



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO TRÊS RIOS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO MEIO AMBIENTE - DCMA**

**FITORREMEDIAÇÃO: ESTUDO DO POTENCIAL FITOEXTRATOR
DE *Cyperus rotundus* L. EM SOLOS CONTAMINADOS POR COBRE**

Gustavo Moreira Silva

**ORIENTADORA: Prof^a. Dr^a. Fabíola de Sampaio Rodrigues Grazinoli
Garrido**

**TRÊS RIOS - RJ
DEZEMBRO – 2024**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO TRÊS RIOS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO MEIO AMBIENTE - DCMA**

**FITORREMEDIÇÃO: ESTUDO DO POTENCIAL FITOEXTRATOR
DE *Cyperus rotundus* L. EM SOLOS CONTAMINADOS POR COBRE**

Gustavo Moreira Silva

Monografia apresentada ao curso de Gestão Ambiental, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Gestão Ambiental da UFRRJ, Instituto Três Rios da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

**TRÊS RIOS - RJ
DEZEMBRO – 2024**

Silva, Gustavo Moreira, 2024 -

Fitorremediação: estudo do potencial fitoextrator de *Cyperus rotundus* L. em solos contaminados por cobre / Gustavo Moreira Silva. - 2024. 38f.: grafs., tabs.

Orientadora: Fabíola de Sampaio Rodrigues Grazinoli Garrido. Monografia (bacharelado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto Três Rios.

Bibliografia: f. 36-38.

1. Metais Pesados – Micronutriente – Descontaminação – Monografia I. Garrido, Fabíola de Sampaio Rodrigues Grazinoli. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Instituto Três Rios. III.



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO TRÊS RIOS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO MEIO AMBIENTE - DCMA

FITORREMEDIAÇÃO: ESTUDO DO POTENCIAL FITOEXTRATOR DE *Cyperus rotundus* L. EM SOLOS CONTAMINADOS POR COBRE

Gustavo Moreira Silva

Monografia apresentada ao Curso de Gestão Ambiental como pré-requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Gestão Ambiental da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto Três Rios da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Aprovada em 12/12/2024

Banca examinadora:

Prof^a. Dr^a. Fabíola de Sampaio Rodrigues Grazinoli Garrido (Orientadora)

Prof. Dr. Fábio Souto de Almeida

Prof^a. Dr^a. Máira Freire Pecegueiro do Amaral

TRÊS RIOS - RJ
DEZEMBRO – 2024

Dedicatória

“Dedico este trabalho à minha mãe Alexandra, ao meu pai Alceu, à minha irmã Bianca e às minhas sobrinhas Eduarda e Marina. Também dedico à minha orientadora Fabíola por todo o apoio ao longo desta jornada.”

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus e a Nossa Senhora Aparecida por iluminarem meu caminho nos momentos mais difíceis, assim, permitindo que eu concluísse com êxito esse ciclo da minha vida.

Aos meus pais, Alexandra e Alceu, por todo apoio e incentivo ao longo desses cinco anos.

A minha irmã Bianca e as minhas sobrinhas Eduarda e Marina, fontes inesgotáveis de alegria que tornaram o percurso mais fácil.

A minha orientadora Fabíola, cuja sabedoria, paciência e dedicação foram verdadeiros alicerces para o sucesso conquistado ao final desta jornada. Sua confiança em meu potencial e seu apoio constante fizeram toda a diferença em minha trajetória acadêmica. Muito obrigado por tudo.

A minha amiga Milena Caetano, pela amizade e pela parceria de trabalho que foram cruciais para os resultados de sucesso.

Aos docentes do Instituto Três Rios (UFRRJ) que contribuíram para a minha formação.

A toda comunidade acadêmica, em especial às “tias da limpeza”.

E por fim, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta ao longo desta jornada.

“No fim, conservaremos apenas o que amamos. Amaremos apenas o que compreendemos. E compreenderemos apenas o que nos ensinaram.”
(DIOUM, 1968)

