



ESTUDOS DA TOXICIDADE DO ALUMÍNIO EM VALORES DE pH 7,0 E 7,5 PARA *BRASSICA OLERACEA L.* E *RAPHANUS SATIVUS L.*

L. Gabriel^{*}; M. C. Volpe; G. A. Cristiano; V. D. D. Neves;
D. S. S. Souza; J. L. Ramos; A. L. R. Portela; A. B. Dias;
F. B. Villa; G. B. Godoy; I. R. G. Godoi; J. O. F. Monteiro;
R. Sebastiani; R. T. Pelegrini

UFSCar - Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Agrárias, Campus Araras, SP, Brasil

Article history: Received 21 October 2019; Received in revised form 06 November 2019; Accepted 08 November 2019; Available online 05 December 2019.

RESUMO

A toxicidade do alumínio tem sido verificada somente em valores de pH abaixo de 5,5 devido a solubilidade dos íons Al^{3+} que ocorre em meio ácido. Este trabalho teve o objetivo de estudar a toxicidade do alumínio em valores de pH 7,0 para a espécie *Raphanus sativus L.* (rabanete) e 7,5 para a *Brassica oleracea L.* (couve) com a finalidade de verificar se em tais valores de pH o alumínio não apresentava efeitos deletérios observáveis. Foi utilizada uma metodologia em que o meio de cultivo continha sementes como organismos testes e um rígido controle dos valores de pH. Os ensaios toxicológicos empregavam concentrações otimizadas de macro e micronutrientes necessários ao desenvolvimento das plântulas. Com o estudo foi possível verificar elevada Toxicidades Aguda e Crônica dos íons Al^{3+} em valores de pH 7,0 e 7,5 para as plantas estudadas, comprovando que os efeitos tóxicos do alumínio podem ser verificados também em meio de cultivo com valores de pH neutro e ligeiramente básico.

Palavras-chave: Toxicidade Al^{3+} , meio de cultivo, pH neutro.

ALUMINUM TOXICITY STUDIES AT pH 7,0 AND 7,5 FOR *BRASSICA OLERACEA L.* AND *RAPHANUS SATIVUS L.*

ABSTRACT

Aluminum toxicity was only found at pH below 5.5 due to the solubility of Al^{3+} ions that occur in the acid medium. The objective of this search was to studying the toxicity of aluminum at pH 7.0 for *Raphanus sativus L.* (radish) and 7.5 for *Brassica oleracea L.* (cabbage) with a check whether these pH the aluminum have no observable deleterious effects. A methodology was used in which the culture medium contained seeds as tested organisms and a strict control of pH values. The toxicological tests employed allowed optimizing macro and micronutrients necessary for plant development. The study was able to verify high Acute and Chronic Toxic Al^{3+} icons at pH 7.0 and 7.5 for studied plants, proving that toxic effects of aluminum can also be verified in culture medium with neutral and slightly basic pH.

Keywords: Al^{3+} toxicity, culture medium, neutral pH.

^{*} leticia.gabriel435@gmail.com

INTRODUÇÃO

Dentre os metais que compõem o solo brasileiro o alumínio apresenta-se em elevadas concentrações principalmente nas regiões de cerrado (22% do território). Esse elemento está presente nas partículas de argila e em níveis de pH abaixo de 5,5 faz com que o alumínio migre para a solução do solo tornando-se quimicamente tóxico para as plantas (CAIRES, 1998). As plantas em sua maioria não conseguem evitar absorção dos metais pesados no solo (SOARES *et al.*, 2001), o que causa danos sérios à estrutura fisiológica de um modo geral.

Nos solos do cerrado brasileiro ocorrem muitos casos de toxicidade por alumínio em função de suas características ácidas e pela presença de elevadas concentrações desse elemento químico. Tais características tornaram uns dos principais motivos que impedem o desenvolvimento de algumas culturas nesta região (CAIRES, 1998).

A literatura científica sempre relata a toxicidade do alumínio para plantas em valores de pH ácidos, geralmente abaixo de 5,5. Alguns estudos até relacionam um efeito sinérgico entre as concentrações de Al^{3+} e de H^+ . Em particular, é enfatizado o possível papel dos efeitos sobre as células provocados pela toxicidade do alumínio apenas em baixos valores de pH (VITORELLO *et al.*, 2005).

Os valores baixos de pH afetam claramente a estrutura das membranas plasmáticas. Isto pode ter consequências profundas para a toxicidade do alumínio, principalmente no que diz respeito ao acesso a possíveis locais-alvo, incluindo a própria membrana. Alterações em sua estrutura parecem ser um fator importante na determinação da sensibilidade e absorção de alumínio pelas raízes e células das plantas (VITORELLO *et al.*, 2005).

É provável que essas alterações provocadas pelos baixos valores de pH sejam maiores no citoplasma cortical. A redução do pH intracelular pode aumentar drasticamente as concentrações de Alumínio em relação a outros cátions,

aumentando assim a sua competitividade para os ligantes celulares (VITORELLO *et al.*, 2005).

