



MORFOGÊNESE DE GRAMÍNEAS TROPICAIS EXPOSTAS AO CÁDMIO

RESUMO: A exposição ao cádmio (Cd) pode provocar alterações na morfogênese de plantas, entretanto pouco se sabe a respeito dessas alterações na produção vegetal. O presente estudo teve como objetivo avaliar variações na morfogênese e sua influência na produção de gramíneas tropicais, quando os níveis de Cd são aumentados no meio de crescimento. Plantas de 11 gramíneas tropicais foram cultivadas durante 30 dias em solução nutritiva, em duas concentrações de Cd: 0 e 2,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$. Foram avaliadas as taxas de crescimento de colmo+pseudocolmo e de crescimento da altura estendida, as taxas de aparecimento, expansão e senescência de folhas e, após a colheita, a produção de massa seca da parte aérea das plantas. Menores valores de taxa de crescimento da altura de colmo+pseudocolmo foram observados para humidícola, missioneira gigante e xaraés, enquanto que maiores valores foram observados para Jiggs e Tanzânia, para a concentração de Cd de 2,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$. Menores valores de taxa de crescimento da altura estendida foram observados para marandu e missioneira gigante, enquanto que maiores valores foram observados para Jiggs, nessa concentração. Plantas de Aruana apresentaram maiores valores de taxa de aparecimento de folhas, enquanto que para Jiggs, os valores foram menores, na concentração de Cd de 2,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$. Plantas de humidícola e Jiggs revelaram menores valores de taxa de expansão foliar, enquanto que para pensacola e Tifton-85 os valores foram maiores, nessa concentração. A taxa de senescência foliar foi maior para Aruana, hemártria, humidícola, Jiggs, piatã, Tanzânia, Tifton-85 e xaraés, e menor para missioneira gigante, para a concentração de Cd de 2,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$. Hemártria, humidícola, e piatã apresentaram menores valores de produção de massa seca da parte aérea das plantas, enquanto que para Jiggs, missioneira gigante, pensacola, Tanzânia e Tifton-85, os valores foram maiores nessa concentração. A exposição ao Cd em solução nutritiva às plantas de Aruana, Jiggs, marandu, missioneira gigante, pensacola, Tanzânia, Tifton-85 e xaraés altera a morfogênese vegetal sem que haja redução da produção de massa seca da parte aérea. Hemártria, humidícola e piatã, entretanto, têm a morfogênese prejudicada, afetando negativamente a produção de massa seca da parte aérea das plantas.

Palavras-chave: elementos-traço, fitorremediação, fitotoxicidade, tolerância.

MORPHOGENESIS OF TROPICAL GRASSES EXPOSED TO CADMIUM

ABSTRACT: *Exposure to cadmium (Cd) can cause changes on plant morphogenesis, however little is known about these changes on plant production.*

The present study aimed to evaluate variations in morphogenesis and its influence on the production of tropical grasses, when Cd levels are increased in the growth medium. Plants of 11 tropical grasses were grown during 30 days in nutrient solution at two Cd concentrations: 0 and 2.0 $\mu\text{mol L}^{-1}$. Stem+pseudostem and extended height growth rates, leaf appearance rate, leaf expansion and senescence rates and dry mass production of shoots were evaluated. Lower values of stem+pseudostem growth rate were observed for humidicola, missioneira gigante and xaraés, while higher values were observed for Jiggs and Tanzania, at the Cd concentration of 2.0 $\mu\text{mol L}^{-1}$. Lower values of extended height growth rate were observed for marandu and missioneira gigante, while higher values were observed for Jiggs, at this concentration. Plants of Aruana presented higher values of leaf appearance rate, whereas for Jiggs, the values were lower, at the Cd concentration of 2.0 $\mu\text{mol L}^{-1}$. Humidicola and Jiggs plants showed lower values of leaf expansion rate, whereas for pensacola and Tifton-85, the values were higher, at this concentration. Leaf senescence rate was higher for Aruana, hemarthria, humidicola, Jiggs, piatã, Tanzania, Tifton-85 and xaraés, and lower for missioneira gigante, at the Cd concentration of 2.0 $\mu\text{mol L}^{-1}$. Hemarthria, humidicola, and piatã presented lower values of dry mass production of shoots, whereas for Jiggs, missioneira gigante, pensacola, Tanzania and Tifton-85, the values were higher, at this concentration. Cd exposure in nutrient solution to Aruana, Jiggs, marandu, missioneira gigante, pensacola, Tanzania, Tifton-85 and xaraés changes the plant morphogenesis, whereas it does not result in decrease of dry mass production of shoots. However, these changes negatively affect the dry mass production of shoots of hemarthria, humidicola and piatã plants.

