

Artigo

Selênio na fisiologia de plantas de milho submetidas ao estresse por cádmio

Jessica Suellen Silva Teixeira¹, Keila Beatriz Silva Teixeira², Gerson Diego Pamplona Albuquerque³, Juscelino Gonçalves Palheta⁴, Diana Jhulia Palheta de Sousa⁵, Luma Castro de Souza^{6,*}, Cândido Ferreira de Oliveira Neto⁷, Ricardo Shigueru Okumura⁸

¹ Agrônoma, Mestre, Universidade Federal Rural da Amazônia/UFRA, Av. Tancredo Neves, nº 2501, Terra Firme, Cep: 66.077-830, Belém-PA, ORCID 0000-0001-9004-6894, jessicassteixeira27@gmail.com

² Agrônoma, Graduanda, Universidade Federal Rural da Amazônia/UFRA, Av. Tancredo Neves, nº 2501, Terra Firme, Cep: 66.077-830, Belém-PA, 0000-0001-6458-6619, keilabeatriz50@gmail.com

³ Agrônomo, Doutorando, Universidade Federal Rural da Amazônia/UFRA, Av. Tancredo Neves, nº 2501, Terra Firme, Cep: 66.077-830, Belém-PA, 0000-0002-7982-8817, gdpa88@gmail.com

⁴ Agrônomo, Doutor, Universidade Federal Rural da Amazônia/UFRA, Av. Tancredo Neves, nº 2501, Terra Firme, Cep: 66.077-830, Belém-PA, ORCID 0000-0002-8726-6308, juscegoncalves@hotmail.com

⁵ Agrônoma, Doutoranda, Universidade Federal de Viçosa/UFV, Av. P H Rolfs, s/n, Campus Universitário, 36570-900, Viçosa-MG, ORCID 0000-0002-8050-7260, dianajhuliap@gmail.com

⁶ Agrônoma, Mestre, Universidade Federal do Maranhão/UFMA, BR-222, s/n, Bos Vista, CEP: 65500-000, Chapadinha-MA, ORCID 0000-0002-4500-4035, lumasouza30@hotmail.com

⁷ Agrônomo, Doutor, Professor Adjunto, Universidade Federal Rural da Amazônia/UFRA, Av. Tancredo Neves, nº 2501, Terra Firme, Cep: 66.077-830, Belém-PA, ORCID 0000-0002-6070-0549, candidooliveira-neto@gmail.com

⁸ Agrônomo, Doutor, Universidade Federal Rural da Amazônia/UFRA, Rodovia PA 275, Zona Rural, CEP: 68.515-000, Parauapebas-PA, ORCID 0000-0002-5079-3980, ricardo_okumura@hotmail.com.

* Correspondência: lumasouza30@hotmail.com

Citação: Castro, L.; Teixeira, J.S.S.; Teixeira, K.B.S.; Albuquerque, G.D.P.; Palheta, J.G.; Souza, D.J.P.de; Brito, A.E.deA.; Oliveira Neto, C.F.de; Okumura, R.S. Selênio na fisiologia de plantas de milho submetidas ao estresse por cádmio. *RBCA*, 2024, 13, 2, p.1-9.

Editor de Seção: Karen Janones da Rocha

Recebido: 13/05/2024

Aceito: 03/06/2024

Publicado: 24/06/2024

Nota do editor: A RBCA permanece neutra em relação às reivindicações jurisdicionais em sites publicados e afiliações institucionais.



Copyright: © 2024 pelos autores. Enviado para possível publicação em acesso aberto sob os termos e condições da licença Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Cadmium (Cd) is easily absorbed by the plant, being able to cause growth inhibition, due to the damage caused to the photosynthetic process. Selenium (Se) is a beneficial element that has the ability to increase the tolerance of plants to various biotic and abiotic stresses. Given the above, the objective of the work was to evaluate the effect of selenium on the photosynthetic performance of corn plants, under cadmium stress conditions. Using hybrid corn seeds (K9606 VIP 3) treated with selenium in concentrations of 0.0; 1.5; 3.0 and 5.0 mg L⁻¹ of Se in the form of Na₂O₃Se, and subjected to different dosages of cadmium (0.0; 1.3; 3.0 and 4.5 mg. L⁻¹) in the form of CdCl₂. The following were evaluated: net CO₂ assimilation rate (A); stomatal conductance (gs); sweating (E); intercellular CO₂ concentration (Ci); instant carboxylation efficiency (EiC A / Ci); instant water use efficiency (USA); carotenoid contents; chlorophyll a (Chl a), b (Chl b) and total (Chl). The experimental design was completely randomized in a 4 x 4 factorial scheme, with four replications. The presence of 4.5 mg L⁻¹ Cd reduced A, EiC, the levels of Chl a, Chl b and Chl and promoted increases in the levels of carotenoids. In general, pretreatment with Se before exposure to Cd helped to alleviate the deleterious effects induced by cadmium, through increases in the levels of Chl a, Chl b and Chl and reduction in carotenoids, mainly in the dose of 3 and 5 mg L⁻¹ from Se.