Existe uma relação entre as taxas de crescimento celular e toxicidade do Al^{3+} e do H^+ (VITORELLO e HAUG, 1996; KOYAMA *et al.*, 2001). Em ambos os casos, o boro pode aliviar a toxicidade e a pectina parece desempenhar um papel nos efeitos prejudiciais dos íons (SCHMOHL e HORST, 2000; KOYAMA *et al.*, 2001).

Absorção e distribuição de Alumínio

Na maioria das espécies de plantas, especialmente as espécies sensíveis ao alumínio, a absorção deste elemento é limitada principalmente ao sistema radicular, onde se acumula predominantemente na epiderme e no córtex externo. A endoderme supostamente atua como barreira no transporte para a parte aérea e as folhas geralmente são pequenas (VITORELLO *et al.*, 2005).

Se o alumínio acumulado manifesta sua toxicidade dentro da célula vegetal ou externamente, no apoplasto, é um tópico importante de interesse e controvérsia devido a sua implicação a modelos de toxicidade do alumínio (DELHAIZE e RYAN, 1995; KOCHIAN, 1995; HAUG e VITORELLO, 1996). O alumínio já foi encontrado no núcleo, presumivelmente ligado ao DNA (MATSUMOTO *et al.*, 1976), enquanto outros estudos relatam como localizados única ou predominantemente na parede celular (MARIENFELD e STELZER, 1993; OWNBY, 1993; MARIENFELD *et al.*, 1995).

Mecanismos primários de toxicidade do alumínio

Uma compreensão completa dos mecanismos da toxicidade do alumínio é indefinida. Pode ser que seja possível ou até provável que essa espécie tenha mais de um alvo primário. No entanto, hipóteses sobre os mecanismos da toxicidade deste elemento podem ser divididas entre as que afetam o metabolismo do fosfato e/ou

nucleotídeo, estrutura e função da parede celular e da membrana, transportadores de membrana, dinâmica do citoesqueleto, transdução de sinal e estresse oxidativo. Porém, a natureza exata desse destino não é conhecida. Provavelmente existem muitos alvos potenciais para este metal no sistema (VITORELLO *et al.*, 2005).

O alumínio é capaz de se ligar fortemente ao DNA, presumivelmente ao seu esqueleto de fosfato, ou alternativamente às histonas associadas (MATSUMOTO, 1991), isso levou a hipótese de que a divisão celular foi prejudicada por causa das interações do alumínio com o DNA nuclear. Este metal apresenta uma alta afinidade de ligação para liberar trifosfatos de nucleotídeos e um modelo foi proposto para toxicidade baseado na sua ligação ao ATP (adenosina trifosfato) no citoplasma (PETTERSSON e BERGMAN, 1989).

METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho seguiu os procedimentos descritos por SOUZA *et al.*, (2019), para a produção da solução de nutrientes e do meio de cultivo. A escolha desta técnica se deu pelo uso de sementes como organismos testes, produção de meio de cultivo com rígido controle dos valores de pH, elevada sensibilidade e baixo custo. Como organismos testes empregou-se sementes das espécies *Brassica oleracea L.* (Couve) e *Raphanus sativus L.* (Rabanete).

Segundo Pelegrini *et al.*, (2014), ao utilizar plantas como organismos teste em ensaios toxicológicos é necessário elaborar um meio de cultivo com as condições nutricionais otimizadas visando o desenvolvimento ótimo das plântulas. A falta de algum nutriente apresenta respostas que podem ser confundidas com estresse por poluente. Os ensaios devem ser realizados no mesmo valor de pH, dados de toxicidades realizados em meio de cultivo com valores de pH diferentes não tem validade científica.

Em todos os estudos realizados para avaliar a toxicidade do alumínio

Estudos também mostraram que o alumínio pode alterar a estrutura da membrana plasmática (ZHAO *et al.*, 1987) e tem pronunciado efeitos sobre os fluxos iônicos através da membrana, particularmente na absorção dos íons Ca^{2+} (LIU e LUAN, 2001).

Aspectos gerais relacionados à toxicidade do alumínio remete à interação deste necessariamente com valores de pH ácidos. A intenção deste trabalho foi de focar os estudos especialmente na toxicidade do alumínio em valores de pH neutro e ligeiramente básico (7,0 e 7,5) para verificar se nessas condições o alumínio apresenta toxicidade; já que solos naturalmente ácidos, como o do Cerrado, tem sido tratados de forma a corrigir a acidez para que se torne próprio para o plantio (FAGERIA, 2000).

empregou-se uma solução controle, que é aquela no qual o meio de cultivo não apresenta qualquer concentração de alumínio.

Utilizar este controle tem duas razões principais, a primeira é para comparar os resultados com as amostras que apresentam concentrações de alumínio, sendo que a solução controle é representada nas figuras como a de zero concentração em alumínio. O controle representa as condições ideais de desenvolvimento das plântulas e, portanto, considerada como crescimento 100%. O controle é fundamental para quantificar os efeitos tóxicos. A segunda razão é que o controle pode ser usado para fazer comparações com os dados apresentados na Figura 1 pelo fato do crescimento das plântulas terem sido diferentes em função dos fatores climáticos distintos dos apresentados na Figura 2. Utilizando o controle pode-se fazer uma estimativa do tamanho das plântulas se os experimentos fossem realizados naquelas condições.