Keywords: trace-elements, phytoremediation, phytotoxicity, tolerance.

INTRODUÇÃO

No mundo moderno, as atividades humanas tais como a mineração, indústria e práticas agrícolas inadequadas têm levado à liberação de grandes quantidades de elementos-traço no meio ambiente (GALLEGO et al., 2012; SONG et al., 2017). O Cd está entre as dez substâncias mais perigosas na lista de prioridades da Agência para Registro de Substâncias Tóxicas e Doenças - ATSDR (2018) devido à sua frequência, toxicidade e potencial para a exposição humana. A contaminação por Cd representa um grande risco ao meio ambiente e à saúde humana, uma vez que, ao contrário de outros elementos não-essenciais, é extraído do solo pelas plantas, podendo ser transferido para a cadeia alimentar (XIAO et al., 2008).

Dessa forma, a contaminação de solos por Cd representa um problema ambiental o qual necessita uma solução efetiva. Uma das técnicas utilizadas para esse propósito é fitorremediação, a qual consiste no emprego de plantas e da sua microbiota, associada ou não ao uso de amenizantes do solo, além de práticas agrônômicas que, se aplicadas em conjunto, removem, imobilizam ou tornam os

contaminantes inofensivos ao ecossistema (ANDRADE et al., 2007; CRUVINEL, 2009).

O Cd não é um elemento essencial para o crescimento de plantas e o seu excesso no solo tem uma série de efeitos tóxicos, afetando o crescimento e desenvolvimento, fotossíntese, respiração, regulação estomática, atividade enzimática, relações hídricas, absorção de nutrientes, metabolismo de proteínas e funcionamento de membranas (TRAN; POPOVA, 2013). Dessa forma, em programas de seleção de espécies para a fitorremediação de locais contaminados com Cd, os efeitos fitotóxicos e a tolerância das plantas ao elemento-traço devem ser considerados concomitantemente ao potencial de acumulação na parte aérea.

O conjunto de processos envolvendo as transformações da planta diante de fatores bióticos e abióticos, ao longo do tempo e no ambiente no qual as plantas crescem, caracteriza a resposta fenotípica, como resultado de mudanças nas características morfogênicas. Essas características, por sua vez, influenciam a produção e a mudança na forma e estrutura da planta no espaço ao longo do tempo (CHAPMAN; LEMAIRE, 1993).

O Cd pode interferir na divisão e no crescimento de células, afetando o padrão morfogênico de diferenciação de folhas jovens. Isso contribui para a redução do número de folhas expandidas, da expansão das folhas e para o encurtamento de entrenós. O Cd também pode acelerar a senescência de células do mesófilo e diminuir a vida útil das folhas (VECCHIA et al., 2005). Tais alterações podem acarretar na redução da tolerância das plantas ao elemento-traço.

As gramíneas apresentam uma rápida cobertura do solo, promovendo a redução da mobilidade de contaminantes pela lixiviação, a redução da erosão hídrica e eólica, a diminuição da disponibilidade do contaminante na cadeia alimentar, e melhorando a estética do local (MENDEZ; MAIER, 2008). Embora as gramíneas sejam comumente utilizadas para a revegetação de áreas contaminadas, pouco se sabe a respeito da tolerância de muitas dessas plantas ao Cd e outros elementos-traço.

O objetivo do estudo relatado foi avaliar a influência das alterações da morfogênese na produção da massa seca da parte aérea das plantas de 11 gramíneas tropicais, quando a concentração de Cd em solução nutritiva varia de 0 para 2,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido entre os meses de fevereiro e abril de 2016, em casa de vegetação em Lages, SC (27°48'58"S e 50°19'34"O). O fotoperíodo e a luminosidade foram providas pela luz natural do sol, e a temperatura e a umidade relativa do ar controladas por sistema automatizado, permanecendo entre 15 e 25 °C e 70 e 95%, respectivamente.

