

Padrões físicoquímicos da toxidez causada por cobre em raízes de *Allium cepa*

Physicochemical patterns of copper toxicity in *Allium cepa* roots

Patrones físicoquímicos de toxicidad por cobre en raíces de *Allium cepa*

Recebido: 08/10/2022 | Revisado: 22/10/2022 | Aceitado: 24/10/2022 | Publicado: 28/10/2022

Gustavo Moreira Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2016-2600>
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil
E-mail: moreirasilvagustavo36@gmail.com

Isabella do Nascimento Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0713-6686>
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil
E-mail: isa_oliveirajm@outlook.com.br

Milena Caetano de Carvalho Fernandes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8384-2937>
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil
E-mail: mc3540362@gmail.com

Fabiola de Sampaio Rodrigues Grazinoli Garrido

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5177-1241>
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil
E-mail: fabiola_srg@yahoo.com.br

Resumo

O trabalho propôs a correlação entre dados de condutividade elétrica e pH em tratamentos com doses diferenciadas de cobre. O cobre desempenha funções bioquímicas centrais no metabolismo de seres vivos. Entretanto, é considerado um poluente prioritário. Como a absorção de cobre é mediada por H⁺-ATPases de membrana, e a biodisponibilidade é maior em solos ácidos, a toxidez pode ser detectada nas alterações de pH e condutividade elétrica. O trabalho teve como modelo bulbos de cebolas, *Allium cepa*. Foram estabelecidos dois tratamentos: 0,04 mg.L⁻¹ Cu⁺⁺ (tratamento 1) e 0,40 mg.L⁻¹ Cu⁺⁺ (tratamento 2), além de um controle. Cada tratamento contou com seis repetições e foram analisados em quatro dias de coleta (1^o, 7^o, 8^o e 16^o dias após o plantio - DAP). As plantas cresceram em água destilada até os 7 DAP. No 8^o DAP, as soluções que definiam os tratamentos: 0; 0,04 e 0,40 mg.L⁻¹ Cu⁺⁺ substituíram a solução inicial até a coleta aos 16 DAP. Houve alteração morfológica nas raízes submetidas aos tratamentos. A inibição do crescimento radicular foi evidente e não houve ramificação. Houve diferença significativa entre as doses quando foi analisada a condutividade elétrica (CE) e pH. No entanto, na maior dose oferecida, 0,40 mg.L⁻¹ Cu⁺⁺ (tratamento 2) a CE não variou até os 16 DAP. O crescimento das plantas do tratamento 2 foi comprometido. Dependendo do tratamento, a planta pode ter tolerado doses menores, mas não resistiu aos danos provocados pela toxidez em nível dez vezes maior.

Palavras-chave: Contaminação por metais; Olerícolas; Morfologia radicular.

Abstract

The work proposed the correlation between electrical conductivity data and pH in treatments with different doses of copper. Copper plays central biochemical functions in the metabolism of living beings. However, it is considered a priority pollutant. As copper uptake is mediated by membrane H⁺-ATPases, and bioavailability is higher in acidic soils, toxicity can be detected in changes in pH and electrical conductivity. The work was modeled on onion bulbs, *Allium cepa*. Two treatments were established: 0.04 mg.L⁻¹ Cu⁺⁺ (treatment 1) and 0.40 mg.L⁻¹ Cu⁺⁺ (treatment 2), plus a control. Each treatment had six replications and were analyzed in four days of collection (1st, 7th, 8th and 16th days after planting - DAP). The plants were grown in distilled water until 7 DAP. On the 8th DAP, the solutions that defined the treatments: 0; 0.04 and 0.40 mg.L⁻¹ Cu⁺⁺ replaced the initial solution until collection at 16 DAP. There was morphological alteration in the roots submitted to the treatments. Inhibition of root growth was evident and there was no branching. There was a significant difference between doses when electrical conductivity (EC) and pH were analyzed. However, at the highest dose offered, 0.40 mg.L⁻¹ Cu⁺⁺ (treatment 2), EC did not change until 16 DAP. Plant growth in treatment 2 was compromised. Depending on the treatment, the plant may have tolerated lower doses, but could not resist the damage caused by toxicity at a tenfold higher level.

Keywords: Metal contamination; Vegetable crops; Root morphology.

Resumen

El trabajo propuso la correlación entre los datos de conductividad eléctrica y el pH en tratamientos con diferentes dosis de cobre. El cobre cumple funciones bioquímicas centrales en el metabolismo de los seres vivos. Sin embargo, se

considera un contaminante prioritario. Como la absorción de cobre está mediada por H⁺-ATPasas de membrana, y la biodisponibilidad es mayor en suelos ácidos, la toxicidad puede detectarse en cambios en el pH y la conductividad eléctrica. La obra se inspiró en bulbos de cebolla, *Allium cepa*. Se establecieron dos tratamientos: 0,04 mg. L⁻¹ Cu⁺⁺ (tratamiento 1) y 0,40 mg.L⁻¹ Cu⁺⁺ (tratamiento 2), más un control. Cada tratamiento tuvo seis repeticiones y se analizaron en cuatro días de colecta (días 1, 7, 8 y 16 después de la siembra - DDS). Las plantas se cultivaron en agua destilada hasta los 7 DDS. El día 8 DDS, las soluciones que definieron los tratamientos: 0; 0.04 y 0.40 mg.L⁻¹ Cu⁺⁺ reemplazó la solución inicial hasta la recolección a los 16 DDS. Hubo alteración morfológica en las raíces sometidas a los tratamientos. La inhibición del crecimiento de las raíces fue evidente y no hubo ramificación. Hubo una diferencia significativa entre las dosis cuando se analizó la conductividad eléctrica (CE) y el pH. Sin embargo, a la dosis más alta ofrecida, 0.40 mg.L⁻¹ Cu⁺⁺ (tratamiento 2), la CE no cambió hasta los 16 DDS. El crecimiento de las plantas en el tratamiento 2 se vio comprometido. Dependiendo del tratamiento, la planta puede haber tolerado dosis más bajas, pero no pudo resistir el daño causado por la toxicidad a un nivel diez veces mayor.