RESUMO

O cobre está entre os oito micronutrientes essenciais para o crescimento e desenvolvimento vegetal. Assim como os demais metais pesados, em função da atividade humana no Antropoceno, o cobre comporta-se atualmente como um poluente importante na biosfera. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo identificar o potencial da espécie vegetal *Cyperus rotundus* L. (Cyperaceae), popularmente conhecida como tiririca, no tratamento de solos contaminados por cobre. Dentre os parâmetros estudados estão a redução da quantidade de cobre no solo após experimento, diferença da massa fresca e seca, número de perfilhos e indicadores químicos do solo como condutividade elétrica (CE) e potencial hidrogeniônico do solo (pH). De acordo com os parâmetros analisados, a tiririca demonstrou uma eficiência significativa maior na fitoextração quando os níveis de cobre no solo estavam em doses mais elevadas. A taxa de eficiência da fitoextração realizada pela planta variou de 25% a 86% do cobre disponível. Essa resposta adaptativa indica que a planta possui uma alta capacidade de acumular cobre em condições de elevada contaminação, viabilizando sua utilização na técnica de fitorremediação para descontaminar solos saturados por esse metal. Os perfilhos, brotações basais que auxiliam na propagação vegetativa, não apresentaram alterações significativas em quantidade e comprimento, com números variando de 3 a 7 perfilhos e comprimento médio entre 19,37 cm e 33,25 cm. A massa fresca da parte aérea foi menor no tratamento com a maior dose de cobre, evidenciando que o alto teor de cobre, ao gerar estresse oxidativo, impactou negativamente a formação de biomassa vegetal. A relação entre a massa fresca e seca revelou uma média de 81,17% de água na massa aérea, enquanto a massa seca variou de 0,25g a 0,44 g. O pH do solo, inicialmente alcalino, apresentou variações ao longo dos tratamentos. A adição do sulfato de cobre pentahidratado para simular a contaminação, elevou o pH nos tratamentos devido à neutralização de íons H^+ no solo. No tratamento com a maior dose, que apresentou também maior fitoextração, o pH apresentou-se neutro-alcalino (7,43). A condutividade elétrica (CE) utilizada para medir a salinidade do solo e a presença de íons H^+ , alcançou $986,30 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ao final do experimento no tratamento com maior concentração de cobre, indicando altos níveis de sais dissolvidos na solução solo e a atuação das H^+ -ATPases, que liberam íons H^+ no solo durante o processo de absorção de cobre, consequentemente aumentam a CE. Apesar disso, a tiririca demonstrou elevada tolerância à salinidade, sem efeitos negativos observados em decorrência do estresse hídrico causado por esses níveis. Portanto, a tiririca se revela uma candidata promissora para ser utilizada na fitoextração, particularmente em áreas onde a contaminação de solos por cobre atinge níveis críticos.

Palavras-chave: metais pesados, micronutriente, descontaminação.

ABSTRACT

Copper is among the eight essential micronutrients for plant growth and development. Similar to other heavy metals, due to human activity in the Anthropocene, copper currently behaves as a significant pollutant in the biosphere. In this context, this study aimed to identify the potential of the plant species *Cyperus rotundus* L. (Cyperaceae), commonly known as nutgrass, in the remediation of copper-contaminated soils. Among the parameters studied were the reduction in copper content in the soil after the experiment, differences in fresh and dry biomass, number of tillers, and soil chemical indicators such as electrical conductivity (EC) and soil hydrogen potential (pH). According to the analyzed parameters, nutgrass demonstrated significantly higher efficiency in phytoextraction when copper levels in the soil were at higher doses. The phytoextraction efficiency rate achieved by the plant ranged from 25% to 86% of the available copper. This adaptive response indicates that the plant has a high capacity to accumulate copper under conditions of elevated contamination, enabling its use in the phytoremediation technique to decontaminate soils saturated with this metal. The tillers, basal shoots that assist in vegetative propagation, did not show significant changes in number and length, with values ranging from 3 to 7 tillers and an average length between 19.37 cm and 33.25 cm. The fresh shoot biomass was lower in the treatment with the highest copper dose, indicating that the high copper content, by causing oxidative stress, negatively affected plant biomass formation. The ratio between fresh and dry biomass revealed an average water content of 81.17% in the shoot mass, while the dry biomass ranged from 0.25 g to 0.44 g. The soil pH, initially alkaline, showed variations across the treatments. The addition of copper sulfate pentahydrate to simulate contamination increased the pH in the treatments due to the neutralization of H⁺ ions in the soil. In the treatment with the highest dose, which also exhibited the greatest phytoextraction, the pH was neutral-alkaline (7.43). Electrical conductivity (EC), used to measure soil salinity and the presence of H⁺ ions, reached 986.30 mS·cm⁻¹ at the end of the experiment in the treatment with the highest copper concentration. This indicates high levels of dissolved salts in the soil solution and the activity of H⁺-ATPases, which release H⁺ ions into the soil during the copper uptake process, consequently increasing EC. Despite this, nutgrass demonstrated high tolerance to salinity, with no negative effects observed due to the water stress caused by these levels. Therefore, nutgrass proves to be a promising candidate for use in phytoextraction, particularly in areas where soil copper contamination reaches critical levels.

Keywords: heavy metals, micronutrient, decontamination.

