas entre tratamentos de Zn (1, 150, 300 e 600 μM Zn sob mesma concentração de Si) indicam diferenças significativas pelo teste de Scott-Knott ($P < 0.05$). Colunas descritas correspondem à médias de cinco repetições e DP.

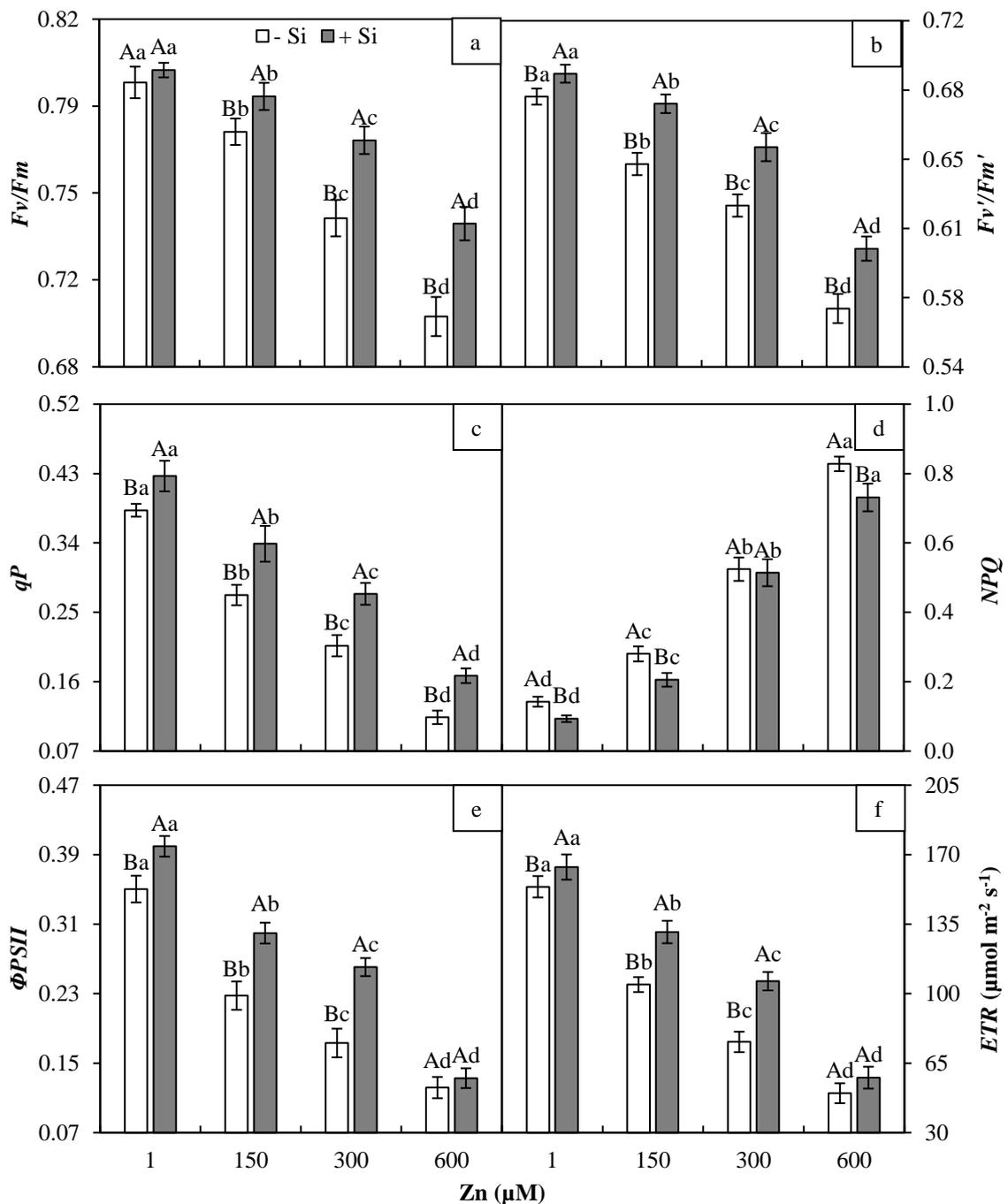


Figura 2 - (a) Eficiência fotoquímica máxima do PSII (F_v/F_m), (b) eficiência fotoquímica efetiva do PSII (F_v/F_m'), (c) coeficiente de extinção fotoquímico (q_p), (d) coeficiente de extinção não-fotoquímico (NPQ), (e) rendimento quântico do PSII (Φ_{PSII}) e (f) taxa de transporte de elétrons (ETR) em plantas de *S. amazonicum* tratadas com Si e expostas à toxicidade de Zn. Letras maiúsculas diferentes entre tratamentos de Si (0 e 1.5 mM Si sob mesma concentração de Zn) e letras minúsculas entre tratamentos de Zn (1, 150, 300 e 600 μM Zn sob mesma concentração de Si) indicam diferenças significativas pelo teste de Scott-Knott ($P < 0.05$). Colunas descritas correspondem à médias de cinco repetições e DP.