Palabras clave: Contaminación por metales; Cultivos de hortalizas; Morfología de la raíz.

1. Introdução

Fontes de energia mais sustentáveis, com menor emissão de poluentes e elevada eficiência, passam pelo uso de metais como o cobre (Martins et al., 2020). Países como a China já entraram em transição na busca por energia limpa e renovável. É fundamental para a construção de equipamentos com tecnologia sustentável. Nesse caminho, os chineses reúnem 40 % da produção mundial de cobre de forma primária e secundária, ou seja, são líderes tanto na extração quanto na reciclagem (Zhang et al., 2022). Por outro lado, a produção de cobre resulta na emissão exacerbada de gases do efeito estufa e contribui com a contaminação por resíduos sólidos na produção de energia e no transporte de resíduos. Assumindo-se a produção primária ou a reciclagem do cobre como caminhos mais recentes na busca por tecnologia sustentável, é imperioso propor sistemas de gestão ambiental capazes de contribuir para a detecção, destinação de resíduos ou para a remediação de áreas contaminadas por esse elemento.

Por outro lado, esse elemento de transição desempenha funções bioquímicas centrais no metabolismo de seres vivos. Em plantas, está no rol de oito micronutrientes essenciais para o crescimento e desenvolvimento vegetal (Nazir et al., 2019). É suplementado em culturas de leguminosas para aumentar a produção de grãos (Bueno et al., 2021). Ainda assim, em função da atividade humana na indústria, da mineração e da atividade agrícola, é considerado um poluente prioritário e frequentemente encontra-se na água (Shruthi et al., 2018; Gonzaga et al., 2020). Em escala mundial, acompanhando-se o uso na agricultura e na indústria, a mineração tem aumentado. Em 2018, a mineração alcançou a ordem de 21.000 toneladas, destinando-se 44% para a construção civil, 20 % no transporte de máquinas, 19 % na indústria eletroeletrônica, 11 % em produtos de consumo e 6% no maquinário industrial (Shabbir, 2020).

Nesse contexto, os mecanismos que levam à absorção desse elemento serão cada vez mais considerados para proposição de modelos de detoxificação e recuperação de áreas contaminadas. Assim, o objetivo do trabalho foi analisar o efeito do cobre sobre os parâmetros de condutividade elétrica e pH em condições de toxidez do elemento na solução de crescimento de cebola (*Allium cepa*).

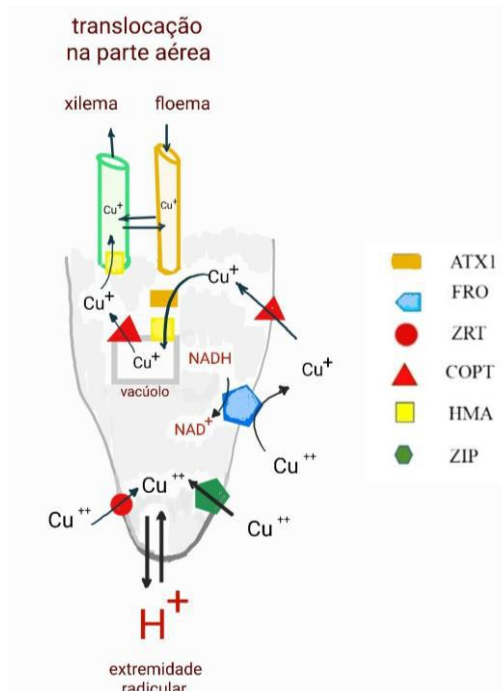
1.1 Absorção de cobre

Cobre é um elemento essencial para a condução de reações químicas nas plantas e animais, porém, representa toxidez em concentrações acima do permitido. Em concentrações fisiológicas nas plantas é cofator de enzimas centrais, viabiliza a fotossíntese, participa de proteínas na cadeia respiratória, viabiliza a biossíntese de lignina, faz parte da estrutura de genes de defesa, além de estar envolvido na sinalização hormonal (Mir et al., 2021). Briceño et al. (2020) destacam a contaminação humana por metais como uma situação de risco, embora os metais sejam necessários como nutrientes em concentrações adequadas. Em excesso, compromete a germinação e o desenvolvimento de sementes, bem como a resposta antioxidante (Gonzaga et al., 2020). Os efeitos da toxidez por cobre incluem o crescimento desigual de raízes e parte aérea, clorose foliar,

necrose e morte da planta (Zhang e Li, 2019). Observou-se que as interconversões entre Cu^{++} e Cu^+ podem gerar espécies reativas ao oxigênio (ROS), moléculas que danificam as membranas e várias estruturas biológicas, como DNA, lipídios e proteínas (Labudda et al., 2022).