As gramíneas tropicais avaliadas no trabalho foram três cultivares de *Brachiaria brizantha* (Hochst.) Stapf.: 'BRS Piatã' (capim piatã), 'Marandu' (capim marandu) e Xaraés (capim xaraés); *Brachiaria humidicola* (Rendle.) Schweickert (humidícola); *Paspalum notatum* Flügge cv. pensacola (capim pensacola); dois cultivares de *Panicum maximum* Jacq.: 'Aruana' (capim Aruana) e 'Tanzânia' (capim Tanzânia); *Axonopus catharinensis* Valls (grama missioneira gigante); dois cultivares de *Cynodon dactylon* (L.) Pers.: 'Jiggs' (grama Jiggs) e 'Tifton 85' (grama Tifton 85); e *Hemarthria altissima* (Poir.) Stapf et C.E. Hubb cv. Florida (hemártria).

Para os capins piatã, marandu, xaraés, pensacola, Aruana e Tanzânia, e para humidícola, as mudas foram obtidas através da germinação de sementes não tratadas em caixas gerbox e câmaras do tipo BOD, de acordo com as regras para análise de sementes do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2009). Já para as gramas missioneira gigante, Jiggs, Tifton-85, e para hemártria, as mudas foram produzidas através do desenvolvimento de propágulos de 5 cm provenientes de plantas-mãe, em bandejas plásticas com areia sílica branca, por dez dias. Após esse período, as mudas obtidas através da germinação de sementes também foram transferidas para bandejas plásticas com areia. Durante 10 dias, as bandejas foram irrigadas com solução nutritiva de Hoagland (ARNON; HOAGLAND, 1940) com 50% de força iônica e pH 5,5. Subsequentemente, as mudas foram transferidas para potes contendo solução nutritiva de Hoagland a 100% de força iônica e pH 5,5, permanecendo assim por mais 10 dias.

As unidades experimentais foram constituídas por potes de polipropileno de dois litros forrados com papel alumínio, contendo solução nutritiva de Hoagland a 100% de força iônica e pH 5,5, e três plantas. Os tratamentos se consistiram da combinação de dois níveis de Cd na solução nutritiva: 0 e 2,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ com as gramíneas tropicais, compondo um delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 11x2. Cada tratamento foi constituído de três repetições. Para o

nível de 2,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$, alíquotas de solução-estoque preparada com nitrato de Cd ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$) foram adicionadas à solução nutritiva basal.

A concentração de 2,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ foi selecionada em experimento preliminar, no qual foi avaliado o efeito de concentrações de Cd em solução nutritiva na produção de massa seca da parte aérea das plantas, durante 15 dias, para as mesmas gramíneas tropicais utilizadas no experimento principal. Após esse período, as plantas foram colhidas, e a parte aérea destacada e seca em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C durante 72 horas. Em balança de precisão, foi determinada a massa seca da parte aérea, a qual dividida pelo número de perfilhos, resultou na massa seca da parte aérea por perfilho. Foram testadas as concentrações de 0,5, 2,0 e 20,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Cd. O critério utilizado para a seleção foi a maior concentração de Cd na solução nutritiva sem que houvesse redução significativa de 20% da produção de massa seca da parte aérea em relação à concentração de 0 $\mu\text{mol L}^{-1}$, para todas as gramíneas. Nesse experimento, para cada concentração de Cd testada, o delineamento, a constituição das unidades experimentais e a análise estatística foi idêntica ao experimento principal.

No experimento principal, após a constituição dos tratamentos, as plantas cresceram por um período de 30 dias. A solução nutritiva foi substituída em intervalos semanais, o pH ajustado em intervalos de três dias e a oxigenação realizada três vezes ao dia. Do 15º ao 30º dia, foram tomadas medidas da altura de colmo+pseudocolmo, altura estendida, número de folhas vivas, comprimento da última folha expandida, e comprimento da área senescente da primeira folha, em um dos perfilhos de cada unidade experimental. Com essas medidas, foram obtidas a taxa de crescimento da altura de colmo+pseudocolmo e da altura estendida, a taxa de aparecimento de folhas, a taxa de expansão foliar e a taxa de senescência foliar, por perfilho, de acordo com as equações de 1 a 5. Aos 30 dias de crescimento, foi determinada a massa seca da parte aérea das plantas.