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

ANOVA - Análise De Variância

°C - Graus Celsius

Cd - CádmiO

CE - Condutividade Elétrica

cm – Centímetro

Cu - Cobre

Cu¹⁺ - Cobre Monovalente

Cu²⁺ – Cobre Divalente

CuSO₄.5H₂O – Sulfato de Cobre Pentahidratado

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Fe₂O₃ – Hematita

g – Grama

g/cm³ – Gramas Por Centímetro Cúbico

H – Hidrogênio

H₂O – Água

Hg – Mercúrio

MFPA - Massa Fresca Da Parte Aérea

mg – Miligrama

mg.kg⁻¹ – Miligramas por Quilograma

mg.g⁻¹ - Miligramas por Grama

mL - Mililitro

MMA - Ministério do Meio Ambiente

mol. L⁻¹ – Mols por Litro

mS.cm⁻¹ - MiliSiemens Por Centímetro

MSPA - Massa Seca da Parte Aérea

nm – Nanômetros

Pb - Chumbo

pH - Potencial Hidrogeniônico

SiBCS - Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

T – Tratamento

TFSA – Terra Fina Seca ao Ar

Zn – Zinco

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Após coleta, separação dos tubérculos (A), distribuição do solo nos potes de polietileno (B) e estágio de crescimento das mudas após 11 dias (C).....	19
Figura 2. Modelo esquemático da interação dos íons de Cu^{2+} com a hematita a partir da influência do aumento e redução do pH.	23
Figura 3. Imagem aérea do ponto de coleta (marcador amarelo) e da linha férrea (marcador verde), localização: latitude 22°5'9.44" S e longitude 43° 8'36. 34" O.	24
Figura 4. Estágio crescimento e desenvolvimento das tiriricas <i>in situ</i> , foto obtida no dia da coleta do solo e dos tubérculos da tiririca.....	25
Figura 5. Representação gráfica em porcentagem do cobre fitoextraído em relação ao cobre que estava disponível em cada tratamento, ao final de sete dias de exposição das tiriricas a diferentes doses de cobre.	27
Figura 6. Massa fresca da parte aérea das tiriricas obtida após sete dias de exposição ao cobre.	30
Figura 7. Massa seca da parte aérea obtida após a massa fresca ser levada para estufa por uma hora a 65°C.	31
Figura 8. Porcentagem de água na parte aérea das tiriricas.....	31
Figura 9. Relação do pH inicial do solo e a média obtida de cada tratamento após o experimento.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Concentrações de Cu^{2+} em mol.L^{-1} e a respectiva absorvância no espectrofotômetro para construção da curva padrão.	20
Tabela 2: Médias da quantidade de cobre fitoextraído pela tiririca em cada um dos quatro tratamentos avaliados. Os valores apresentados correspondem à média das três repetições realizadas para cada tratamento.	26
Tabela 3: Número de perfilhos e comprimento médio.	28
Tabela 4: Média dos dados de pH obtidos após experimento.	32
Tabela 5: Média dos dados de CE obtidos após experimento.	34

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. Cálculo da concentração de cobre (mol.L^{-1}) a partir da absorbância a 800 nm.....	21
--	----

LISTA DE FÓRMULAS

Fórmula 1. Cálculo da quantia de Cu^{2+} presente em 10g de solo.....	21
Fórmula 2. Cálculo da quantidade de cobre residual presente no solo após experimento.....	21

Sumário

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO GERAL	17
1.1.1 Objetivos Específicos	18
2. MATERIAIS E MÉTODOS	18
2.1. COLETA DO SOLO, REPLICAÇÃO DAS TIRIRICAS E MONTAGEM DO EXPERIMENTO	18
2.2. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	19
2.3. COLETA E ANÁLISES	19
2.3.1. Parte Aérea	19
2.3.2. Cobre no Solo	20
2.3.3. pH e CE	22
2.4. ANÁLISES ESTATÍSTICAS	22
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
3.1. CONTAMINAÇÃO DA ÁREA DE COLETA	22
3.1.1. Caracterização do Solo	22
3.1.2. Fonte de Contaminação	23
3.2. POTENCIAL DE REMOÇÃO DE COBRE PELA TIRIRICA	25
3.2.1. Características da tiririca essenciais para a fitorremediação	25
3.2.2. Desempenho da tiririca na fitoextração	26
3.3. PARTE AÉREA.....	28
3.3.1. Perfilhamento	28
3.3.2. Análise da massa fresca e seca da biomassa aérea da tiririca	29
3.3.2.1. <i>Massa fresca</i>	29
3.3.2.2. <i>Relação entre massa seca e fresca</i>	30

3.4. PARÂMETROS QUÍMICOS DO SOLO	32
3.4.1. pH	32
3.4.2. Condutividade elétrica	34
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
5. REFERÊNCIAS	36

1. INTRODUÇÃO

Os metais pesados compõem um grupo heterogêneo de elementos químicos inorgânicos, que possuem número atômico maior que 20 e/ou densidade atômica superior a 5 g/cm^3 , estão diretamente ligados à poluição ambiental e apresentam alta toxicidade aos seres vivos, mesmo em concentrações relativamente baixas (Malavolta et al. 1997). A crescente presença desses metais no ambiente é resultado principalmente das atividades antropogênicas que se tornaram fatores determinantes no ciclo biogeoquímico dos metais pesados, mobilizando-os para a biosfera em níveis cada vez mais alarmantes (Sodré et al. 2001).

Em consequência, os níveis elevados desses metais nos solos têm gerado uma preocupação crescente, já que o solo desempenha um papel único na biosfera, pois além de funcionar na qualidade de um depósito geoquímico natural, ele regula o movimento desses elementos para a atmosfera, hidrosfera e a biota. Nos solos brasileiros, metais como cobre (Cu), cádmio (Cd), chumbo (Pb), zinco (Zn) e mercúrio (Hg) são os principais responsáveis pela contaminação, estes colocam em risco a sustentabilidade ambiental e agrícola (Freitas et al. 2009). As concentrações anômalas desses metais trazem graves consequências à saúde humana, com destaque para a contaminação da cadeia trófica via absorção vegetal, assim, contribuindo para intensificação da crise da insegurança alimentar (Martins et al. 2011, Santos et al. 2018).