Em concentrações normais para cada tipo de solo, o cobre (Cu^{++}) é um cátion bivalente ou monovalente (Cu^+) cujas cargas favorecem a adsorção por minerais em solos com elevada CTC (Capacidade de Troca Catiônica). Isso significa que ele interage com a matriz mineral e matéria orgânica dos solos. Cobre bivalente tem maior afinidade por solos com elevado teor de matéria orgânica, quando se avaliam outros cátions bivalentes (Mishra et al., 2019). Na retenção do cobre, a matéria orgânica está relacionada à formação de complexos de esfera interna (Alleoni et al., 2005). Ainda assim, no processo de absorção por sistemas radiculares, a presença de H^+ no solo permite a troca de Cu^{++} por H^+ nas argilas, de modo que a disponibilidade de Cu^{++} aumenta com a acidificação do meio. Assim, o cobre está biodisponível em solos mais ácidos ou quando as células radiculares apresentam atividades de H^+ -ATPases mais intensamente. O mecanismo de absorção por plantas inclui a ativação de H^+ -ATPases de membrana por fosforilação. Ele elevou a atividade da catalase e da ascorbato peroxidase, o que reduziu o nível de H_2O_2 em raízes de abóbora (Janicka-Russak et al., 2012). Além disso, ele elevou nas células de raízes de abóbora os níveis de proteínas reconhecidas envolvidas na resistência ao estresse oxidativo, as chaperonas. Na Figura 1 foram representados os mecanismos de absorção de cobre pela raiz (Shabbir et al., 2020; Bowers & Srari, 2018). O cobre é absorvido como cátion bivalente ou monovalente, por ação de ATPases ou de uma oxidase (oxidase redutase férrica). Na absorção, o pH da solução do solo diminui e a condutividade elétrica pode ser elevada.

Figura 1 - Absorção e transporte de cobre. As enzimas envolvidas no processo são: ATX1 (proteína antioxidante 1); FRO (oxidase redutase férrica); ZRT (transportadores regulados por zinco); COPT (transportador de cobre); HMA (H^+ -ATPase de metais pesados) e ZIP (proteínas ZIP). Modificado de Shabbir et al., (2020).



Fonte: Autores.

A Figura 1 apresenta a absorção de Cu^{++} favorecida pela atividade de H^+ -ATPases, que acidificam a rizosfera. Além disso, as proteínas ZIP, intimamente ligadas ao transporte de metais, viabilizam o transporte através de um transportador uniporte.

Cobre em forma bivalente (Cu^{++}) é absorvido, ou pode ser reduzido pela FRO (oxidase redutase férrica). Ao ser reduzido a Cu^+ é transportado pelo transportador de cobre (COPT) de membrana ou é remobilizado a partir dos estoques em vacúolos (Martins et al., 2012).

A proposta de monitoramento de condutividade elétrica e pH da solução do solo ou da solução nutritiva pode gerar mecanismos para acompanhamento de propostas de fitorremediação, por exemplo. A fitorremediação constitui uma técnica proveitosa em áreas contaminadas com excesso de xenobióticos e metais pesados (Ferreira-de-Campos, Oliveira e Schweitzer, 2017). No trabalho com mudas de *Pinus taeda* inoculados com fungos micorrízicos, a inoculação se apresentou eficiente na absorção de cobre.

Nas condições em tela, a presença de H^+ para viabilizar a absorção de cobre pode ser detectada nas alterações de pH e condutividade elétrica tanto da solução do solo, quanto de solução nutritiva, em cultivo hidropônico. Áreas contaminadas por metais ou xenobióticos com cargas apresentam alterações nos padrões de condutividade que podem superar a faixa de 100 mS.cm^{-1} na solução do solo. Ao se compararem as faixas de condutividade elétrica com água destilada, água de torneira e água do mar, é possível perceber a presença de íons que indistintamente mudam esse parâmetro em função das cargas que apresentam. Particularmente no caso do cobre, os solos classificados como fortemente ácidos, com pH abaixo de 5,0, permitem maior solubilidade dos metais, o que otimiza a absorção (Briceño et al., 2020). Bon et al. (2020) associaram a presença de poluentes como NO_3^- aos incrementos na CE em águas poluídas na Baía do rio Chad, em Camarões. Eles distinguiram até seis faixas de condutividade elétrica e relacionaram-nas aos níveis de poluição. Em outro trabalho, a CE da solução do solo extraída possibilitou prever a distribuição espacial de contaminantes inorgânicos em solos da cidade de Bagdá (Shakir et al., 2011).

No presente trabalho, foi proposta a correlação entre dados de condutividade elétrica e pH em tratamentos com doses diferenciadas de cobre, de forma a perceber quando o sistema radicular não se desenvolve, ou ainda, se a absorção é comprometida pelos níveis de cobre, mesmo na presença de raízes previamente desenvolvidas.

2. Metodologia

A pesquisa em tela utilizou-se de procedimentos experimentais em laboratório, com abordagem quanti-qualitativa, de objetivos explicativos (Gil, 2008; Pereira et al., 2018). O objetivo foi determinar os efeitos de concentrações crescentes de cobre sobre o desenvolvimento radicular de cebolas (*Allium cepa*).

2.1 Desenho experimental e análise química

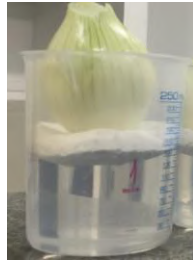
O experimento foi conduzido dentro de um desenho completamente randomizado, em esquema fatorial 3×2 , com três soluções de cultivo ($0 \text{ mg.L}^{-1} \text{ Cu}^{++}$ - controle; $0,04 \text{ mg.L}^{-1} \text{ Cu}^{++}$ - tratamento 1; $0,40 \text{ mg.L}^{-1} \text{ Cu}^{++}$ - tratamento 2) e dois parâmetros (pH e condutividade elétrica) e seis repetições (Gonzaga et al, 2020).

O trabalho teve como modelo bulbos de cebolas, *Allium cepa*, uma espécie comprovadamente sensível à toxidez por cobre (Palácio et al. 2013; Messias et al., 2021). Foram estabelecidos dois tratamentos completamente randomizados, com as doses $0,04 \text{ mg.L}^{-1} \text{ Cu}^{++}$ (tratamento 1) e $0,40 \text{ mg.L}^{-1} \text{ Cu}^{++}$ (tratamento 2), além de um grupo de plantas mantidas em água destilada (controle). Cada tratamento contou com seis repetições. Os dias de coleta foram 1º, 7º, 8º e 16º dias após o plantio (DAP).