Crescimento das plântulas em função dos valores de pH

Foi realizado um estudo prévio com sementes de cinco espécies de hortaliças em meio de cultivo com diversos valores de pH com objetivo de selecionar duas que apresentassem bom desenvolvimento para facilitar a análise das amostragens. Os resultados dos desenvolvimentos das plântulas estão apresentados na Figura 1.

Os estudos foram realizados por um período de 7 dias, entre 10 a 17 de agosto de 2018, no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos, *campus* de Araras SP, situado nas coordenadas 22°18'55" S e 47°22'52" O. Neste local, na data do experimento, foram apresentadas as temperaturas máximas especificadas na Figura 2.

Quantificação do crescimento das plântulas no estudo

Para quantificar o crescimento das plântulas couve e rabanete observou-se a região do meio de cultivo onde as espécies apresentavam desenvolvimento mais homogêneo. Desta região retirou-se três plântulas, de forma aleatória, cada frasco da triplicata e realizou-se a medição sem considerar as raízes (Figura 3), conforme indica a regra RUSSET explicitada por SOUZA *et al.*, (2019).

As plântulas foram retiradas do meio de cultivo e medidas em milímetro, utilizando-se a média aritmética para estabelecer o crescimento das plântulas naquelas condições.

Estudos Toxicológicos

A Toxicologia estuda os efeitos adversos provocados por determinada substância a um dado organismo. Os efeitos sobre os organismos vivos podem ser quantificados por uma variedade de critérios tais como: número de organismos

mortos ou vivos, taxa de reprodução, comprimento e massa corpórea, número de anomalias ou incidência de tumores, alterações fisiológicas e a densidade e diversidade de espécies numa determinada comunidade biológica (BOCHI-SILVA *et al.*, 2007).

Quando se usa plantas como organismos testes o efeito mais comumente observado é a inibição do crescimento ou a morte da espécie. As funções metabólicas e bioquímicas dos elementos químicos ligam a nutrição de plantas aos aspectos da fisiologia e da bioquímica vegetal e da biologia molecular (Pelegrini *et al.*, 2014).

GOLDSTEIN *et al.* (1990), estudando os efeitos causados por determinado agente tóxico aos organismos denominaram os efeitos em: efeito agudo e efeito crônico, sendo que, a principal diferença entre eles é por serem realizados em períodos de tempo diferentes:

Efeito Agudo: É uma rápida manifestação dos organismos a um determinado estímulo em período de 0 a 96 horas. Para conseguir uma resposta significativa pode-se utilizar a concentração efetiva (CE50), que se refere à quantidade de poluente que causa efeito tóxico a 50% dos organismos testados.

Efeito Crônico: É uma manifestação prolongada a um determinado estímulo em períodos superiores a 96 horas, tendo como característica a sub-letalidade, ou a alteração das funções biológicas dos organismos como o crescimento, por exemplo. Para isso são testadas doses cujos resultados calcula-se a Concentração de Efeito Não Observável (CENO), ou seja, a maior concentração do composto químico onde não se observam efeitos deletérios estatisticamente significativos, e Concentração de Efeito Observável (CEO), que significa a menor concentração do composto químico onde se observam efeitos deletérios estatisticamente significativos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A escolha das espécies se deu com os resultados do estudo prévio com hortaliças em diferentes valores de pH, cujo resultado estão apresentados na figura

1. O período de insolação e calor no local pode ter influenciado o bom desenvolvimento das plântulas.

Foi observado um melhor desenvolvimento para o rabanete (*Raphanus sativus L.*) em todos valores de pH e da couve (*Brassica oleracea L.*) que apresentou um desenvolvimento crescente no valor de pH 7,5 (em comparação com resultados nos valores de pH anteriores), o que foi decisivo para a seleção das duas espécies para iniciar os estudos de toxicidade frente às concentrações do alumínio.

Estudo da Toxicidade Crônica provocada pelo alumínio

Para realizar os estudos de Toxicidade Crônica do alumínio para as espécies *Raphanus sativus L.* e *Brassica oleracea L.* foi escolhido um período de 7 dias (168 horas). No caso deste estudo foi considerado o CENO a maior concentração de alumínio que não se observou nenhum efeito de redução do crescimento das plântulas e CEO a menor concentração de íons Al^{+3} que demonstrou reduções no crescimento das espécies estudadas.

Nos estudos de toxicidade crônica empregando os íons Al^{+3} como agente estressor para a espécie *Raphanus sativus L.* (rabanete) no valor de pH 7,0 observou-se o aparecimento da concentração máxima que não se observa efeito tóxico (CENO) em $30mg.L^{-1}$ e, em $40mg.L^{-1}$, a concentração mínima que apresenta efeito tóxico (CEO). Esses dados são apresentados na Figura 4.

Também pôde ser observado um estímulo do crescimento do rabanete até as concentrações de $20mg.L^{-1}$. Apesar de não ser conhecido que o alumínio possa ser utilizado por algum organismo, visto que os sistemas biológicos são aparentemente incapazes de manejar de forma eficaz os cátions trivalentes livres do alumínio, e devido à alta afinidade de ligação do alumínio para os componentes celulares das raízes, geralmente esse íon não é transportado para as partes superiores das plantas, mesmo quando o crescimento das raízes é severamente inibido (MARIANO *et al.*, 2005).