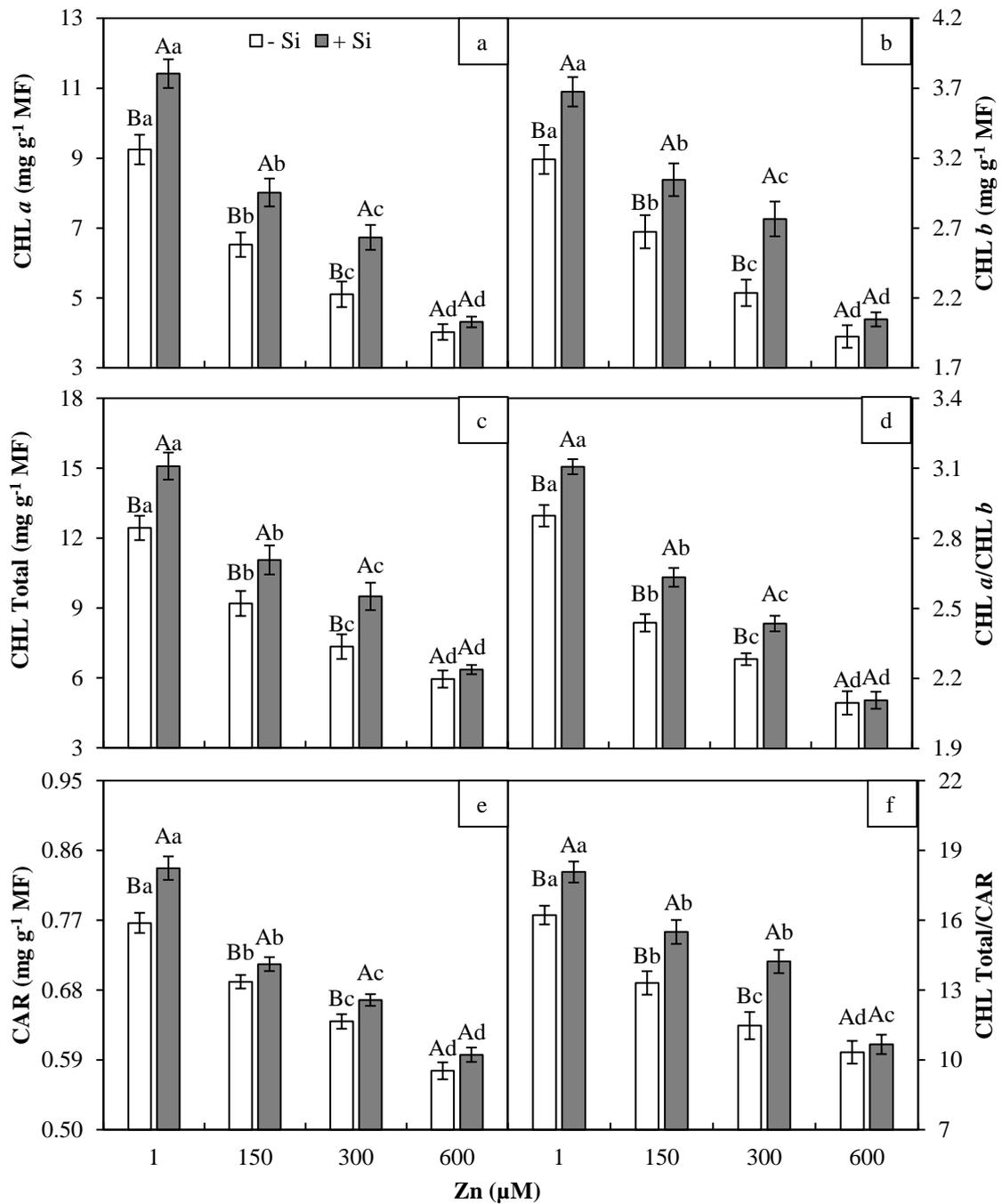


Figura 3 - (a) Clorofila *a* (CHL *a*), (b) clorofila *b* (CHL *b*), (c) clorofila total (CHL Total), (d) relação entre as clorofilas *a* e *b* (CHL *a*/CHL *b*), (e) Carotenóides (CAR) e (f) relação entre clorofila total e carotenóides (CHL Total/CAR) em plantas de *S. amazonicum* tratadas com Si e expostas à toxicidade de Zn. Letras maiúsculas diferentes entre tratamentos de Si (0 e 1.5 mM Si sob mesma concentração de Zn) e letras minúsculas entre tratamentos de Zn (1, 150, 300 e 600 μM Zn sob mesma concentração de Si) indicam diferenças significativas pelo teste de Scott-Knott ($P < 0.05$). Colunas descritas correspondem à médias de cinco repetições e DP.

CONCLUSÕES GERAIS

O excesso de zinco causa diminuição no crescimento e na absorção de macro e micro nutrientes, provoca limitações fotoquímicas, inibe a capacidade de fixação de CO₂ no mesófilo e diminuí o teor de pigmentos fotossintéticos nas folhas de *S. amazonicum*, acarretando em redução do desempenho fotossintético da planta.

O *S. amazonicum* mostrou-se promissor para ser utilizado como fitorremediador de áreas contaminadas com zinco.

O tratamento das mudas de *S. amazonicum* com Si atenuou os efeitos da toxicidade causados pelo excesso de Zn no crescimento, no estado nutricional, na tolerância ao metal, nas trocas gasosas, na fluorescência da clorofila *a* e no teor de pigmentos fotossintéticos, indicando que esse elemento benéfico pode ser utilizado para aumentar o potencial fitorremediador da desta planta em ambientes contaminados com zinco.