As cebolas escolhidas eram aproximadamente do mesmo tamanho. As cascas externas secas foram retiradas e os remanescentes de raízes secas foram eliminados com um corte rente ao bulbo feito com auxílio de um estilete. Em seguida, béqueres de polipropileno (250,00 mL) previamente limpos receberam água destilada, a qual foi mantida até o 7º DAP (Figura 2). Dessa forma, as raízes de todas as amostras puderam crescer inicialmente em água destilada até os 7 DAP. No 8º DAP, as soluções que definiam os tratamentos, a saber: 0 (controle); $0,04$ (tratamento 1); $0,40 \text{ mg.L}^{-1} \text{ Cu}^{++}$ (tratamento 2) substituíram a

solução inicial até a marca de 150,00 mL aproximadamente. Foi feito um suporte sem a parte circular central, para que as cebolas estivessem apoiadas pela parte inferior, com raízes em contato com a respectiva solução, de modo que as folhas ficassem para cima.

Figura 2 - Cebolas cujas cascas externas secas foram retiradas e os remanescentes de raízes secas foram eliminados com um corte rente ao bulbo foram dispostas sobre um suporte com a secção central removida. O suporte encaixava-se em béqueres de polipropileno (250,00 mL) previamente limpos, que receberam água destilada.



Fonte: Autores.

A Figura 2 apresentou as cebolas dispostas sobre o suporte no pote de polipropileno, no primeiro dia de experimento.

Apenas os bulbos desbastados permaneceram em contato com a solução, a depender do tratamento (0 (controle); 0,04 (tratamento 1); 0,40 mg.L⁻¹ Cu⁺⁺ (tratamento 2)). Os materiais utilizados foram béqueres de polipropileno de 250,00 mL, sulfato de cobre pentahidratado CuSO₄.5H₂O, água destilada, isopor e estilete.

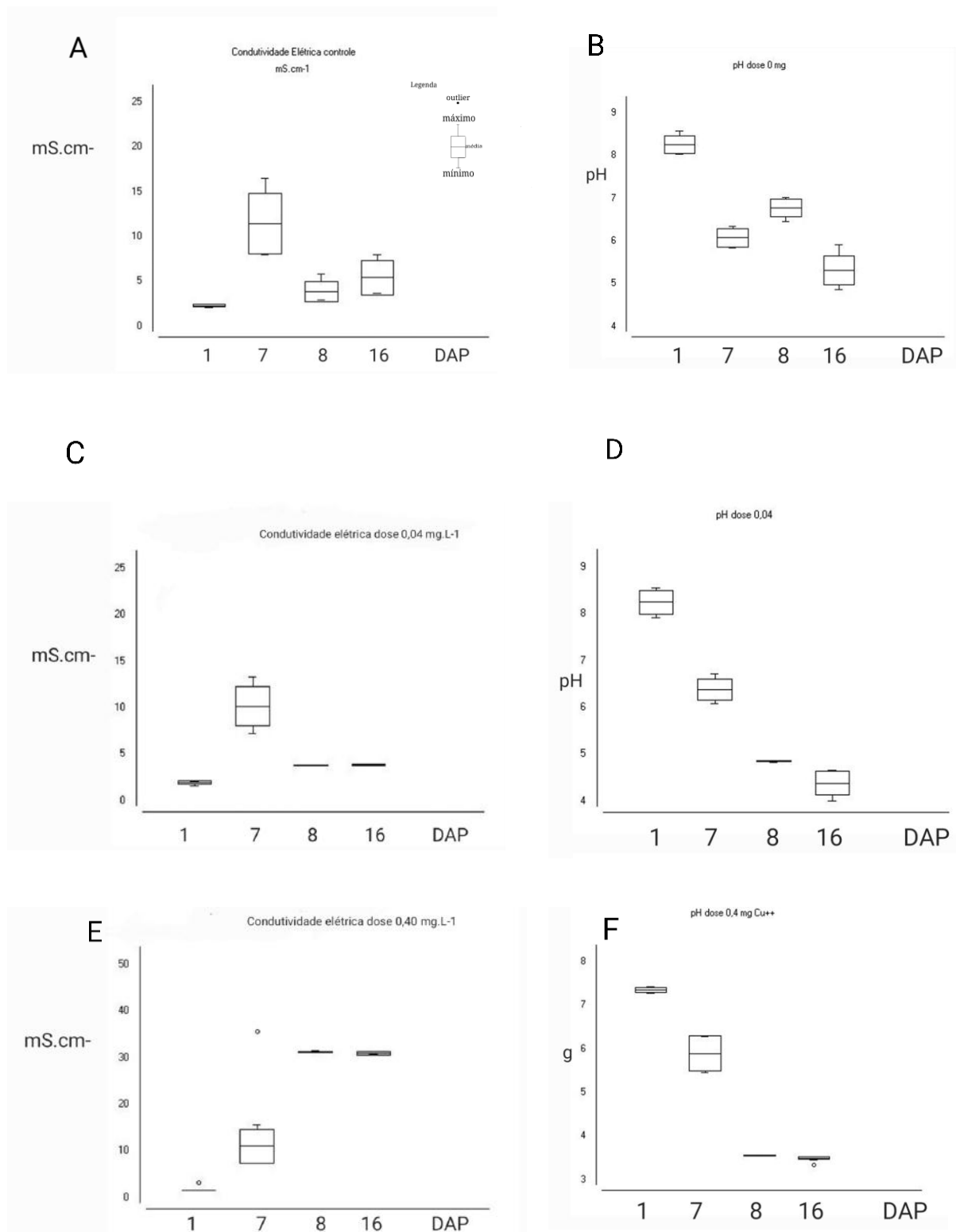
A cada dia água destilada era utilizada para repor o volume da solução. Todas as cebolas permaneceram, dessa forma, em contato com o conteúdo dos béqueres. Nos dias de coleta de dados, foi feita a verificação dos parâmetros de condutividade elétrica (CE), em mS.cm⁻¹, com auxílio de um condutivímetro, e de pH, com o pHmetro. Foi feita coleta dos dados no 1º, 7º, 8º e 16º dias após o plantio (DAP). Na última coleta, aos 16 DAP, as raízes foram removidas e a massa fresca de raízes, em gramas, foi anotada.