Keywords: Pigments; Photosynthesis; Attenuation; Abiotic stress.

Resumo: O cádmio (Cd) é facilmente absorvido pela planta, sendo capaz de provocar a inibição do crescimento, em decorrência dos danos causados ao processo fotossintético. O selênio (Se) é um

elemento benéfico que pode aumentar a tolerância das plantas aos diversos estresses bióticos e abióticos. Diante do exposto, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito do Se sobre o desempenho fotossintético de plantas de milho, em condições de estresse por Cd. Foram utilizadas sementes de milho híbrido (K9606 VIP 3) tratadas com Se nas concentrações de 0,0; 1,5; 3,0 e 5,0 mg L⁻¹ de Se na forma de Na₂O₃Se, e submetidas a diferentes dosagens de Cd (0,0; 1,3; 3,0 e 4,5 mg L⁻¹) na forma de CdCl₂. Foram avaliados: a taxa de assimilação líquida de CO₂ (A); condutância estomática (gs); transpiração (E); concentração de CO₂ intercelular (Ci); eficiência instantânea de carboxilação (EiC A/Ci); eficiência instantânea de uso da água (EUA); teores de carotenoides; clorofila a (Chl a), b (Chl b) e total (Chl). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 4 × 4, com quatro repetições. A presença de 4,5 mg L⁻¹ Cd reduziu a A, EiC, os teores de Chl a, Chl b e Chl e promoveu acréscimos nos teores de carotenoides. Em geral, o pré-tratamento com Se promoveu a amenização dos efeitos deletérios induzido pelo cádmio, através de incrementos nos teores de Chl a, Chl b e Chl e redução nos carotenoides, principalmente, nas doses de 3 a 5 mg L⁻¹ de Se.

Palavra-chave: Pigmentos; Fotossíntese, Atenuação, Estresse abiótico.

1. Introdução

O milho (*Zea mays* L.) é uma cultura produzida em todas as regiões, sua importância econômica é caracterizada pelas diversas formas de utilização, na segurança alimentar, humana e animal, devido suas elevadas qualidades nutricionais (Miranda, 2018). Atualmente, o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho ficando atrás somente dos Estados Unidos e da China (Usda, 2019). O uso contínuo de adubação fosfatadas em virtude do aumento de áreas plantadas e produção, permitem a acumulação de variadas concentrações de cádmio (Cd) nos solos.

O Cd apresenta alta mobilidade e embora não seja essencial para as plantas, seus íons são facilmente absorvidos pelas raízes, podendo danificar a clorofila e inibir a atividade de várias enzimas funcionais, afetando o rendimento e a qualidade das plantas (Zacchini *et al.*, 2009; He *et al.*, 2011; Rizwan *et al.* 2016). Além disso, o Cd influencia a transpiração, a condutância estomática e a concentração intercelular de CO₂ nas plantas (Zouari *et al.*, 2016; Nikolić *et al.*, 2017).

Portanto, têm-se procurado estratégias que visem diminuir ou inibir a absorção do Cd presentes no solo pelas plantas, mitigando os efeitos tóxicos deste metal, e otimizando assim, o uso dos recursos naturais e a produção de alimentos seguros, principalmente quando se trata do milho, uma cultura mundialmente consumida.

Dentre as estratégias, encontra-se a utilização do selênio (Se), um oligoelemento não essencial capaz de desempenhar um papel importante no crescimento e desenvolvimento das plantas, em baixas concentrações pode aumentar a capacidade destas em resistir ao estresse e aumentar a fotossíntese, aliviando a toxicidade de metais pesados (Kaur *et al.*, 2014). Estudos mostraram que existe um antagonismo entre o Cd e o Se em plantas, onde o Se pode inibir a absorção de Cd, diminuindo assim, os efeitos tóxicos deste elemento nas plantas (Lin, 2011; Liu *et al.*, 2015).

Entre as formas de aplicação de Se, encontra-se o priming em sementes que se caracteriza por ser fácil, prático e de baixo custo, sendo considerado um mecanismo promissor para o aumento dos níveis de Se, aumentando desta forma a resistência das plantas às diversas condições de estresse (Ahmad *et al.*, 2015a).

Diante do exposto, o objetivo foi avaliar o selênio sobre o desempenho fotossintético de plantas de milho, em condições de estresse por cádmio.