$$\text{TCCP} = (\text{altura de colmo +pseudocolmo final} - \text{inicial})/15 \quad (\text{Equação 1})$$

em que: TCCP = Taxa de crescimento da altura de colmo+pseudocolmo, em mm dia⁻¹).

$$\text{TCAE} = (\text{altura estendida final} - \text{inicial})/15 \quad (\text{Equação 2})$$

em que: TCAE = Taxa de crescimento da altura estendida.

$$\text{TAF} = (\text{número de folhas vivas final} - \text{inicial})/15 \quad (\text{Equação 3})$$

em que: TAF = Taxa de aparecimento de folhas.

$$\text{TEF} = [(\text{somatório das diferenças do comprimento final} - \text{inicial das folhas em expansão})/\text{número de folhas}]/15 \quad (\text{Equação 4})$$

em que: TEF = Taxa de expansão foliar.

$$\text{TSF} = (\text{comprimento final} - \text{inicial da área senescente da primeira folha})/15 \quad (\text{Equação 5})$$

em que: TSF = Taxa de senescência foliar.

Para todas as variáveis, os dados foram testados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk, e homogeneidade de variâncias pelo teste de Levene. Para os dados de taxa de aparecimento de folhas, taxa de expansão foliar, taxa de senescência foliar e massa seca da parte aérea das plantas, aplicou-se a transformação logarítmica, para atender as pressuposições da análise de variância. Em seguida, os dados foram submetidos à análise de variância e as médias dos tratamentos foram comparadas entre si pelo teste de Tukey. Todas as análises foram efetuadas com o auxílio do programa R (R Development Core Team, 2016), considerando-se $p < 0,05$.

RESULTADOS

Houve interação entre as gramíneas e os níveis de Cd na solução nutritiva para a taxa de crescimento da altura de colmo+pseudocolmo e da altura estendida das plantas.

Plantas de humidícola, grama missioneira gigante e xaraés crescidas na solução nutritiva com concentração de Cd de $2,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ apresentaram menores valores de taxa de crescimento de colmo+pseudocolmo, com redução de 48, 37 e

59%, respectivamente, em relação às plantas crescidas na concentração de 0 $\mu\text{mol L}^{-1}$, e maiores valores para Jiggs e Tanzânia, com aumento de 36 e 34%, respectivamente; não houve diferença significativa para Aruana, hemártria, marandu, pensacola, piatã e Tifton-85 entre as duas concentrações (Tabela 1). Em relação à taxa de crescimento da altura estendida, houve maiores valores para marandu e missioneira gigante, com redução equivalente a 52 e 29%, respectivamente, e maior valor para Jiggs, com aumento de 90%, na concentração de 2,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$; não houve diferença significativa para Aruana, hemártria, humidícola, pensacola, piatã, Tanzânia, Tifton-85 e xaraés, entre as duas concentrações de Cd (Tabela 1).

Tabela 1. Taxa de crescimento da altura de colmo+pseudocolmo e da altura estendida (mm dia^{-1}) de gramíneas tropicais cultivadas em solução nutritiva com Cd em concentrações de 0 e 2,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$.
 Table 1. Stem+pseudostem and extended height growth rate (mm day^{-1}) of grasses grown in nutrient solution at Cd concentrations of 0 and 2.0 $\mu\text{mol L}^{-1}$.

Gramínea	Taxa de crescimento da altura de colmo + pseudocolmo (mm dia^{-1})			Taxa de crescimento da altura estendida (mm dia^{-1})		
	0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Cd	20 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Cd	Média	0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Cd	20 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Cd	Média
Aruana	14,82	16,39	15,61 ^{ns}	26,52	29,18	27,85 ^{ns}
Hemártria	0,84	1,21	1,03 ^{ns}	8,63	8,03	8,33 ^{ns}
Humidícola	17,34 a	8,94 b	13,14	17,33	14,18	15,76 ^{ns}
Jiggs	7,26b	9,85a	8,39	5,57b	10,59a	7,99
Marandu	4,00	3,21	3,61 ^{ns}	14,37 a	6,85 b	10,61
M. gigante	21,25 a	13,36 b	17,31	22,76 a	16,15 b	19,45
Pensacola	1,78	1,82	1,80 ^{ns}	10,00	11,06	10,53 ^{ns}
Piatã	5,80	6,61	6,20 ^{ns}	14,64	17,55	16,09 ^{ns}
Tanzânia	8,07	10,45	9,26 ^{ns}	31,87	32,58	32,22 ^{ns}
Tifton-85	8,84	9,12	8,98 ^{ns}	7,17	9,58	8,38 ^{ns}
Xaraés	10,71 a	4,42 b	7,57	15,33	16,42	22,54 ^{ns}
Média	9,22	7,67		17,08	15,61	
CV (%)	16,39			19,93		

Letras comparam concentrações de Cd para a mesma gramínea tropical. ^{ns}: não-significativo a 5% pelo teste F. CV: Coeficiente de variação.