Os dados foram tratados no Excel e Jamovi 2.22 (Jamovi, 2020), com análise de variância e teste T (p-valor <0,005).

3. Resultados

Houve diferença significativa entre as doses de Cu⁺⁺ quando foi analisada a condutividade elétrica (CE). No controle e no tratamento 1, com dose 0,04 mg.L⁻¹ Cu⁺⁺, a condutividade elétrica aumentou do 1º para o 7 DAP (Figura 3C, 3D). No entanto, na maior dose oferecida, 0,40 mg.L⁻¹ Cu⁺⁺ (tratamento 2) a CE foi elevada quando se fez a troca da solução inicial pela solução com cobre e assim permaneceu até os 16 DAP. Não houve diferença significativa na CE entre a colocação da solução aos 8 DAP e aos 16 DAP, ou seja, a condutividade elétrica não variou no tratamento 2, entre o 8º e 16º dia. A verificação da condutividade elétrica tem correlação com propriedades de solos (Seifi, Alimardani e Sharifi, 2010) e de soluções nutritivas.

Figura 3 - Condutividade elétrica, em $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, e pH no controle (A, B); no tratamento 1, com $0,04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ Cu}^{++}$ (C, D) e no tratamento 2, com $0,40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ Cu}^{++}$ (E, F).



Fonte: Autores.

Na Figura 3 foi possível observar que os dados de condutividade elétrica e pH estão correlacionados como se esperava para esses parâmetros (Bernert et al., 2015). Dentro de um mesmo tratamento, ou no controle, os incrementos na CE representaram diminuição dos valores de pH. As figuras 3E e 3F apontaram esse contraste. Exatamente na matriz de correlação esses parâmetros demonstraram-se inversamente proporcionais e a correlação foi estatisticamente significativa, com $p < 0,005$, assinalados com marcação em vermelho na tabela (Tabela 1). Até os 7 DAP as plantas foram mantidas sob as mesmas condições, o que não gerou diferenças entre os tratamentos. Isso proporcionou o crescimento inicial de uma rede pequena de raízes e, por sua vez, afasta a possibilidade de raízes não crescerem devido ao desgaste mecânico inicialmente feito na região do bulbo. Nos dias 8 e 16 houve efetivamente o cultivo nas doses 0 (controle), 0,04 (tratamento 1) e 0,40 mg.L^{-1} Cu^{++} (tratamento 2). Nessas coletas foi possível observar a manutenção de valores constantes de CE e pH no tratamento 2 (Figuras 3E e 3F). Simultaneamente, plantas do tratamento 1 apresentaram uma redução do pH da solução entre o 8º e 16º DAP, mas a condutividade elétrica não apresentou diferença significativa (Figuras 3C e 3D).

Tabela 1 - Matriz de correlação com valores de coeficiente de correlação de Pearson e p. Os parâmetros analisados foram CE (condutividade elétrica) e pH no plantio, aos 7,8 e 16 DAP (dias após o plantio). As indicações em vermelho destacam a forte correlação e a diferença significativa.

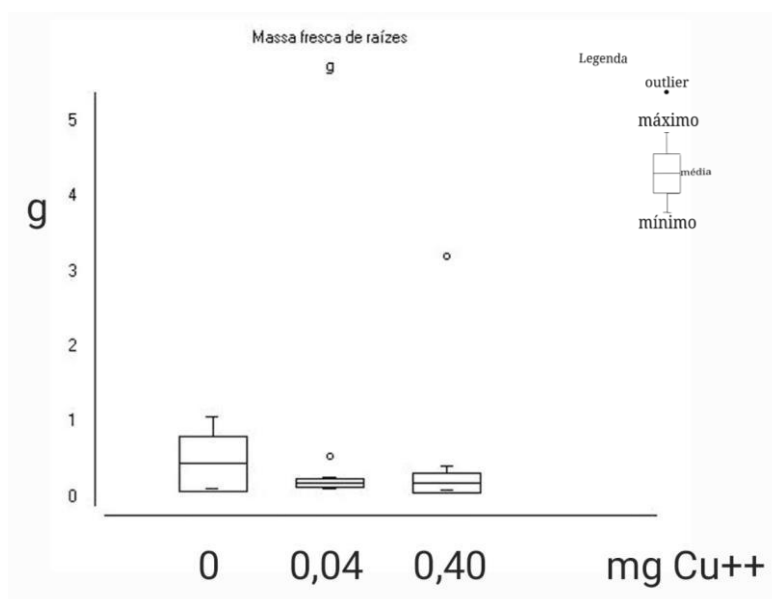
		CE plantio	pH plantio	CE 7DAP	pH 7 DAP	CE 8 DAP	pH 8 DAP	CE 16 DAP	pH 16 DAP
CE plantio	Pearson's r	—							
	p-value	—							
pH plantio	Pearson's r	0.450	—						
	p-value	0.061	—						
CE 7DAP	Pearson's r	-0.318	-0.178	—					
	p-value	0.198	0.479	—					
pH 7 DAP	Pearson's r	0.343	0.360	-0.289	—				
	p-value	0.163	0.142	0.245	—				
CE 8 DAP	Pearson's r	-0.391	-0.756	0.326	-0.151	—			
	p-value	0.109	< .001	0.186	0.550	—			
pH 8 DAP	Pearson's r	0.512	0.874	-0.158	0.286	-0.694	—		
	p-value	0.030	< .001	0.530	0.250	0.001	—		
CE 16 DAP	Pearson's r	-0.369	-0.737	0.348	-0.156	0.996	-0.654	—	
	p-value	0.132	< .001	0.158	0.536	< .001	0.003	—	
pH 16 DAP	Pearson's r	0.434	0.847	-0.177	0.344	-0.651	0.945	-0.631	—
	p-value	0.072	< .001	0.483	0.162	0.003	< .001	0.005	—