Entretanto, em algumas espécies de plantas tem sido observado um estímulo ao

crescimento na presença de baixas concentrações de alumínio (KERBAUY, 2004). Algumas espécies de plantas acumulam alumínio em grande quantidade na parte aérea. Tais plantas são frequentemente chamadas hiperacumuladoras e são plantas tropicais e subtropicais. Infelizmente, não há muita informação na literatura sobre o mecanismo, localização celular e formas químicas deste elemento que se acumula nessas plantas (VITORELLO *et al.*, 2005).

A toxicidade crônica dos íons Al^{+3} para a espécie *Brassica oleracea L.* (couve) em valores de pH 7,5 mostrou que a concentração máxima de efeito não observável (CENO) apareceu em $10mg.L^{-1}$ e a concentração mínima que apresentou efeito tóxico (CEO) em $12 mg.L^{-1}$ Figura 5.

Observando os resultados de Toxicidades Crônica dos íons Al^{+3} para as espécies *Brassica oleracea L.* (couve manteiga) e *Raphanus sativus L.* (rabanete), os ensaios mostraram uma considerável manifestação em baixíssimas concentrações de alumínio, produzindo determinados estímulos os quais demonstraram que mesmo em valores de pH neutros, os íons Al^{+3} apresentam-se bastante tóxicos podendo contribuir severamente para redução do desenvolvimento das espécies.

Estudo da Toxicidade Aguda provocada pelo alumínio

Para realizar os estudos da Toxicidade Aguda provocada pelo alumínio para as espécies *Raphanus sativus* (rabanete) e *Brassica oleracea L.* (couve) foi escolhido um período de 4 dias (96 horas). No caso deste estudo foi considerado o CE50 quando o crescimento das plântulas atingiu a metade do tamanho do crescimento das que se desenvolveram sem o agente estressor (controle).

Nos estudos de Toxicidade Aguda empregando os íons Al^{+3} como agente estressor para a espécie *Raphanus sativus* (rabanete) no valor de pH 7,0 observou-se que o aparecimento da concentração efetiva (CE50) em torno de $200mg.L^{-1}$ de

alumínio, que se refere à quantidade de alumínio que causou efeito tóxico para reduzir o crescimento da plântula para aproximadamente 50% do tamanho observado no controle (Figura 6).

Nos estudos de Toxicidade Aguda dos íons Al^{+3} para a espécie *Brassica oleracea L.* (couve) no valor de pH 7,5 foi observado que o aparecimento da concentração efetiva (CE50) em torno de $300mg.L^{-1}$ de alumínio, que se refere à quantidade de alumínio que causou efeito tóxico para reduzir o crescimento da plântula para aproximadamente 50% do tamanho observado no controle (Figura 7).

Analisando os resultados de Toxicidades Aguda dos íons Al^{+3} para as espécies *Brassica oleracea L.* (couve) e *Raphanus sativus L.* (rabanete), observa-se que mesmo em valores de pH neutros, os íons Al^{+3} causam efeitos que podem contribuir severamente para inibir o desenvolvimento das espécies estudadas. Isso indica um elevado grau de impacto provocado pelas concentrações de alumínio, tendo em vista que as características da toxicidade aguda para os organismos que em alguns casos podem chegar à letalidade.

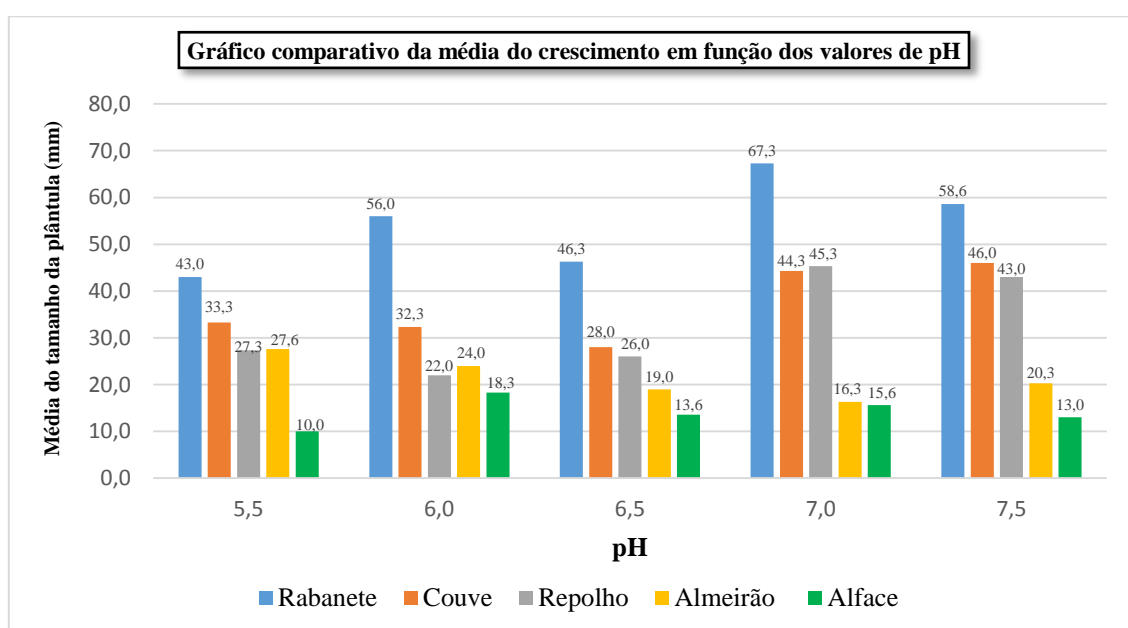


Figura 1 – Estudo do desenvolvimento médio das plântulas em meios de cultivos preparados em diversos valores de pH.