Dentre os metais associados à contaminação dos solos brasileiros destaca-se o cobre (Cu), elemento essencial para as plantas e outros organismos (Festa & Thiele 2011). Tal essencialidade, se comprova pelo fato de o cobre estar no rol dos oito micronutrientes fundamentais para o crescimento e desenvolvimento vegetal, desempenhando funções no metabolismo vegetal como ativador ou componente de algumas enzimas importantes envolvidas em oxidação e redução. No entanto, o cobre tem deixado o protagonismo de micronutriente essencial nos solos e se tornado um agente tóxico (Nazir et al. 2019, Raven & Eichhorn 2018).

Esta transição do cobre de micronutriente essencial para contaminante, é consequência de três principais atividades humanas: descarte inadequado de resíduos industriais e urbanos, mineração e práticas agrícolas (Poggere et al. 2023). A última em decorrência do uso em larga escala de fungicidas à base de cobre, como a calda bordalesa. No contexto da mineração, a transição energética tem impulsionado a demanda por metais conhecidos como excelentes condutores, como o cobre, para o desenvolvimento de fontes de energia renovável. Esse

aumento na demanda pode levar a um incremento na atividade de extração, potencialmente tornando a mineração a principal fonte de poluição desse metal.

Segundo uma resolução do Ministério do Meio Ambiente (MMA), quando a presença desse micronutriente excede 200 mg.kg^{-1} , indica a necessidade de intervenção em áreas agrícolas (BRASIL 2009). Com isso, surge a necessidade do aperfeiçoamento de técnicas capazes de descontaminar os solos, as quais sejam eficientes e com baixo custo, características indispensáveis, haja vista que as técnicas convencionais são caras e impactam negativamente a microbiota do solo (Mendonça et al. 2021).

Nesse sentido, a técnica de fitorremediação, que consiste na utilização de plantas para degradar, imobilizar, extrair, conter ou mobilizar contaminantes *in situ*, torna-se uma possível solução aplicável para o gerenciamento de solos contaminados por cobre. Entre os mecanismos de atuação mais conhecidos para remediar esse contaminante estão a fitoextração e a fitoestabilização. Ambos têm se mostrado promissores, mas a fitoextração ganhou destaque devido à possibilidade de utilização de algumas plantas denominadas hiperacumuladoras. Estas absorvem e toleram níveis altíssimos de contaminantes, mais comumente metais pesados (Brady & Weil 2013, Mendonça et al. 2021).

Portanto, considerando a problemática da contaminação dos solos por cobre e como solução a aplicação da técnica de fitorremediação através da fitoextração, foi escolhida a espécie vegetal *Cyperus rotundus* L. (Cyperaceae) como planta modelo para o experimento proposto neste trabalho. Popularmente conhecida como tiririca, essa planta daninha possui algumas características importantes para ser utilizada na fitoextração, como habilidade de hiperacumular metais extraídos; tolerância às altas concentrações de metais no solo; ciclo de vida curto com alta produção de biomassa e colheita fácil. No entanto, é importante destacar que a tiririca não é nativa do Brasil. Originária da Índia, ela é reconhecida como uma das principais espécies invasoras do mundo, causando significativos prejuízos econômicos. Devido à dificuldade de controle, seu uso em áreas contaminadas deve ser manejado com cautela para evitar a propagação em ecossistemas nativos ou áreas agrícolas (Andrade et al. 2009, Panozzo et al. 2009).

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial fitorremediador da tiririca (*Cyperus rotundus* L.) em solos contaminados com diferentes doses de cobre.

1.1.1. Objetivos Específicos

- Analisar massa fresca e massa da parte aérea;
- Analisar o efeito da contaminação por cobre sobre o crescimento de *Cyperus rotundus* L. (tiririca);
- Analisar pH e CE (condutividade elétrica) da solução do solo no final do experimento;
- Comparar os teores de cobre no início e ao final do experimento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. COLETA DO SOLO, REPLICAÇÃO DAS TIRIRICAS E MONTAGEM DO EXPERIMENTO

O experimento foi conduzido no Laboratório de Ciências Ambientais da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - Instituto Três Rios. No décimo primeiro dia do mês de fevereiro de dois mil e vinte quatro foi realizada a coleta do solo no Município de Chiador - MG, no qual a posição geográfica corresponde à latitude 22°5'9.44" Sul e longitude 43° 8'36.34" Oeste. O solo foi retirado a uma profundidade de 25 cm e sendo classificado como Argissolo Vermelho Distrófico (EMBRAPA 2004). No mesmo dia e local, foi feita a coleta dos tubérculos da espécie vegetal *C. rotundus* (tiririca) (Figura 1-A).

Após coleta, o solo foi peneirado em peneira do tipo malha 14 para retirar materiais indesejados ao experimento, como pedras e galhos. Em seguida, 400 gramas de solo (TFSA) foram pesados na balança analítica da marca Shimadzu (MODELO BL3200H) e acondicionados em potes de um litro fabricados em polietileno transparente (Figura 1-B). Os potes permaneceram sem furos para evitar a perda da solução contaminante. Posteriormente, foram plantados seis tubérculos em cada pote e o solo foi irrigado apenas com água destilada conforme a necessidade. As plantas permaneceram nessas condições para crescimento por onze dias antes da contaminação do solo com cobre (Figura 1-C).