Fonte: Autores.

A Tabela 1 apresenta a matriz de correlação de Pearson, contrastando os parâmetros CE (condutividade elétrica) e pH no plantio, aos 7,8 e 16 DAP (dias após o plantio). Quando o coeficiente está entre 0,5 a 0,7 positivo ou negativo indica correlação moderada.

Como o crescimento radicular é inibido fortemente pela toxidez do cobre, parâmetros de pH e CE variaram nos tratamentos 1 e 2 mais em função da presença do cobre do que pela extrusão de prótons provocada nas células radiculares. Ao se analisar a massa de raízes, observou-se menor variação na massa fresca de raízes em plantas submetidas a doses de cobre, em ambos os tratamentos (Figura 4).

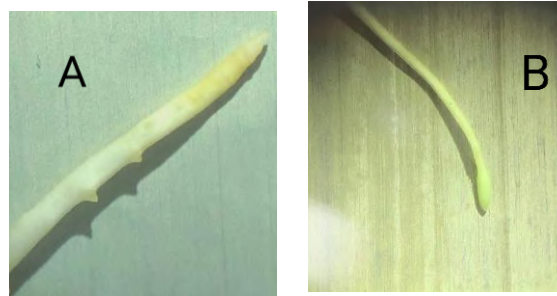
Figura 4 - Massa fresca de raízes no controle (dose 0 mg.L⁻¹), no tratamento 1 (dose 0,04 mg.L⁻¹) e no tratamento 2 (0,40 mg.L⁻¹) obtidas na coleta final, aos 16 DAP.



Fonte: Autores.

Houve alteração morfológica nas raízes submetidas aos tratamentos. Na Figura 5 estão retratados os campos de observação em microscópio estereoscópico uma amostra de raiz controle (A) e do tratamento 1 (B). O padrão se repetiu nas demais amostras. Raízes do controle apresentaram crescimento secundário, enquanto nos tratamentos eram lisas, finas, sem evidenciar a zona de ramificação e a zona pilífera. A inibição do crescimento radicular foi evidente pelo número reduzido de raízes e pela ausência de ramificação.

Figura 5 - Imagem ao microscópio estereoscópico das raízes de plantas do controle (A) e do tratamento 1 (B).



Fonte: Autores.

A Figura 5 apresenta a observação de duas amostras de raízes ao microscópio estereoscópico com aumento de 100 vezes. Raízes do controle (5A) e do tratamento 1 (5B). Nos tratamentos 1 e 2 as raízes eram finas, em menor número e curtas em relação ao controle. Os resultados foram compatíveis com a observação de Palácios (2013), em relação ao menor número de raízes nas cebolas cultivadas com doses crescentes de cobre.

3. Discussão

Associar as variações da condutividade elétrica à presença de contaminantes inorgânicos e outros xenobióticos dotados de carga pode constituir um instrumento para mapeamento ou monitoramento de áreas contaminadas (Bon et al., 2020; Shakir et al., 2011). Nesse sentido, o trabalho apresentou diferença significativa entre as doses quando foi analisada a condutividade elétrica (CE). No controle e no tratamento 1, com dose $0,04 \text{ mg.L}^{-1} \text{ Cu}^{++}$ a condutividade elétrica aumentou do 1º para o 7 DAP (Figura 3C, 3D), o que pode indicar uma tentativa de prospecção de nutrientes. As reservas da planta podem ter proporcionado a emissão de raízes e funcionamento das H^+ -ATPases de membrana, o que reduziu o pH e pode ter provocado elevação da CE.

No entanto, na maior dose oferecida, $0,40 \text{ mg.L}^{-1} \text{ Cu}^{++}$ (tratamento 2) a CE foi elevada quando se fez a troca da solução inicial pela solução com cobre e assim permaneceu até os 16 DAP. Não houve diferença significativa na CE entre a colocação da solução aos 8 DAP e aos 16 DAP, ou seja, a condutividade elétrica não variou no tratamento 2, entre o 8º e 16º dias. Quando as plantas cresciam em solução com a maior dose de Cu^{++} , não apresentaram variação entre o 8º DAP e a coleta (16 DAP) possivelmente devido à menor superfície de absorção. O crescimento radicular foi retardado pela presença do Cu^{++} , o que já está estabelecido (Shabbir et al., 2020; Bowers & Srail, 2018). O pequeno número de raízes nos tratamentos era mais fino, sem zona pilífera, conforme foi observado ao microscópio estereoscópico (Figura 5B).

Os dados de condutividade elétrica e pH estão correlacionados de acordo com o que se esperava para esses parâmetros (Bon et al., 2020). Dentro de um mesmo tratamento, ou no controle, os incrementos na CE representaram diminuição dos valores de pH. As figuras 3E e 3F apontaram esse contraste. Exatamente na matriz de correlação esses parâmetros demonstraram-se inversamente proporcionais (Tabela 1).