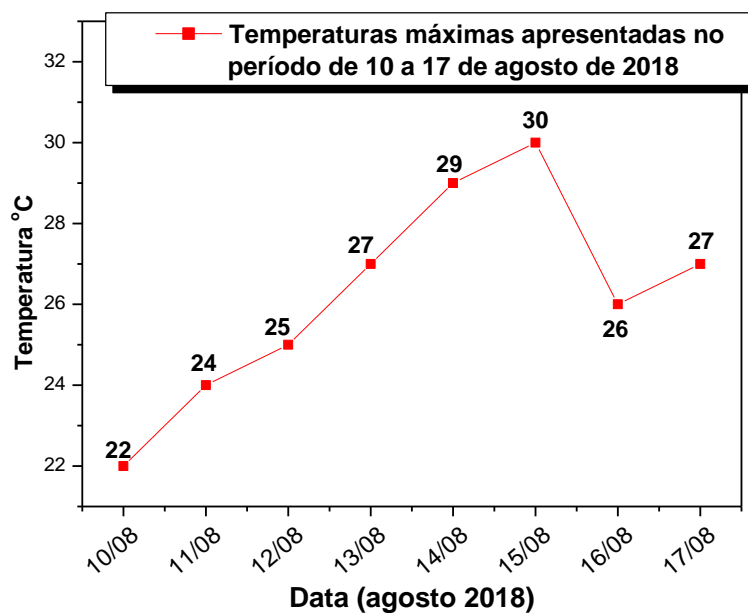


Figura 2 – Temperaturas máximas apresentadas no período de 10 a 17 de agosto de 2018.
Fonte: Condições meteorológicas do mês em Araras-SP (www.accuweather.com)



Figura 3 - Comprimento das plântulas cultivadas em meios de cultura com concentrações de íons alumínio.

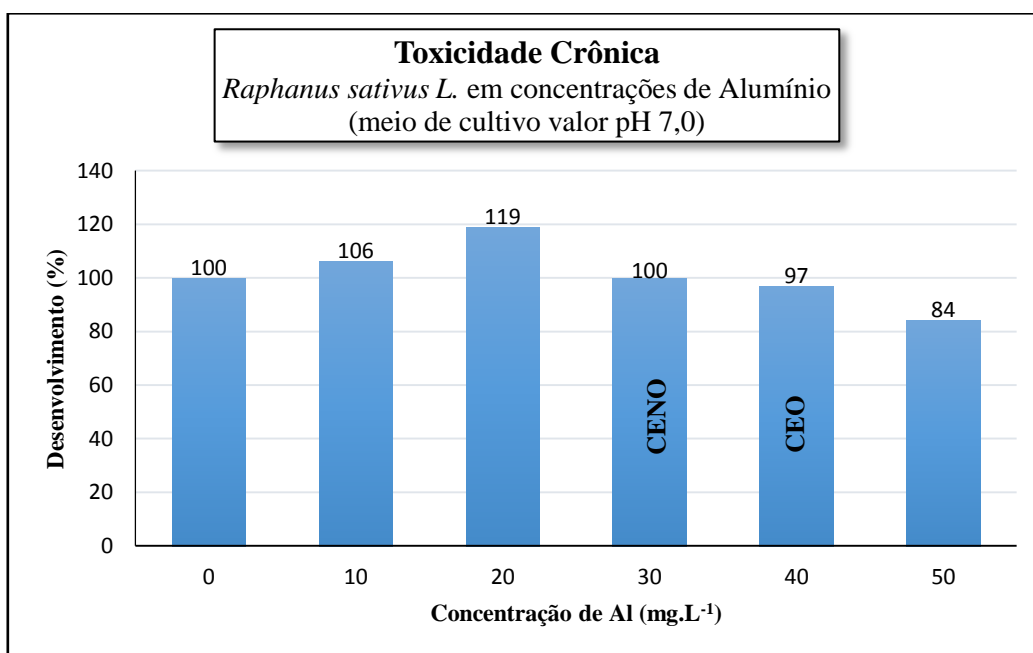


Figura 4 – Estudo da Toxicidade Crônica do alumínio para a espécie *Raphanus sativus L.* em meio de cultivo no valor pH 7,0.