Ocorreu interação entre as gramíneas e os níveis de Cd na solução nutritiva para a taxa de aparecimento de folhas, taxa de expansão e de senescência foliar.

Plantas de Aruana crescidas em solução nutritiva com concentração de Cd de 2,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ apresentaram maior valor de taxa de aparecimento de folhas, com aumento de 50%, em relação às plantas crescidas na concentração de 0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ e, para Jiggs, o valor foi menor, com redução de 19%; não houve diferença significativa para hemártria, humidícola, marandu, missioneira gigante, pensacola, piatã, Tanzânia, Tifton-85 e xaraés entre as duas concentrações (Tabela 2).

Em relação à taxa de expansão foliar, plantas de humidícola e Jiggs, na concentração de 2,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$, os valores foram menores, com redução de 31 e 19%, respectivamente, enquanto que para pensacola e Tifton-85, foram maiores, com aumentos de 21 e 32%, respectivamente, em relação à concentração de 0 $\mu\text{mol L}^{-1}$; não houve diferença significativa para Aruana, hemártria, marandu, missioneira gigante, piatã, Tanzânia, Tifton-85 e xaraés entre as duas concentrações (Tabela 2).

Plantas de Aruana, hemártria, humidícola, Jiggs, piatã, Tanzânia, Tifton-85 e xaraés crescidas na concentração de 2,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Cd tiveram maiores valores de taxa de senescência foliar, correspondentes a 10, 1,5, 2, 5, 2,5, 10, 3 e 4 vezes, respectivamente, aos valores das plantas crescidas na concentração de 0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ e, para missioneira gigante, a taxa de senescência foi menor, com redução de 5,5 vezes; não houve diferença entre as concentrações de Cd para marandu e pensacola (Tabela 2).

Tabela 2. Taxa de aparecimento de folhas (folhas dia^{-1}), taxa de expansão foliar (mm dia^{-1}) e taxa de senescência foliar (mm dia^{-1}) de gramíneas tropicais cultivadas em solução nutritiva com Cd em concentrações de 0 e 2,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$.

Table 2. Leaf appearance rate (leaves day^{-1}), leaf elongation rate (mm day^{-1}) and leaf senescence rate (mm day^{-1}) of tropical grasses grown in nutrient solution at Cd concentrations of 0 and 2.0 $\mu\text{mol L}^{-1}$.

Gramínea	Taxa de aparecimento de folhas (folhas dia^{-1})			Taxa de expansão foliar (mm dia^{-1})			Taxa de senescência foliar (mm dia^{-1})		
	0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Cd	20 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Cd	Média	0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Cd	20 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Cd	Média	0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Cd	20 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Cd	Média
Aruana	0,12 b	0,18 a	0,15	60,74	55,36	58,05 ^{ns}	0,02 b	0,12 a	0,07
Hemártria	0,16	0,18	0,17 ^{ns}	11,97	12,40	12,19 ^{ns}	0,02 b	0,03 a	0,03
Humidícola	0,18	0,13	0,16 ^{ns}	33,28 a	23,09 b	28,18	0,02 b	0,04 a	0,03
Jiggs	0,42 a	0,34 b	0,38	12,97 a	10,51 b	11,74	0,01 b	0,05 a	0,03
Marandu	0,10	0,08	0,09 ^{ns}	38,63	36,54	37,58 ^{ns}	0,20	0,16	0,18 ^{ns}
M. gigante	0,39	0,36	0,36 ^{ns}	17,06	16,71	16,89 ^{ns}	0,09 a	0,04 b	0,07
Pensacola	0,21	0,24	0,23 ^{ns}	15,86 b	19,21 a	17,12	0,01	0,01	0,01 ^{ns}
Piatã	0,16	0,14	0,15 ^{ns}	28,93	31,93	30,43 ^{ns}	0,03 b	0,07 a	0,05
Tanzânia	0,14	0,14	0,14 ^{ns}	67,7	74,40	71,05 ^{ns}	0,05 b	0,48 a	0,28
Tifton-85	0,43	0,42	0,43 ^{ns}	10,78 b	14,27 a	12,52	0,10 b	0,31 a	0,2
Xaraés	0,11	0,11	0,11 ^{ns}	41,70 a	39,77 b	45,73	0,01 b	0,04 a	0,03
Média	0,22	0,21		31,8	30,29		0,05	0,12	
CV (%)	6,34			9,02			31,58		