Até os 7 DAP as plantas foram mantidas sob as mesmas condições, o que não gerou diferenças entre os tratamentos. No período entre 8 e 16 DAP houve efetivamente o crescimento nas doses 0 (controle), $0,04$ (tratamento 1) e $0,40$ (tratamento 2). Nessas coletas, foi possível observar a manutenção de valores constantes de CE e pH no tratamento 2 (Figuras 3E e 3F), a maior concentração de Cu^{++} . Simultaneamente, plantas do tratamento 1 apresentaram uma redução do pH da solução entre o 8º e 16º DAP, ainda que a condutividade elétrica não apresentasse diferença significativa (Figuras 3C e 3D). A redução de pH como consequência da extrusão de H^+ pode ter proporcionado a absorção de cobre no tratamento com a menor dose. Martins et al. (2021) observaram aumento da taxa líquida de fotossíntese, associada à elevação da condutância estomática, a partir das

aplicações de cobre. Briceño et al. (2020) relataram a biodisponibilidade de cobre em cebolas cultivadas em regiões vulcânicas alcançou níveis aceitáveis no espectro de legislações de alguns países da América do Sul, como Brasil, Austrália, Finlândia. A União Europeia não aceita traços desse e de outros metais.

Por outro lado, a dose de 0,40 mg.L⁻¹ (tratamento 2) não apresentou mudanças no pH, nem em CE, entre o momento em que a dose foi disponibilizada, até a coleta. Provavelmente o fato está correlacionado com a inibição do crescimento radicular, bem como comprometimento da absorção do íon na maior dose. As raízes eram finas, em menor número em relação ao controle.

Os parâmetros de pH e CE foram analisados como indicadores do movimento de absorção de cobre pelas raízes. No entanto, como o crescimento radicular é inibido fortemente pela toxidez do cobre, esses parâmetros podem ter variado nos tratamentos 1 e 2 mais em função da presença do cobre do que pela extrusão de prótons provocada nas células radiculares por H⁺-ATPases. Ao se analisar a massa de raízes, observou-se menor número de raízes nos tratamentos 1 e 2, com massa sem diferença significativa entre os tratamentos (Figura 4). No controle, a emissão de raízes ainda pode ter ocorrido em razão das reservas iniciais do bulbo, observando-se um padrão de exploração do ambiente à procura de nutrientes no controle. Quanto mais raízes, maior a possibilidade de absorção de nutrientes, ainda que a base do crescimento das plantas no controle não tenha a oferta de solução nutritiva.

4. Considerações Finais

No presente trabalho, foi possível observar que o crescimento das plantas na dose mais elevada foi comprometido pela inibição do crescimento radicular e, conseqüentemente, pela reduzida absorção de cobre. Na dose menor, houve aumento na condutividade elétrica e redução do pH no período entre 8 e 16 DAP, o que pode indicar algum influxo de Cu⁺⁺, ainda que tenha sido menor do que no controle. Dependendo do tratamento, a planta pode ter tolerado doses menores, mas não resistiu aos danos provocados pela toxidez em nível dez vezes maior. No solo, o desenho experimental implicaria considerar a interação do cobre com as matrizes orgânicas e minerais. No entanto, já foi observado que é possível monitorar a contaminação com recurso aos dados de CE e pH (Bon et al., 2020; Shakir et al., 2011), o que amplia a possibilidade de estudos dos padrões de absorção para gerar modelos de fitorremediação. Essa aplicação pode se destinar à recuperação de áreas contaminadas com excesso de xenobióticos e metais pesados (Ferreira-de-Campos et al., 2017). A condutividade elétrica se relaciona a informações importantes acerca da poluição do solo (Seifi et al., 2010).

Nesse sentido, constituiu-se ponto de partida para o conhecimento do padrão de absorção da cebola frente às doses de contaminantes metálicos como o cobre. Além disso, há que se considerar a possibilidade de futuros trabalhos que avaliem propostas de fitorremediação para áreas contaminadas ou biodisponibilidade dos elementos, tomando-se como base espécies de interesse agrícola. Gonzaga et al. (2020) perceberam que a toxidez por cobre dependeu da disponibilidade do elemento. A lacuna para futuros trabalhos pode residir no crescimento de plantas em diferentes faixas de pH em solução nutritiva para acompanhamento da absorção de cobre e do desenvolvimento radicular.

Referências

- Alleoni, L. R. F., Iglesias, C. S. M., Mello, S. de C., Camargo, O. A. de, Casagrande, J. C. & Lavorenti, N. A. (2005) Atributos do solo relacionados à adsorção de cádmio e cobre em solos tropicais. *Acta Sci. Agron.* 27(4), 729-737
- Bernert, M. R., Eschemback, V., Jadoski, S. O., Santos Lima, A. D., & Pott, C. A. (2015). Características do pH e condutividade elétrica no manejo de fertirrigação. *Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science/Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, 8(1), 80-87.
- Bon, A. F. Doua, S. A., Banakeng, L. A., Narke, C., Chouto, S. e Ndam, A. M. (2020) Contribution of a geostatistical model of electrical conductivity in the assessment of the water pollution index of the Quaternary aquifer of the Lake Chad basin (Kousseri-Cameroon). *Arabian Journal of Geosciences*. 13: 170, <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5142-1>
- Bowers, K e Srail, S K S (2018) The trafficking of metal ion transporters of the Zrt- and Irt-like protein family. *Wiley Traffic*. 19:813-822. DOI 10.1111/tra.12602