A)

B)

C)



Figura 1. Após coleta, separação dos tubérculos (A), distribuição do solo nos potes de polietileno (B) e estágio de crescimento das mudas após 11 dias (C).

Fonte: Autor, 2024.

No dia vinte e nove de fevereiro de dois mil e vinte quatro ocorreu a montagem do experimento. O Cu^{2+} foi aplicado como solução de sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), no entanto, foi necessário realizar cálculos estequiométricos para determinar a quantidade de Cu^{2+} purificado necessário para o desenvolvimento do experimento. Na estequiometria realizada, foram obtidas as seguintes doses de Cu^{2+} : 19,99 mg, 199,80 mg e 1.998,22 mg. Simultaneamente, realizou-se análise do solo, que revelou uma alta concentração de cobre, chegando a $2,13 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. Esse valor foi somado às doses calculadas para a contaminação e, assim, foi possível determinar a quantidade exata de cobre em cada tratamento.

2.2. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O delineamento experimental utilizado foi de blocos inteiramente casualizados, num esquema fatorial 4×3 . Sendo 4 tratamentos e 3 repetições, a saber: T1 = 853,45 mg Cu^{2+} ; T2 = 873,44 mg Cu^{2+} ; T3 = 1.053,25 mg Cu^{2+} ; T4 = 2.851,67 mg Cu^{2+} .

2.3. COLETA E ANÁLISES

2.3.1. Parte Aérea

No dia vinte e nove de fevereiro, ou seja, sete dias após a contaminação, foi realizada a coleta do experimento. A análise da parte aérea foi realizada por meio da contagem do número de perfilhos que continha em cada pote, bem como, a obtenção do comprimento deles. Em seguida, foi realizada a coleta da parte aérea com corte dos perfilhos seccionados próximo à raiz e logo depois a massa fresca foi pesada. Posteriormente, a parte aérea foi levada para estufa de secagem da marca SolidSteel (MODELO SSDC110L) durante sessenta minutos a 65°C para retirada de água e obtenção da massa seca, sendo a mesma pesada novamente. A saber que

todos os dados obtidos da parte aérea foram planilhados no software Microsoft Excel® 2022, para posterior análise.

2.3.2. Cobre No Solo

Para análise do teor de cobre, foi utilizada a metodologia proposta por Giesbrecht (1979) para determinação fotométrica da concentração de cobre com adaptações. Inicialmente, foi construída a curva padrão do Cu^{2+} a partir da relação entre concentrações crescentes de cobre em mol. L^{-1} e absorvância no espectrofotômetro modelo IL-592 UV-VIS, sob a faixa de comprimento de onda de 800 nanômetros (nm) (Tabela 1), os valores de absorvância obtidos foram trabalhados no software Microsoft Excel® 2022.

Tabela 1: Concentrações de Cu^{2+} em mol. L^{-1} e a respectiva absorvância no espectrofotômetro para construção da curva padrão.

CuSO ₄ .5H ₂ O 0,10 mol. L ⁻¹ (mL)	H ₂ O destilada (mL)	Concentração final 0,10 mol. L ⁻¹	Absorvância Leitura a 800 nm
0	10	0,00	0,000
1	9	0,01	0,122
2	8	0,02	0,235
4	6	0,04	0,464
6	4	0,06	0,715
8	2	0,08	0,925
10	0	0,10	1,169

A seguir, com aplicação do gráfico de dispersão foi construída a curva padrão do Cu^{2+} e obtido a equação linear para auxiliar na determinação da concentração do teor nas amostras a partir do valor de absorvância (Equação I), com $R^2 = 0,9997$.

Equação 1. Cálculo da concentração de cobre (mol.L^{-1}) a partir da absorbância a 800 nm.

$$y=0,0819x + 0,0003$$

Na sequência, foram pesados 10 gramas de solo, diluídos em 100 mL de água destilada para obtenção da solução solo, que foi posteriormente filtrado em papel de filtro para análise. O filtrado foi colocado em cubetas para leitura da absorbância no espectrofotômetro. Os valores de absorbância encontrados foram inseridos na equação derivada da curva padrão (Equação I), permitindo a determinação da concentração de cobre em mol.L^{-1} . Para calcular a quantia de Cu^{2+} presente em 10g de solo, foi utilizada a fórmula a seguir (Fórmula 1):

Fórmula 1. Cálculo da quantia de Cu^{2+} presente em 10g de solo.

$$\text{Cu}^{2+} (10 \text{ g}): CC \times 0,1 \times 63,546 \times 1.000$$

Onde:

CC: Concentração de cobre encontrada na Equação 1, em (mol.L^{-1});

0,1: Volume da solução;

63,546: Peso atômico do cobre (g/mol);

1.000: Fator de conversão para ajustar as unidades.

Encontrada a quantia de cobre na amostra de 10 gramas, foi aplicada a Fórmula 2 para estimar o cobre residual presente no solo após experimento.