Letras comparam concentrações de Cd para a mesma gramínea tropical. ^{ns}: não-significativo a 5% pelo teste F. CV: Coeficiente de variação.

Ocorreu interação entre as gramíneas e os níveis de Cd na solução nutritiva para a produção de massa seca da parte aérea das plantas. Plantas de hemártria, humidícola, e piatã crescidas na concentração de 2,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ apresentaram menores valores, com reduções de 29, 25 e 28%, respectivamente, em relação às

plantas crescidas na concentração de 0 $\mu\text{mol L}^{-1}$, enquanto que para Jiggs, missioneira gigante, pensacola, Tanzânia e Tifton-85, os valores foram maiores, com aumentos de 23, 35, 21, 19 e 34%, respectivamente. Para Aruana, marandu e xaraés, não houve diferença significativa para as plantas entre as duas concentrações (Tabela 3).

Tabela 3. Massa seca da parte aérea (g) de gramíneas tropicais cultivadas em solução nutritiva com Cd em concentrações de 0 e 2,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$.
 Table 3. Dry mass of shoots (g) of tropical grasses grown in nutrient solution at Cd concentrations of 0 and 2.0 $\mu\text{mol L}^{-1}$.

Gramínea	Massa seca da parte aérea (g)		
	0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Cd	20 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Cd	Média
Aruana	1,12	1,28	1,20 ^{ns}
Hemártria	0,17 a	0,12 b	0,14
Humidícola	0,52 a	0,39 b	0,45
Jiggs	1,63 b	2,01 a	1,82
Marandu	0,60	0,67	0,64 ^{ns}
M. gigante	0,65 b	0,86 a	0,76
Pensacola	0,14 b	0,17 a	0,15
Piatã	0,99 a	0,71 b	0,85
Tanzânia	2,64 b	3,14 a	2,89
Tifton-85	1,48 b	1,99 a	1,73
Xaraés	2,24	2,12	2,18 ^{ns}
Média	1,11	1,23	
CV (%)	11,85		

Letras comparam concentrações de Cd para a mesma gramínea tropical. ^{ns}: não-significativo a 5% pelo teste F. CV: Coeficiente de variação.

DISCUSSÃO

A aceleração da taxa de senescência foliar das plantas cultivadas em solução nutritiva com 2,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$, em relação a concentração de 0 $\mu\text{mol L}^{-1}$, contribuiu para a redução da produção da massa seca da parte aérea das plantas de hemártria e piatã. Para a humidícola, o aumento da taxa de senescência foliar, na concentração de 2,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$, aditivamente à redução das taxas de crescimento da altura de colmo+pseudocolmo e de expansão foliar, colaboraram para a menor produção de massa seca da parte aérea das plantas. Kopittke et al. (2010), encontraram redução de 50% da massa fresca da parte aérea de plantas de *Chloris gayana* (capim de Rhodes) e *Brachiaria decumbens* (capim-braquiária) entre 0 e 0,4 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Cd em solução nutritiva. A aceleração da senescência foliar induzida pelo Cd ocorre devido à redução do conteúdo de clorofila e de enzimas do sistema antioxidante nos

cloroplastos, culminando na sua destruição (AZEVEDO et al., 2005; THAKUR et al., 2016). A redução do crescimento dos tecidos vegetais pode estar relacionada ao efeito do Cd de induzir a peroxidação lipídica e a lignificação das paredes celulares, contribuindo para a redução do crescimento das células (LOIX et al., 2017) ou aos efeitos tóxicos do Cd no processo de divisão celular e indução de aberrações cromossômicas (ZOU et al., 2012).