- Briceño, J, Tonato, E, Silva, M, Paredes, M e Armado, A (2020) Evaluación del contenido de metales em suelos y tejidos comestibles de *Allium fistulosum* L. cultivado em zonas cercanas al volcán Tungurahua. *La Granja: Revista de Ciencias de la vida* 32(2): 114-126.
- Bueno, A. M., Flores, R. A., Andrade, A. F. de, Pessoa-de Souza, M. A., Pedreira, N. G., Collier, L. S. & Abdala, K. de O., Mesquita, M., Santos, G. G. (2021) Grain yield and physiological parameters of gas exchange in common bean as a function of copper fertilization. *Research, Society and Development*, 10(4), e42710414234
- Ferreira de Campos, R. F., Oliveira, L. P. e Bianca Schweitzer, B. (2017) Fitorremediação do cobre em mudas de Pínus taeda inoculadas com fungos ectomicorrizicos. *Revista Brasileira de Geografia Física*. 10(3), 690-698
- Gil, A. C. (2008) *Como elaborar projeto de pesquisa*. 4ª edição, São Paulo: Atlas.
- Gonzaga, M., Matias, M., Andrade, K., Jesus, A., Cunha, G., Andrade, R., & Santos, J. (2020). Aged biochar changed copper availability and distribution among soil fractions and influenced corn seed germination in a copper-contaminated soil. *Chemosphere* (Oxford), 240, 124828.
- Jamovi (2020) *The jamovi project 2020*. jamovi. (Version 1.2) [Computer Software]. Acessado em <https://www.jamovi.org>.
- Janicka-Russak, M., Kabala, K. & Burzyński, M (2012) Different effect of cadmium and copper on H⁺-ATPase activity in plasma membrane vesicles from *Cucumis sativus* roots. *Journal of Experimental Botany*, 63(2), 695–709, doi:10.1093/jxb/err313
- Labudda, M., Dziurka, K., Fidler, J., Gietler, M., Rybarczyk-Płóńska, A., Nykiel, M., Prabucka, B.; Morkunas, I. & Muszyńska, E. (2022) The Alleviation of Metal Stress Nuisance for Plants—A Review of Promising Solutions in the Face of Environmental Challenges. *Plants*, 11, 2544. <https://doi.org/10.3390/plants11192544>
- Martins, R.F., Martins, D.A.A., Costa, L.A.C., Matencio, T., Paniago, R.M. e Montoro, L.A. (2020) Copper hexacyanoferrate as cathode material for hydrogen peroxide fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47: 25708-25718
- Martins, V., Hanana, M., Hernâni, E. B. & Gerós, H. (2012) Copper Transport and Compartmentation in Grape Cells, *Plant and Cell Physiology*, 53(11), 1866–1880, <https://doi.org/10.1093/pcp/pcs125>
- Messias, J. B., de Brito, R. L., de Aquino Beltrão, G. T., de Oliveira Messias, I. M., Florêncio, M. S., de Araújo Luz, B. R., & da Silva Filho, J. F. (2021). Citogenotoxicidade e mutagenicidade do sulfato de cobre em diferentes variedades de *Allium cepa* linn Cytogenotoxicity and mutagenicity of copper sulphate in different varieties of *Allium cepa* linn. *Brazilian Journal of Development*, 7(9), 88231-88244.
- Mir, A.R.; Alam, P. & Hayat, S. (2022) Auxin regulates growth, photosynthetic efficiency and mitigates copper induced toxicity via modulation of nutrient status, sugar metabolism and antioxidant potential in *Brassica juncea*. *Plant Physiol. Biochem.* 185, 244–259.
- Mishra, A., Shukla, D., Vaghela, K. & Saraf M (2019) Copper: Its biological role and toxicity. *J Indian Bot Soc* 98:26–35
- Nazir F., Hussain, A. & Fariduddin, Q (2019) Hydrogen peroxide modulate photosynthesis and antioxidant systems in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants under copper stress. *Chemosphere*, Volume 230, 544-558
- Palácio S M, Cunha M B C, Espinoza-Quiñones FR & Nogueira DA (2013) Toxicidade de metais em soluções aquosas: um bioensaio para sala de aula. *Química Nova na Escola*, 35(2), 79-83
- Pereira A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J. & Ricardo Shitsuka, R.. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [free e-book]. Santa Maria/RS. Ed. UAB/NTE/UFSM.
- Seifi, M. R., Alimardani, R., & Sharifi, A. (2010). How can soil electrical conductivity measurements control soil pollution? *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 2(4), 235-238.
- Shabbir, Z, Sardar, A., Shabbir, A, Abbas, G, Shamshad, S., Khalid, S., Ghulam-Murtaza, Dumat, N. C. & Shahid, M. (2020) Copper uptake, essentiality, toxicity, detoxification and risk assessment in soil-plant environment, *Chemosphere*, 259, 127436-127436
- Shakir, W. M, Kadim, W. H. & Hazz'a, M. A. (2011) Top soil layer equi-electrical conductivity and pollution with salts mapping for a region located within Baghdad city. *Baghdad Science Journal*, 8:2, 295-303.
- Shruthi, S. N Shyleshchandran, M., Mahesh-Mohan, S. & Ramasamy, E.V. (2018) Distribution of priority pollutants in the sediment of Vembanad Estuary, Peninsular India. *Marine Pollution Bulletin*, Volume 133, 294-303
- Zhang, D., Liu, X., Ma, J., Yang, H., Zhang & W. Li, C. (2019) Genotypic differences and glutathione metabolism response in wheat exposed to copper. *Environmental and Experimental Botany*, 157, 250-259
- Zhang, J, Tian, X, Chen, W, Geng, Y & Wilson, J (2022) Measuring environmental impacts from primary and secondary copper production under the upgraded technologies in key Chinese enterprises. *Environmental Impact Assessment Review* 96: 1-9