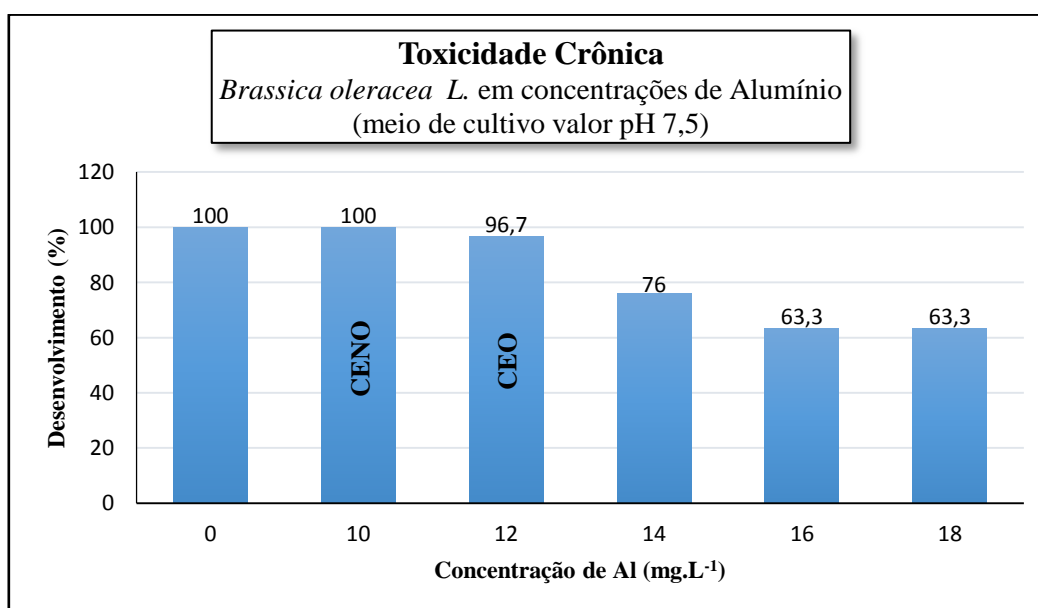


Figura 5 - Estudo da Toxicidade Crônica do alumínio para a espécie *Brassica oleracea L.* em meio de cultivo no valor pH 7,5.

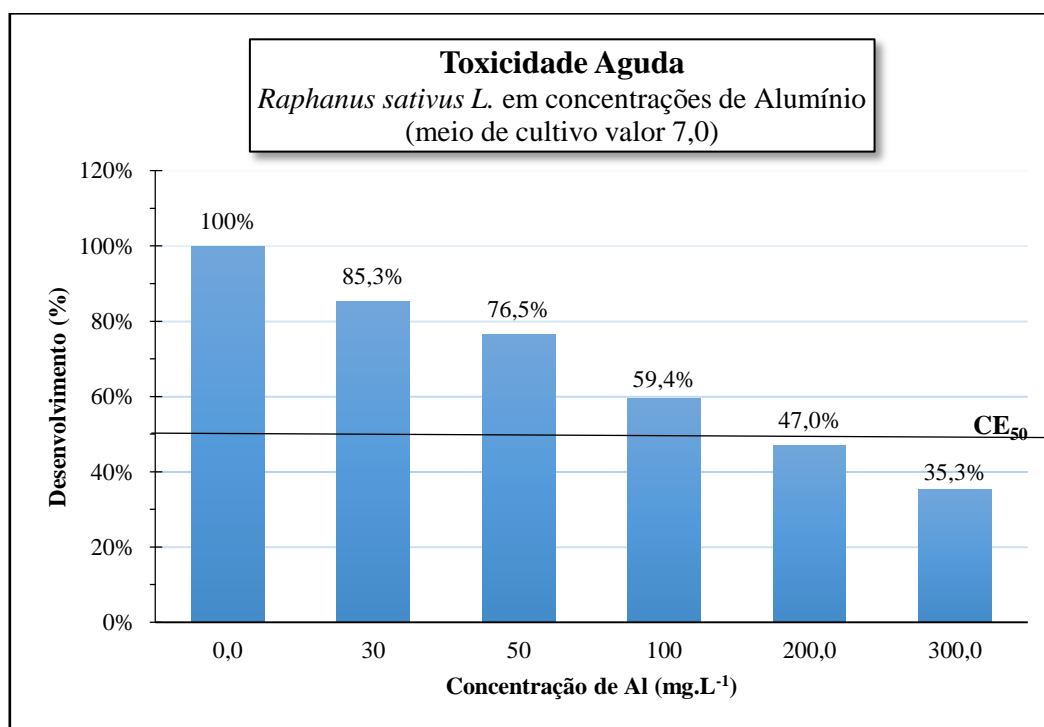


Figura 6 – Estudo da Toxicidade Aguda do alumínio para a espécie *Raphanus sativus L.* em meio de cultivo no valor pH 7,0.