Para as plantas de xaraés, mesmo que tenha havido maior taxa de senescência foliar, não houve redução da massa seca da parte aérea das plantas, nessa concentração. A ausência de efeitos da exposição ao Cd para a produção da massa seca da parte aérea também foi observada para as plantas de marandu, mesmo com a redução da taxa de crescimento da altura estendida. A maior taxa de senescência foliar para as plantas de Aruana cultivadas em $2,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Cd em solução nutritiva em relação à concentração de $0 \mu\text{mol L}^{-1}$ foi compensada pela maior taxa de aparecimento de folhas, contribuindo, dessa forma, para que não tenha havido queda da produção de massa seca da parte aérea. Plantas de *Panicum virgatum* (Switchgrass) cultivadas em solução nutritiva, não sofreram redução da massa seca quando cultivadas em solução nutritiva a $4 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Cd, comparativamente à concentração de $0 \mu\text{mol L}^{-1}$ (CHEN et al., 2012).

Para Tifton-85, a aceleração da senescência foliar foi compensada pela maior taxa de expansão das folhas, de tal forma que a massa seca da parte aérea das plantas apresentou maior valor para a concentração de $2,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Cd. A massa seca da parte aérea das plantas de Tanzânia apresentou maior valor na concentração de $2,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Cd em função do aumento da taxa de crescimento da altura de colmo+pseudocolmo, em relação à concentração de $0 \mu\text{mol L}^{-1}$, mesmo que tenha havido aceleração da taxa de senescência. Para as plantas de pensacola, a exposição ao Cd proporcionou maior taxa de expansão foliar, e consequentemente maior produção de massa seca da parte aérea. Muito embora as plantas de Jiggs tenham apresentado maior taxa de senescência e menores taxas de aparecimento e de expansão foliar para a concentração de $2,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Cd, o aumento das taxas de crescimento da altura de colmo+pseudocolmo e da altura estendida das plantas proporcionou maiores valores de massa seca da parte aérea, em relação à concentração de $0 \mu\text{mol L}^{-1}$. Para as plantas de missioneira gigante, a redução da taxa de senescência foliar aumentou a produção da massa seca da parte aérea das plantas, mesmo que tenha havido redução das taxas de crescimento da altura de

colmo+pseudocolmo e da altura estendida, entre as doses de 0 e 2,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Cd na solução nutritiva. Plantas de *Miscanthus sacchariflorus* cultivadas em solução nutritiva com 10 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Cd tiveram melhor desempenho na produção de massa seca que plantas cultivadas na concentração de 0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (GUO et al., 2016). Os maiores valores para os índices de morfogênese observados para as plantas expostas ao Cd podem estar relacionados ao fato de que, sob concentrações abaixo dos limites fitotóxicos, elementos-traço não essenciais podem produzir efeito estimulante à fixação de CO_2 (NYITRAI et al., 2004).

CONCLUSÕES

A exposição ao Cd em solução nutritiva às plantas de Aruana, Jiggs, marandu, missioneira gigante, pensacola, Tanzânia, Tifton-85 e xaraés altera a morfogênese vegetal sem que haja redução da produção de massa seca da parte aérea, sendo indicadas para estudos relacionados à acumulação de Cd nessa estrutura.

Hemária, humidícola e piatã, quando expostas ao Cd em solução nutritiva, têm a morfogênese prejudicada, afetando negativamente a produção de massa seca da parte aérea e, portanto, não são indicadas para tais estudos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Ministério Público Federal de Santa Catarina (MPFSC) e à Justiça Federal de Santa Catarina (JFSC).

REFERÊNCIAS

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY (ATSDR). The ATSDR 2018 Substance Priority List. Disponível em: <https://www.atsdr.cdc.gov/SPL/>. Acesso: 09 ago 2018.

ANDRADE, J. C. M; TAVARES, S. R. L.; MAHLER, C. F. Fitorremediação: o uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental. 1.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 176p.

ARNON, D. I.; HOAGLAND, D.R. Crop production in artificial culture solutions and in soils with special reference to factors influencing yields and absorption of inorganic nutrients. *Soil Science*, Baltimore, v.50, p.463-485, 1940.

AZEVEDO, H.; PINTO, C. G. G.; FERNANDES, J.; LOUREIRO, S.; SANTOS, C. Cadmium effects on sunflower growth and photosynthesis. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v.28, n.12, p.2211-2220, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01904160500324782>

BRASIL. Regras para análises de sementes. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 399p.