2. Material e Métodos

2.1 Local do experimento

O experimento foi conduzido no Laboratório de Estudos em Biodiversidades de Plantas Superiores (EBPS) do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) em Belém - Pará (01°27'21" S, 48°30'16" W). O experimento foi montado em ambiente controlado, com temperatura de 25 ± 2 °C medidas no termo-hidrômetro. Conforme a classificação climática de Köppen, o clima da região onde o experimento foi conduzido é do tipo Af (Floresta tropical), com precipitação média anual de 2921,7 mm, temperatura média de 25,9 °C, umidade relativa média de 86.8% e velocidade do vento de $1,35 \text{ m s}^{-1}$ (Ramos, Santos, Fortes, 2009).

2.2 Tratamento das sementes

Utilizou-se sementes de milho híbrido (K 9606 VIP 3), da empresa KWS sementes (KWS SAAT SE & Co. KGaA), resistente a fusariose, a Puccinia sorghi, a Physopella zea e a diplodia macrospora, apresenta alta estabilidade produtiva, alto rendimento, ciclo precoce de 820 GD (graus-dias) e a altura da planta varia entre 225 – 240 cm (Kws, 2019).

As sementes foram distribuídas entre duas folhas de papel germitest embebidas em solução de selenito de sódio ($\text{Na}_2\text{O}_3\text{Se}$) nas concentrações de 1,5; 3,0 e 5,0 mg L^{-1} de Se por um período de 24h a 25 ± 2 °C. Para o tratamento controle as sementes foram colocadas para embeber em água destilada por 24h na mesma temperatura, posteriormente foram cobertas com saco plástico transparente, para evitar a perda de água.

2.3 Coleta, caracterização e preparação do solo

Utilizou-se como substrato, solo com textura média, coletado na camada de 0 – 20 cm em área adjacente a Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), no município de Belém, Pará. As amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas, e passadas em peneira com malha de 4 mm de abertura, homogeneizadas na proporção de 5:1 de solo para adubo orgânico, contendo terra preta, caroço de açaí triturado e cama aviário (3:1:1, v/v/v). As características químicas da amostra de solo após a homogeneização encontram-se no quadro abaixo. Utilizou-se a metodologia da Embrapa para realização da análise do solo (EMBRAPA, 1997).

Quadro 1. Atributos químicos do solo utilizados como substrato.

pH (CaCl ₂)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	H ⁺	Al ³⁺	H ⁺ + Al ³⁺	CTC	SB	V	m
mmolc/dm ³								%			
6	32	20	27,6	0,6	20	-	20	100,2	80,2	80	23
COT	P resina	S	B	Fe ²⁺	Mn ²⁺	Zn ²⁺	Co	Mo	N	-	-
g/dm ³								ppm			
13	71	24	2,25	134	24,4	27,5	0,60	8	2850,7	-	-

pH – potencial hidrogeniônico; Ca²⁺ - cálcio; Mg²⁺ – magnésio; K⁺ - potássio; Na⁺ - sódio; Al³⁺ - alumínio; H⁺ + Al³⁺ - hidrogênio mais alumínio; CTC – capacidade de troca de cátions; SB – soma de bases; V – saturação por bases; m – saturação por alumínio; COT – carbono orgânico trocável; P resina – fosforo; S – enxofre; B – boro; Fe²⁺ - ferro; Mn²⁺ - manganês; Zn²⁺ - zinco; Co – cobalto; Mo – molibdênio; N – nitrogênio.

O substrato foi pesado, separado em amostras de 6 kg e acondicionado em vasos de polietileno de 8L, foram utilizados 64 vasos, divididos em 4 tratamentos, um controle, sem adição de Cd e 3 tratamentos com o contaminante, onde foram adicionadas concentrações de CdCl₂·2,5H₂O de grau analítico para estabelecer os níveis de Cd de 1,3, 3,0 e 4,5 mg L^{-1} .

As doses foram determinadas a partir dos valores de prevenção, investigação e 1,5 vezes o valor de investigação, conforme a resolução n.º 420 do Conama, que dispõe sobre valores orientadores de qualidade do solo (Brasil, 2009). O conteúdo dos vasos após contaminado permaneceu 50 dias em repouso para que as reações entre o metal adicionado e a terra fossem estabilizadas.

2.4 Condução do experimento

Após o período de incubação, foram semeadas 5 sementes previamente tratadas com Se em cada vaso, sendo mantidos com 80% da capacidade de campo mediante irrigação diárias para complementação da água perdida por evapotranspiração, 7 dias após o semeio (DAS) foi realizado o primeiro desbaste, deixando duas plantas de milho em cada vaso e o segundo desbaste ocorreu aos 10 DAS, permanecendo uma planta por vaso até 35 DAS, quando houve a realização das avaliações.