Fórmula 2. Cálculo da quantidade de cobre residual presente no solo após experimento.

$$CC_{(400g)} = \frac{400 \text{ g} \times X \text{ mg}}{10 \text{ g}}$$

Onde:

400 g: Quantidade de solo no pote;

X mg: Cobre encontrado na Fórmula 1;

10g: Quantidade de solo utilizada para inicialmente determinar o teor de cobre.

2.3.3. pH e CE

Por fim, a solução solo ainda teve o pH e condutividade elétrica ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$) analisados em pHmetro Even modelo PHS-3E e condutivímetro Tecnopon modelo mCA 150, ambos calibrados no dia das análises.

2.4. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados amostrados foram submetidos à análise de variância de dois critérios (ANOVA) ao nível de significância 5% ($p \leq 0,05$), seguido pelo teste de Tukey, utilizando o programa BioEstat, versão 5.0.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. CONTAMINAÇÃO DA ÁREA DE COLETA

3.1.1. Caracterização do Solo

O solo utilizado no experimento é classificado de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) como Argissolo Vermelho Distrófico. A classe dos Argissolos é composta por solos que apresentam um incremento significativo de argila do horizonte O para o horizonte B. Mais especificamente, nos Argissolos Vermelhos, o solo contém altos teores de óxidos de ferro provenientes do material de origem e apresentam baixa fertilidade (EMBRAPA 2021). Essa fertilidade reduzida deve-se à presença de argilas de baixa atividade que possuem capacidade limitada de retenção de macro e micronutrientes, no contexto dos metais pesados, a retenção de íons metálicos como os de Cu^{1+} e Cu^{2+} é principalmente realizada pelos óxidos de ferro que interagem com esses íons devido às diferenças de carga (Figura 2) (Fadigas et al. 2002).

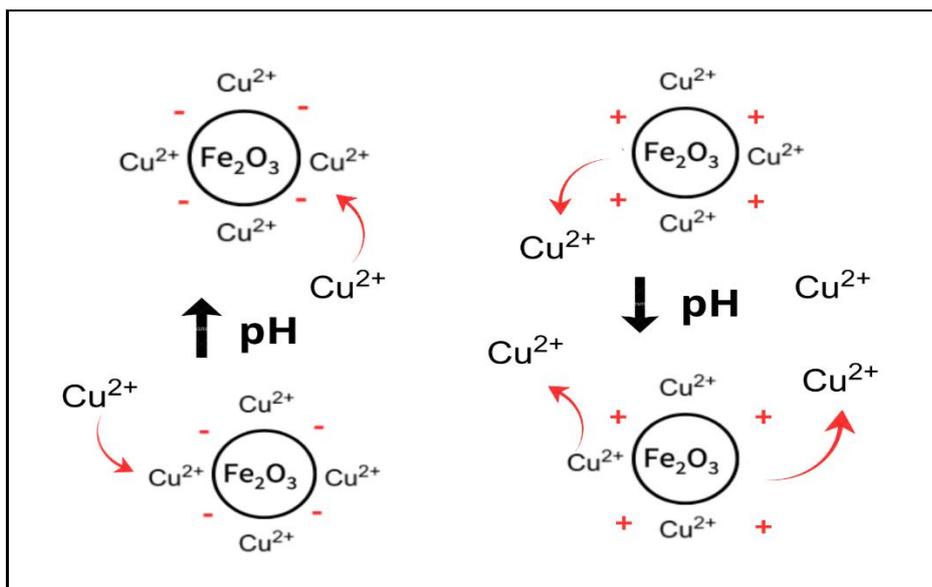


Figura 2. Modelo esquemático da interação dos íons de Cu^{2+} com a hematita a partir da influência do aumento e redução do pH.

Fonte: Autor, 2024.

Nos argissolos vermelhos, a hematita (Fe_2O_3) é o principal óxido responsável pela coloração avermelhada do solo e desempenha um papel importante na adsorção de metais pesados. No entanto, o comportamento da hematita como agente adsorvente varia conforme o pH do solo. Em pH mais ácidos, a hematita adquire uma carga positiva, o que reduz sua capacidade de reter íons de cobre. Já em pH básico, a hematita assume carga negativa, favorecendo a adsorção de íons de cobre (Pengfei et al. 2017). O solo utilizado no experimento apresentou pH médio de 7,04, indicando um ambiente levemente básico que favorece a retenção de cobre. Com essas características, compreende-se que o solo possui uma afinidade natural para reter cobre, especialmente na forma iônica Cu^{2+} , devido à estabilidade das ligações com o óxido de ferro.

3.1.2. Fonte de contaminação

A concentração natural de cobre no solo era de 2.130 mg.kg^{-1} , valor que excede em mais de dez vezes o limite recomendado para solos agrícolas que é de 200 mg.kg^{-1} (BRASIL 2009). Dessa forma, a concentração desse micronutriente acima do limite estabelecido para a qualidade do solo indica que o solo utilizado no experimento já apresentava condições que justificavam a

intervenção para a aplicação de técnicas de descontaminação, como a fitorremediação, mesmo antes da aplicação das doses para simulação da contaminação.