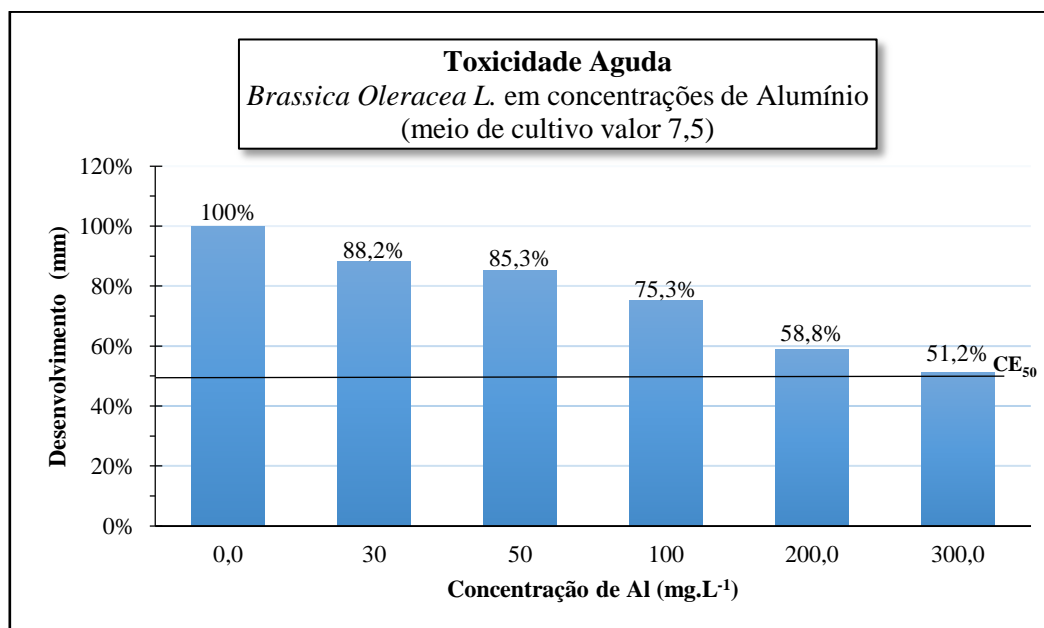


Figura 7 - Estudo da Toxicidade Aguda do alumínio para a espécie *Brassica oleracea L.* em meio de cultivo no valor pH 7,5.

CONCLUSÕES

Apesar de a literatura científica afirmar que a toxicidade do alumínio ocorre somente em valores de pH abaixo de 5,5 devido a sua solubilidade, neste

estudo pôde ser comprovada as Toxicidades Agudas e Crônicas dos íons Al³⁺ em valores de pH 7,0 e 7,5 para as

espécies *Raphanus sativus* L. (rabanete) e *Brassica oleracea* L. (couve).

Segundo Vitorello et al., (2005), a toxicidade do alumínio tem sido frequentemente associada às perturbações induzidas pelos íons Al^{3+} no metabolismo celular do Ca^{2+} . Porém, em valores de pH em torno de 7,3 a concentração de alumínio livre é tão limitada que não consegue competir com Mg, Ca e Fe ao citoplasma das plantas.

Contudo, nos estudos desenvolvidos por Botta-Paschoal (2005),

foi verificado que alguns compostos poluentes são severamente tóxicos para algumas espécies que mesmo insolúveis apresentam-se biodisponíveis e podem produzir anormalidades, provocando alterações de amplas proporções no desenvolvimento do organismo.

Diante disto, este estudo traz a necessidade de elucidar os efeitos encontrados pelo alumínio em valores de pH neutro e ligeiramente básicos e entender claramente os mecanismos que provocam tal toxicidade.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi desenvolvido a partir do Programa de Educação Tutorial - PET Licenciatura em Química (PET/MEC/SESu/DIFES), Centro de Ciências Agrárias (CCA) - Universidade

Federal de São Carlos (UFSCar). Os autores agradecem o suporte técnico e as bolsas cedidas pela CAPES por meio do Programa PET.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOCHI-SILVA, N, DOS SANTOS, E. M. R.; PELEGRINI-BRITO, N. N.; PELEGRINI, R. T.; PATERNIANI, J. E. S. **Avaliação da toxicidade crônica do percolado de aterro sanitário e de substâncias químicas: fenol e cromo em sementes de: *Balsamina*, *Dianthus caryophyllus*, *Celósia cristata* e *Celósia argenta* visando o uso na agricultura de flores.** Conferência Internacional em Saneamento Sustentável: Segurança alimentar e hídrica para a América Latina. ECOSAN, Fortaleza-Brasil, (2007).

BOTTA-PASCHOAL, C. M. **Avaliação ecotoxicológica de sedimentos em reservatórios da bacia do rio Tietê, SP, com ênfase na aplicação do estudo de AIT – Avaliação e Identificação da Toxicidade.** São Carlos. 2002. 146 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2002.

CAIRES, E. F.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F.; FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de

cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 22, p. 28, 1998.

DELHAIZE, E. e RYAN, P. R. Aluminum Toxicity and Tolerance in Plants. **Plant Physiology**, v. 107, n. 2, p. 315-321, 1995.

FAGERIA, N. K. Resposta de arroz de terras altas à correção de acidez em solo de cerrado. **Pesq. agropec. bras.**, v.35, n.11, p.2303-2307, nov. 2000

GOLDSTEIN, G. E.; BERTOLETTI, E.; ZAGATTO, P. A.; ARAUJO, R. P. A.; RAMOS, M. L. C. **Procedimentos para utilização de testes de toxicidade no controle de efluentes líquidos.** CETESB, São Paulo, Série manuais, v. 6, p. 17, 1990.