2.5 Trocas gasosas

As medidas de trocas gasosas foram realizadas na 4ª folha completamente expandida do ápice para a base. As variáveis, taxa de assimilação fotossintética líquida por unidade de área (A), condutância estomática (gs), taxa de transpiração (E), eficiência do uso da água (EUA; (A/E)) e eficiência instantânea de carboxilação (A/Ci) foram determinadas por analisador de gás por infravermelho (IRGA) modelo portátil (LI-6400XT, LI-COR Biosciences Inc., Lincon, Nebraska, USA). As medições foram realizadas entre 09:00 e 11:00 a.m., utilizando radiação fotossinteticamente ativa (PAR) constante (1000 $\mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$), concentração constante de CO_2 (400ppm), temperatura e umidade ambiente.

2.6 Determinação dos teores dos pigmentos fotossintéticos

Pesou-se 100 mg de tecido fresco de cada amostra, posteriormente foram maceradas em almofariz com pistilo, utilizando-se como solução extratora 5 ml de metanol 80% gelado. Os extratos foram transferidos para tubos de ensaio e centrifugados a 2500 rpm, durante 5 minutos. Transferiu-se o sobrenadante para um balão volumétrico de 25 ml e o volume foi aferido com metanol 80%, as leituras de absorbância (A) das amostras foram efetuadas em espectrofotômetro UV-visível, resolução de ± 2 nm (Modelo SP 220, Biospectro) nos comprimentos de onda de 653 e 666 nm para as clorofilas e 470 nm para os carotenoides.

A partir dos dados de absorbâncias e fatores de diluição (FD) realizou-se a quantificação dos teores de clorofila a (Chl a), b (Chl b), clorofila total (Ca + Cb) e carotenoides totais (xantofilas + carotenos; x + c) (Lichtenthaler, 1987), sendo os resultados expressos em micrograma por grama de massa fresca de tecido foliar ($\mu\text{g g}^{-1}$ MF). Utilizou-se a seguinte equação para a quantificação dos pigmentos fotossintéticos:

$$C_a \text{ (mg g}^{-1} \text{ MF)} = [15,65A_{666\text{nm}} - 7,34A_{653\text{nm}}] \times \text{FD}$$

$$C_b \text{ (mg g}^{-1} \text{ MF)} = [27,05A_{653\text{nm}} - 5,03A_{666\text{nm}}] \times \text{FD}$$

$$C_{x+c} \text{ (mg g}^{-1} \text{ MF)} = \frac{1000A_{470\text{nm}} - 2,86C_a - 129,2C_b}{221} \times \text{FD}$$

2.7 Delineamento experimental e análise estatística

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC), em arranjo fatorial 4×4 , com quatro repetições, com os fatores compreendendo níveis de Se (0 (controle); 1,5; 3,0 e 5,0 mg L^{-1}) e Cd (0 (controle); 1,3; 3,0 e 4,5 mg L^{-1}). Os dados foram analisados, utilizando o software STATISTICA 12.0 (Statsoft, 2014). Os dados foram submetidos a análise de variância pelo teste F e realizou-se a análise de regressão polinomial (superfície de resposta) quando a interação entre os fatores se apresentou significativa ($p < 0,05$).

3. Resultados e Discussão

3.1. Trocas gasosas

Os resultados da análise de variância (Quadro 2) indicaram que a A e a EiC foram influenciadas significativamente pelos efeitos isolados de Cd ($p \leq 0,05$), não sendo observados efeitos significativos para as variáveis g_s , E, Ci e EUA para os fatores Cd, Se e a interação entre eles.

Quadro 2. Resumo da análise de variância em relação a taxa de assimilação líquida de CO₂ (A); condutância estomática (g_s), transpiração (E), concentração de CO₂ intercelular (Ci), eficiência instantânea de carboxilação (EiC) e eficiência do uso da água (EUA) de plantas de milho em função dos níveis de cádmio e selênio.

Causas de variação	A ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	g_s ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	E	Ci ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	EiC $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} /$ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	EUA ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) / ($\text{mmol H}_2\text{O}$ $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Valores de F						
Cd	4.0636*	0.4904 ^{ns}	1.0098 ^{ns}	1.2306 ^{ns}	2.9770*	0.8435 ^{ns}
Se	0.6762 ^{ns}	1.5002 ^{ns}	1.2544 ^{ns}	2.2930 ^{ns}	2.1672 ^{ns}	0.0712 ^{ns}
Cd x Se	1.9576 ^{ns}	0.8175 ^{ns}	0.9308 ^{ns}	1.9856 ^{ns}	1.5215 ^{ns}	0.9151 ^{ns}
Média	24.94	0.17	2.94	130.83	0.22	7.54
CV (%)	12.7	12.1	19.7	9.7	24.7	29.9

Nas Figuras 1A e 1B, estão contidas as médias de A e EiC sob as concentrações de Cd. Mediante aos resultados, constatou-se que a A variou entre 23,05 e 27,94 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e a EiC variou de 0,18 a 0,28 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} / \mu\text{mol mol}^{-1}$, de tal forma que os menores valores resultaram da aplicação de 3 mg L⁻¹ Cd, ao passo que as maiores médias foram obtidas no tratamento controle.