O local de coleta está próximo à linha férrea (Figura 3) que foi utilizada por muitos anos para o transporte de carga de minério. Supõe-se que parte do minério transbordava dos vagões e caía próximo a linha férrea, sendo posteriormente levado pela água das chuvas para áreas mais baixas, onde se encontra o ponto de coleta. Essa é a explicação mais plausível para compreender a contaminação da área por cobre.



Figura 3. Imagem aérea do ponto de coleta (marcador amarelo) e da linha férrea (marcador verde), localização: latitude 22°5'9.44" S e longitude 43° 8'36. 34" O.

Fonte: Google Earth Pro, 2024.

Logo, as tiriricas coletadas no mesmo local já estavam expostas a concentrações elevadas de cobre no ambiente natural. Esse fato indica que essas plantas apresentam adaptação a altas concentrações de cobre no solo. A ausência de sinais de toxicidade, especialmente na parte aérea do corpo vegetal (Figura 4), reforça essa adaptação. Segundo Taiz & Zeiger (2009), essa capacidade adaptativa está relacionada à tolerância da espécie, adquirida por meio de adaptações bioquímicas que possibilitam suportar concentrações elevadas de elementos tóxicos.



Figura 4. Estágio crescimento e desenvolvimento das tiriricas *in situ*, foto obtida no dia da coleta do solo e dos tubérculos da tiririca.

Fonte: Autor, 2024.

3.2. POTENCIAL DE REMOÇÃO DE COBRE PELA TIRIRICA

3.2.1. Características da tiririca essenciais para a fitorremediação

Segundo Marchiol et al. (2004) e Nascimento & Xing (2006), a espécie vegetal a ser utilizada na técnica de fitorremediação deve apresentar características como de habilidade de hiperacumular metais extraídos, tolerância a altas concentrações de metais no solo, rápido crescimento, alta produção de biomassa e colheita fácil, tais características que vão ao encontro daquelas apresentadas pela espécie utilizada neste estudo.

A tiririca é uma planta invasora de difícil controle, mundialmente reconhecida por causar danos significativos a diversas culturas agrícolas. Como espécie perene, a tiririca se destaca por sua alta adaptabilidade a ambientes hostis e pela capacidade de reprodução tanto sexuada quanto assexuada, por essas características, é considerada uma das vinte plantas daninhas mais prejudiciais no mundo para a agricultura (Panozzo et al. 2009).

No entanto, a espécie tem ganhado destaque em novas frentes de pesquisa em razão de sua notável capacidade adaptativa. Essa característica foi evidenciada no presente estudo, no

qual as plantas utilizadas estavam se desenvolvendo em um solo altamente contaminado por cobre, esse comportamento demonstra uma aptidão para a ativação de mecanismos de tolerância ao metal. Em estudos recentes, Mendonça et al. (2021) observaram o grande potencial da tiririca na remoção de cobre quando comparado com a espécie *Chrysopogon zizanioides* (capim vetiver), assim, tornando-a uma candidata promissora a ser explorada pela técnica de fitorremediação.

3.2.2. Desempenho da tiririca na fitoextração

Após sete dias de exposição da tiririca ao cobre, a planta apresentou comportamento diferenciado com relação às doses de cobre no solo. A seguir (Tabela 2), são apresentados os resultados das análises de cobre residual nos recipientes. Entre os tratamentos propostos, observou-se diferença estatística significativa ($p \leq 0,05$) entre os tratamentos T1 e T3 ($p < 0,05$), T1 e T4 ($p < 0,01$), T2 e T3 ($p < 0,05$), T2 e T4 ($p < 0,01$) e T3 e T4 ($p < 0,01$) sendo que a espécie *C. rotundus* mostrou-se mais eficiente na remoção de cobre no tratamento 4 com maior dose. Comparando os tratamentos 1 e 2, não foi observada diferença significativa ($p > 0,05$). Isso pode ser atribuído à pequena variação nas doses de cobre aplicadas entre os tratamentos, que por não serem suficientemente distintas, não induziram um aumento expressivo na absorção de cobre pela planta. Em relação ao segundo critério da análise estatística, os blocos, não foi observada diferença significativa ($p = 0,55$).

Tabela 2: Médias da quantidade de cobre fitoextraído pela tiririca em cada um dos quatro tratamentos avaliados. Os valores apresentados correspondem à média das três repetições realizadas para cada tratamento.

Tratamentos	Cobre residual após experimento (mg)	Cobre fitoextraído (mg)	Desvio Padrão
1 (2,13 mg.g ⁻¹)	565,47	287,98	10,41
2 (2,18 mg.g ⁻¹)	652,21	221,23	98,68
3 (2,63 mg.g ⁻¹)	471,79	581,46	136,18
4 (7,12 mg.g ⁻¹)	409,34	2.442,33	20,50

Além disso, os resultados indicaram que o aumento nas doses de cobre intensificou o processo de fitoextração pela planta, com exceção do observado no tratamento 2. Ou seja, quanto maior a disponibilidade desse micronutriente no solo, mais a planta impulsiona os processos metabólicos necessários para suprir suas demandas e armazená-lo. A taxa de eficiência de fitoextração (Figura 5), isto é, a proporção de cobre removido em relação ao disponível em cada tratamento, variou de 25% a 86%.