CHAPMAN, D. F.; LEMAIRE, G. Morphogenetic and structural determinants of plant regrowth after defoliation. In: BAKER, M. J. (Ed.). *Grasslands for our world*. Wellington: SIR Publishing, 1993. p.55-64.

CHEN, B. C.; LAI, H. Y.; JUANG, K. W. Model evaluation of plant metal content and biomass yield for the phytoextraction of heavy metals by switchgrass. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Amsterdam, v.80, n.1 p.393-400, jun. 2012. DOI: <https://dx.doi.org/v10.1016/j.ecoenv.2012.04.011>

CRUVINEL, D. F. C. Avaliação da fitorremediação em solos submetidos à contaminação com metais. 2009. 79f. (2009). Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2009.

GALLEGO, S. M.; PENA, L. B.; BARCIA, R. A.; AZPILICUETA, C. E.; IANNONE, M. F.; ROSALES, E. P.; ZAWOZNIK, M. S.; GROPPA, M. D. Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: insight into regulatory mechanisms. *Environmental and Experimental Botany*, Oxford, v.83, p.33-46, nov. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.04.006>

KOPITTKKE, P. M.; BLAMEY, F. P. C.; MENZIES, N. W. Toxicity of Cd to signal grass (*Brachiaria decumbens* Stapf.) and Rhodes grass (*Chloris gayana* Kunth.). *Plant and*

Soil, The Hague, v.330, n.1, p.515–523, nov. 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-009-0224-6>

LOIX, C.; HUYBRECHTS, M.; VANGRONSVELD, J.; GIELEN, M.; KEUNEN, E.; CUYPERS, A. Reciprocal Interactions between Cadmium-Induced Cell Wall Responses and Oxidative Stress in Plants. *Frontiers in Plant Science*, Lausanne, v.8, p.1-19, out. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2017.01867>

MENDEZ, M.O.; MAIER, R. M. Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments - an emerging remediation technology. *Environment health perspectives*, United States, v.116, n.3, p.278-283, mar. 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.10608>

NYITRAI, P.; BÓKA, K.; GÁSPÁR, L.; SÁRVÁRI, É.; KERESZTES, Á. Rejuvenation of ageing bean leaves under the effect of low-dose stressors. *Plant Biology*, Noordwijk, v.6, n.6, p.708–714, dez. 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1055/s-2004-830385>

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2016. Disponível em: <<http://nbcgib.uesc.br/mirrors/cran/>>. Acesso em: 15 jan 2018.

SONG, Y.; JIN, L.; WANG, X. Cadmium absorption and transportation pathways in plants. *International Journal of Phytoremediation*, Boca Ratón, v.19, n.2, p.133-141, feb. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/15226514.2016.1207598>

THAKUR, N.; SHARMA, S. S.; KISHORE, K. The Effect of Elevated Ca²⁺ Concentrations on Cadmium-Induced Acceleration of Leaf Senescence. *Journal of Biological and Chemical Chronicles*, Karot, v.2, n.1, p. 20-24, jan. 2016.

TRAN, T. A.; POPOVA, L. P. Functions and toxicity of cadmium in plants: recent advances and future prospects'. *Turkish Journal of Botany*, Ankara, v.37, n.1, p.01-13, jan. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.3906/bot-1112-16>

VECCHIA, F. D.; LA ROCCA, N.; MORO, I.; DE FAVERI, S.; ANDREOLI, C.; RASCIO, N. Morphogenetic, ultrastructural and physiological damages suffered by submerged leaves of *Elodea canadensis* exposed to cadmium. Plant Science, Shannon, v.168, n.2, p.329-338, feb. 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.07.025>

XIAO, X.; CHEN, T.; AN, Z.; LEI, M.; HUANG, Z.; LIAO, X.; LIU, Y. Potential of *Pteris vittata* L. for phytoremediation of sites contaminated with cadmium and arsenic: the tolerance and accumulation. Journal of environmental sciences (China), Amsterdam, v.20, p.1, p.62-67, 2008. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60009-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60009-1)

ZOU, J.; YUE, J.; JIAN, W.; LIU, D. Effects of cadmium stress on root tip cells and some physiological indexes in *Allium cepa* var. *agrogarum* L. Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica, Cracow, v.54, n.1, p.129-141, jun. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.2478/v10182-012-0015-x>