Conforme o estudo de regressão, observou-se que a aplicação de 3 mg L⁻¹ Cd provocou decréscimos na A e na EiC de 17,49 e 37,10%, respectivamente, em relação ao tratamento controle. Nota-se que, independentemente da concentração aplicada de Cd ocorreu a diminuição tanto na A quanto na EiC em comparação ao tratamento controle.

Esses resultados de limitação fotossintética, com o comprometimento da A e EiC, corroboram com os encontrados por Ahmad *et al.* (2015b) e devem-se ao fato de que o estresse induzido pelo Cd pode ter comprometido os processos de abertura e fechamento estomático (Wu; Jong; Lee, 2006). Outro possível motivo seria a interrupção da fase carboxilante da fotossíntese, onde o Cd influencia na diminuição das duas principais enzimas de fixação de CO₂, a ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase (RuBPCase) e a fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPCase) (Krantev *et al.*, 2008).

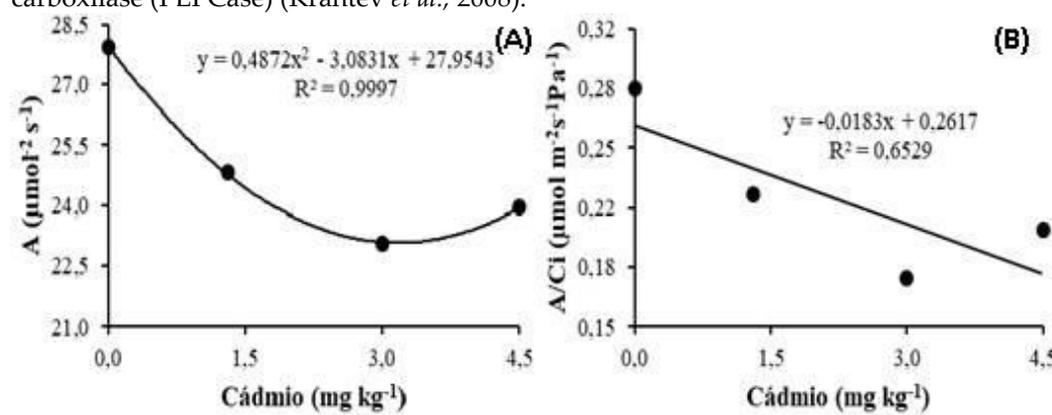


Figura 1. Taxa de assimilação líquida de CO₂ – A (A) e eficiência instantânea de carboxilação – A/Ci (B) de plantas de milho em função das concentrações de cádmio.

3.2. Teores de pigmentos fotossintetizantes

Os resultados da ANOVA (Quadro 3) apresentaram que os teores de Chl a, Chl b, Chl e carotenoides foram influenciados pelos efeitos isolados de Cd e pela interação entre

os fatores de Cd e Se. Apenas os teores de carotenoides sofreram influência do efeito isolado da aplicação de Se ($p \leq 0,01$).

Quadro 3. Resumo da análise de variância em relação aos teores de Clorofila *a*, *b*, total e carotenoides de plantas de milho em função dos níveis de cádmio e selênio.

Causas de variação	Clorofila <i>a</i>	Clorofila <i>b</i>	Clorofila total	Carotenoides
Cd	10.833**	4.4038**	13.611**	3.7412*
Se	0.8462 ^{ns}	0.4084 ^{ns}	1.0891 ^{ns}	5.9219**
Cd x Se	4.5535**	2.2263*	2.3200*	4.5943**
Blocos	0.6035 ^{ns}	3.4593*	0.8507 ^{ns}	0.7476 ^{ns}
Média	0.73	0.67	1.42	134.01
CV (%)	22.5	16.1	20.6	18.9

^{ns} não significativo; ** significativo a 1% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade pelo Teste F. Cd = cádmio; Se = selênio.

A interação entre 5 mg L⁻¹ de Se e 3,0 mg L⁻¹ de Cd originou incrementos nos teores de Chl *a* (Figura 2A), Chl *b* (Figura 2B) e Chl, (Figura 2C) tendo apresentado médias de 1,05; 0,94 e 1,99 mg g⁻¹ MF, respectivamente. A combinação entre os fatores ocasionou acréscimos de 133,33%, 91,84% e 111,70% nas variáveis Chl *a*, Chl *b* e Chl, respectivamente, em comparação ao tratamento controle. Quando analisado o efeito das aplicações de Cd isoladamente, notamos que ocorreu um acréscimo nos teores de Chl *a*, Chl *b* e Chl até a dose de 3,0 mg L⁻¹ de Cd, em relação ao tratamento controle, seguido de um pequeno decréscimo na dose de 4,5 mg L⁻¹ de Cd, sendo estes valores superiores ao tratamento controle.