HAUG, A. e VITORELLO, V. Aluminium coordination to calmodulin: Thermodynamic and kinetic aspects. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 149, p. 113-124, 1996.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal.** 1.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004.

- KOCHIAN, L. V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 46, p. 237-260, 1995.
- KOYAMA H.; TODA T.; HARA, T. Brief exposure to low-pH stress causes irreversible damage to the growing root in *Arabidopsis thaliana*: pectin-Cainteraction may play an important role in proton rhizotoxicity. **Journal of experimental botany**, v. 52, n. 355, p. 361-368, 2001.
- LIU, K. e LUAN, S. Internal aluminum block of plant inward K^+ channels. **Plant Cell**, v. 13, n. 6, p.1453-1465, 2001.
- MARIANO, E. D.; JORGE, R. A.; KELTJENS, W. G.; MENOSSI, M. Metabolism and root exudation of organic acid anions under aluminium stress. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, n. 1, p. 157-172, 2005.
- MARIENFELD, S. e LEHMANN, H.; STELZER, R. Ultrastructural investigations and EDX-analyses of Al-treated oat (*Avena sativa*) roots. **Plant and Soil**, v. 171, n. 1, p. 167-173, 1995.
- MARIENFELD, S. e STELZER, R. X-ray microanalyses in roots of Al-treated *Avena sativa* plants. **Journal of Plant Physiology**, v. 141, n. 5, p. 569-573, 1993.
- MATSUMOTO, H.; HIRASAWA, E.; TORIKAI, H.; TAKAHASHI, E. Localization of absorbed aluminum in pea root and its binding to nucleic acids. **Plant and Cell Physiology**, v. 17, n. 1, p. 127-137, 1976.
- OWNBY, J. D. Mechanisms of reaction of hematoxylin with aluminum-treated wheat roots. **Physiologia Plantarum**, v. 87, n. 3, p. 371-380, 1993.
- PELEGRINI, R. T.; MEDINA, A. F.; MENDES, F.; MOLENA, J. C.; GREVE, L. F.; SALMAZO, L. G. S.; MILANI, P. A.; ANDRADE, P. G.; TOGNOLI, R. B. Metodología de evaluación ecotoxicológica empleando germinación de semillas en gel nutriente como medio de cultura. **Rev. Ambient. Água**, v. 9, n. 2, p. 359-372, 2014.
- PETTERSSON, A. e BERGMAN, B. Effects of aluminum on ATP pools and utilization in the cyanobacterium *Anabaenacylindrica* – a model for the *in vivo* toxicity. **Physiologia Plantarum**, v. 76, n. 4, p. 527-534, 1989.
- SANTOS, E. M. R.; BOCHI-SILVA, N.; BRITO-PELEGRINI, N. N.; PELEGRINI, R. T.; PATERNIANI J. E. S. Avaliação da toxicidade crônica do percolado de aterro sanitário e de substâncias químicas fenol e cobre em sementes de: *Lactuca sativa* L., *Lycopersicon esculentum* Mill. e *Abelmoschus esculentus* L. visando o uso na agricultura de hortaliças. **Conferência Internacional em Saneamento Sustentável: segurança alimentar e hídrica para a América Latina**. Fortaleza: ECOSAN, 2007.
- SCHMOHL, N. e HORST, W. J. Cell wall pectin content modulates aluminium sensitivity of *Zeamays* (L.) cells grown in suspension culture. **Plant, Cell & Environment**, v. 23, n. 7, p. 735-742, 2000.
- SILVÉRIO, P. F.; FONSECA, A. L.; BOTTA-PASCHOAL, C. M. R.; MOZETO, A. A. Release, bioavailability and toxicity of metals in lacustrine sediments: A case study of reservoirs and lakes in SE Brazil. **Aquatic Ecosystem Health & Management**, v. 8, p. 1-10, 2005.
- SOARES, C. R. F. S.; ACCIOLY, A. M. A.; MARQUES, T. C. L. L. S. M.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Acúmulo e distribuição de metais pesados nas raízes, caule e folhas de mudas de árvores em solo contaminado por rejeitos de indústria de zinco. **Revista Brasileira Fisiologia Vegetal**. v.13, n.3, p.302, 2001.
- SOUZA, D. S. S.; RAMOS, J. L.; DIAS, A. B.; PORTELA, A. L. R.; VILLA, F. B.; GODOY, G. B.; CRISTIANO, G. A.; GODOI, I. R.; MONTEIRO, G. J. O. F.; GABRIEL, L.; VOLPE, M. C.; NEVES, V. D. D.; SEBASTIANI, R.; R. T. PELEGRINI. Estudo da toxicidade da

ureia na germinação de rabanete e couve.

Brazilian Journal of Biosystems Engineering v. 13, n.3, p. 262-270, 2019.

VITORELLO, V. A.; CAPALDI, F. R.; STEFANUTO, V. A. Recent advances in aluminum toxicity and resistance in higher

plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, n. 1, p. 129-143, 2005.

ZHAO, X-J.; SUCOFF, E.; STADELMANN, E. J. Al^{3+} and Ca^{2+} alteration of membrane permeability of *Quercus rubra* root cortex cells. **Plant Physiology**, v. 83, n. 1, p. 159-162, 1987.