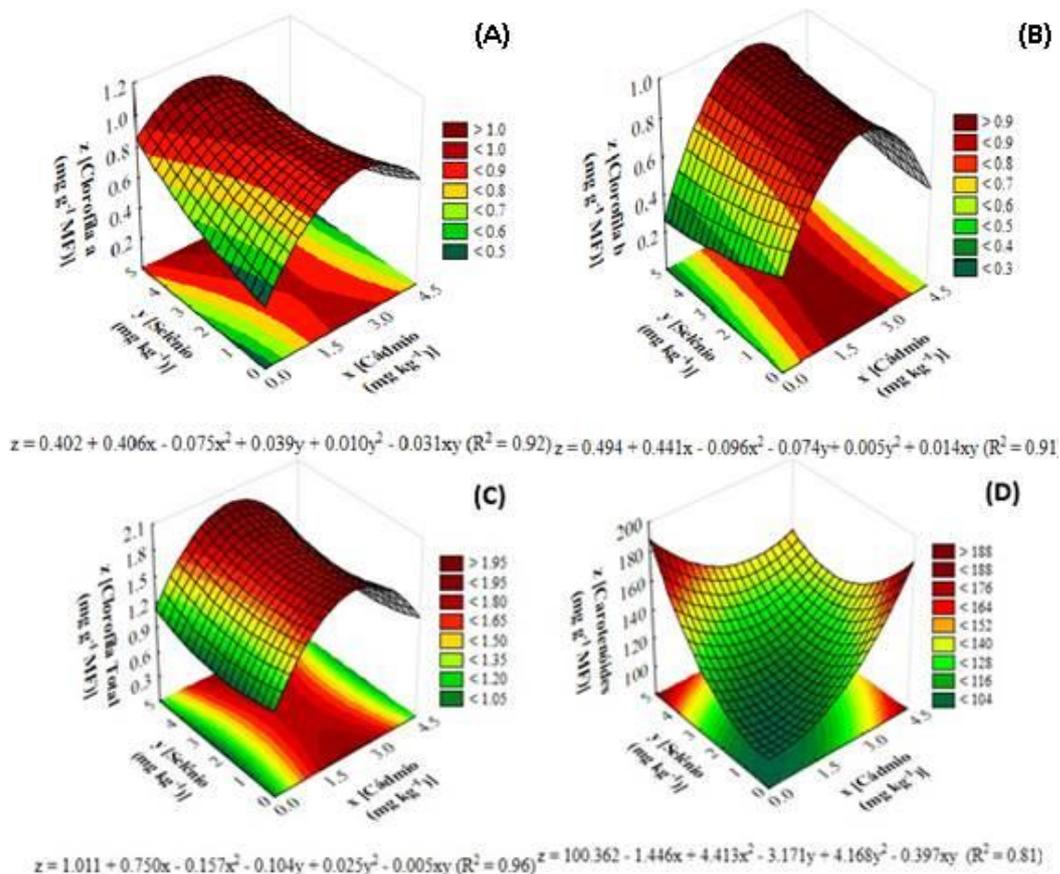


Figura 2. Teores de clorofila *a* (A), clorofila *b* (B), clorofila total (C) e carotenoides (D) de plantas de milho em função da combinação dos níveis de cádmio e selênio

Os teores de carotenoides (Figura 2D) variaram entre 102 a 184 mg g⁻¹ MF para a aplicação de 4,5 mg L⁻¹ de Cd e o tratamento controle, respectivamente. Por meio da análise de regressão é possível notar que ocorreu um acréscimo linear de 80,39% entre o tratamento controle e a dose de 4,5 mg L⁻¹ de Cd. A interação entre os maiores níveis aplicados de Cd e Se proporcionou a média de 151 mg g⁻¹ MF, sendo representado pelo decréscimo de 17,93% em relação ao encontrado na concentração de 4,5 mg L⁻¹ de Cd quando aplicado isoladamente.

O aumento nos teores de Chl a, Chl b e Chl até a dose de 3 mg L⁻¹ de Cd, possivelmente, se deve a uma tentativa de adaptação da planta, sugerindo alguma capacidade das plantas em tolerar o Cd em seus tecidos, em virtude destas concentrações, até a dose indicada, não proporcionarem efeitos adversos de toxidez nas variáveis em questão. O estresse causado pela aplicação de 4,5 mg L⁻¹ de Cd passou a afetar as plantas diminuindo os teores de clorofila, podendo essa redução estar atribuída à inibição de enzimas como o ácido δaminolevulínico desidratase (ALA-desidratase) e protoclorofilida redutase, que estão associadas a biossíntese de clorofila (Parmar; Kumari; Sharma, 2013).

A aplicação de Se combinada com o Cd proporcionou uma recuperação nos teores de Chl a, Chl b e Chl, podendo ter ocorrido devido o fornecimento de níveis adequados de Se ter atuado na proteção das enzimas cloroplastídicas acelerando a biossíntese de clorofilas, aumentando os teores de pigmentos fotossintéticos, auxiliando assim, na proteção do sistema fotossintético (Filek *et al.*, 2010; Feng *et al.*, 2015).

Os resultados a respeito do aumento dos teores de carotenoides em decorrência das aplicações de Cd, podem estar relacionados a uma resposta das plantas ao estresse provocando por este metal, devido às plantas, ao se encontrarem em situação de estresse aumentam suas concentrações de carotenoides, como meio de combater a formação de radicais livres (Pernia *et al.*, 2008).

Nesse sentido, o aumento no teor de carotenoides no tecido foliar das plantas pode estar relacionado com o mecanismo antioxidante. Tendo a interação do Cd com o Se proporcionado uma diminuição nos teores de carotenoides, devido o Se possuir ação antioxidante mitigando os danos induzidos pelo estresse por Cd.

4. Conclusão

A aplicação isolada de Cd afetou a A, EiC, Chl a, Chl b e Chl, principalmente, na dose de 3 mg L⁻¹ de Cd e nos carotenoides na dose de 4,5 mg L⁻¹ de Cd. Entretanto, o Se não causou influência sobre os parâmetros de trocas gasosas, tendo o Cd propiciado o decréscimo destas variáveis.

O Se amenizou os efeitos do estresse por cádmio em plantas de milho sobre a Chl a, Chl b, Chl e carotenoides, podendo desta forma, aumentar a capacidade de defesa antioxidante dessas plantas, sendo as doses de 3 a 5 mg L⁻¹ de Se as que contribuíram para uma melhoria dos efeitos deletérios do Cd.

Contribuição dos autores:

Jessica Suellen Silva Teixeira: A autora contribuiu na elaboração, execução, análise de laboratório, e escrita do artigo, pois faz parte de sua dissertação de mestrado.

Keila Beatriz Silva Teixeira: A autora contribuiu na execução do trabalho durante todo o experimento e nas análises em laboratório e no campo.

Gerson Diego Pamplona Albuquerque: O autor contribui na análise dos dados e na escolha de qual estatística utilizar, além de contribuir na parte intelectual da escrita.

Juscelino Gonçalves Palheta: O autor contribuiu realização das análises no laboratório de bioquímica e na tabulação dos dados.

Diana Jhulia Palheta de Sousa: A autora contribuiu na execução do trabalho durante todo o experimento e nas análises em laboratório e no campo.

Luma Castro de Souza: A autora contribuiu na escrita do artigo, bem como ficou responsável em submeter e realizar as correções necessárias.

Cândido Ferreira de Oliveira Neto: O autor contribuiu na elaboração do tema, na disponibilização do laboratório, dos equipamentos e de todos os reagentes para análise do material vegetal.

Ricardo Shiguero Okumura: O autor contribuiu também na elaboração da proposta, nas correções e contribuições para melhorar o artigo. Além de orientar a primeira autora na dissertação.

Financiamento: Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Agradecimentos: Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Conflitos de interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referência bibliográfica

- Ahmad, R., Waraich, E.A., Nawaz, F., Ashraf, M.Y., Khalid, M. (2015a). Selenium (Se) improves drought tolerance in crop plants– a myth or fact?. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96, 372-380. doi: 10.1002/jsfa.7231.
- Ahmad, P., Sarwat, M., Bhat, N.A., Wani, M.R., Kazi, A.G., Tran, L.P. (2015b). Alleviation of cadmium toxicity in *Brassica juncea* L. (Czern. & Coss.) by calcium application involves various physiological and biochemical strategies. *PLoS One*, 10(1):e0114571. doi: 10.1371/journal.pone.0114571.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. (2009). Resolução no 420. Diário Oficial da República Federativa do Brasil: Brasília, DF, n. 249, p. 81-84. Seção 1.
- EMBRAPA. Manual de Métodos de Análise de Solo. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2. Ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- Feng, T., Chen, S.S., Gao, D.Q., Liu, G.Q., Bai, H.X., Li, A., Peng, L.X., Ren, Z.Y. (2015). Selenium improves photosynthesis and protects photosystem II in pear (*Pyrus bretschneideri*), grape (*Vitis vinifera*), and peach (*Prunus persica*). *Photosynthetica*, 53(4), 609–612. doi: 10.1007/s11099-015-0118-1.
- Filek, M., Zembala, M., Kornaś, A., Walas, S., Mrowiec, H., Hartikainen, H. (2010). The uptake and translocation of macro- and microelements in rape and wheat seedlings as affected by selenium supply level. *Plant and Soil*, 336 (1), 303–312. doi:10.1007/s11104-010-0481-4.
- He, J., Qin, J., Long, L., Ma, Y., Li, H., Li, K., Jiang, X., Liu, T., Polle, A., Liang, Z., Luo, Z. (2011). Net cadmium flux and accumulation reveal tissue-specific oxidative stress and detoxification in *Populus x canescens*. *Physiologia Plantarum*, 143, 50-63. doi: 10.1111/j.1399-3054.2011.01487.x.
- Kaur, N., Sharma, S., Kaur, S., Nayyar, H. (2014). Selenium in agriculture: a nutrient or contaminant for crops?. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2, 1593-1624. doi.org/10.1080/03650340.2014.918258.
- Krantev, A., Yordanova, R., Janda, T., Szalai, G., Popova, L. (2008). Treatment with salicylic acid decreases the effect of cadmium on photosynthesis in maize plants. *Journal of Plant Physiology*, 165 (9), 920-931. doi: 10.1016/j.jplph.2006.11.014.
- KWS. Ficha de Produto K9606 VIP3. Disponível em: https://mediamaster.kws.com/01_Products/BR_Brazil/Productsheets/Mais/k9606_vip3.pdf. Acessado em: 19/12/2019.
- Lichtenthaler, H.K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 349–382. doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1.

- Lin, L. (2011). Mechanism of Selenium on Alleviating Cadmium Toxicity in Rice. Zhejiang Univ.
- Liu, C., Luo, S., Liu, Y. (2015). Effects of Se on Cd content and distribution in rice plant under Cd stress in cold climate. *Journal of Plant Nutrition*, 1,190-199.
- Miranda, R.A. de. (2018). Uma história de sucesso da civilização. *A Granja*, 74(829), 24- 27.
- Nikolić, N., Zoric, L., Cvetkovic, I., Pajevic, S., Borisev, M., Orlovic, S., Pilipovic, A.A. (2017). Assessment of cadmium tolerance and phytoextraction ability in young *Populus deltoides* L. and *Populus x euramericana* plants through morpho-anatomical and physiological responses to growth in cadmium enriched soil. *iForest Biogeosciences & Forestry*, 10, 635-644. doi: <https://doi.org/10.3832/ifor2165-010>.
- Parmar, P., Kumari, N., Sharma, V. (2013). Structural and functional alterations in photosynthetic apparatus of plants under cadmium stress. *Botanical Studies*, 54,1-6. <https://doi.org/10.1186/1999-3110-54-45>.
- Pernia, B., Sousa, A., Reyes, R., Castrillo, M. (2008). Biomarcadores de contaminación por cadmio en las plantas. *INCI Caracas*, 33 (2), 112-119.
- Ramos, A.M., Santos, L.A.R., Fortes, L.T.G. (2009). Normais climatológicas do Brasil 1961-1990. rev. e ampl. Brasília: INMET.
- Rizwan, M., Ali, S., Abbas, T., Zia-Ur-Rehman, M., Hannan, F., Keller, C., Al-Wabel, M., Ok, Y.S. (2016). Cadmium minimization in wheat: a critical review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 130, 43-53. doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.04.001.
- USDA. United States Department of Agriculture. Grain: world markets and trade. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/grain-world-markets-and-trade>. Acesso em: 29 out. 2019.
- Wu, S.M., Jong, K.J., Lee, Y.J. (2006). Relationships Among Metallothionein, Cadmium Accumulation, and Cadmium Tolerance in Three Species. *Bulletin Environmental Contamination and Toxicology*, 76, 595-600. doi: 10.1007/s00128-006-0961-7.
- Zacchini, M., Pietrini, F., Mugnozza, G. S., Iori, V., Pietrosanti, L., Massacci, A. (2009). Metal tolerance, accumulation and translocation in poplar and willow clones treated with cadmium in hydroponics. *Water Air Soil Pollut*, 197, 23-34. doi.org/10.1007/s11270-008-9788-7.
- Zouari, M., Ahmed, C.B., Elloumi, N., Bellassoued, K., Delmail, D., Labrousse, P., Abdallah, F.B., Rouina, B.B. (2016). Impact of proline application on cadmium accumulation, mineral nutrition and enzymatic antioxidant defense system of *Olea europaea* L. cv Chemlali exposed to cadmium stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 128, 195-205. doi: 10.1016/j.ecoenv.2016.02.024.