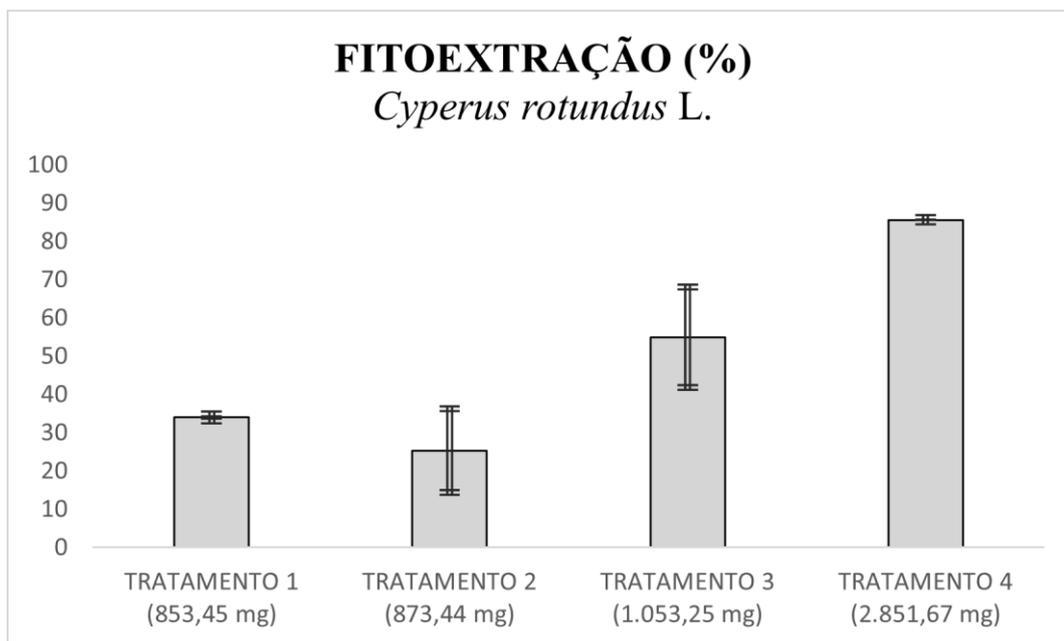


Figura 5. Representação gráfica em porcentagem do cobre fitoextraído em relação ao cobre que estava disponível em cada tratamento, ao final de sete dias de exposição das tiriricas a diferentes doses de cobre.

Fonte: Autor, 2024.

O sucesso na absorção do cobre observado no experimento pode ser atribuído, em parte, à imediata disponibilidade do elemento para as plantas. Embora a presença de óxidos de ferro no solo possa contribuir para a adsorção dos íons de cobre, os fatores que poderiam interferir nesse processo foram minimizados, considerando que o experimento foi conduzido em condições controladas de laboratório. No ambiente natural, o cobre está presente nos solos sob várias formas, como íons livres, complexos dissolvidos na solução do solo, em sítios de troca catiônica das argilas e matéria orgânica, co-precipitado em óxidos, além de incorporado em resíduos biológicos e organismos vivos (Jatav et al. 2020).

A absorção ocorre predominantemente na forma ativa de Cu^{2+} , no entanto, a absorção e transformação do cobre depende de alguns fatores, como, espécie vegetal em questão, concentração no solo, biodisponibilidade, condições ambientais e sobretudo o pH do solo. De modo geral, as plantas não conseguem estabelecer um limite de absorção desse micronutriente e acabam acumulando (Silva et al. 2007). Tal como ocorreu no tratamento com 2.851,67 mg de cobre, a tiririca fitoextraiu em média 86% do cobre que estava disponível no solo. Isso é viável graças à capacidade da planta de redistribuir o cobre absorvido e armazená-lo em outras partes, com o auxílio de diversos transportadores, como ATPase, ZIP, NRAMP e COPT (Kumar et al. 2021). Em outras palavras, como a planta não restringe a entrada desse micronutriente pelas raízes, uma maior disponibilidade no solo resulta em uma absorção proporcionalmente elevada, evidenciando sua característica de hiperacumuladora de metais pesados.

3.3. PARTE AÉREA

3.3.1. Perfilhamento

Os perfilhos são brotações basais que emergem dos tubérculos e contribuem para o sucesso de propagação vegetativa, principalmente quando se refere às plantas daninhas (Santos et al. 2009). Os resultados do experimento demonstraram que a quantidade de perfilhos não foi alterada pela exposição ao cobre, uma vez que as análises estatísticas não revelaram diferenças significativas entre os tratamentos ($p=0,67$) e blocos ($p= 0,87$) (Tabela 3). O número de perfilhos variou de 3 a 7 unidades. O mesmo ocorreu para o comprimento médio (p (tratamentos) = 0,42 / p (blocos) = 0,74), as médias oscilaram entre 19,37 cm e 33,25 cm. Nesse sentido, o cobre aparentemente não se comportou como um agente tóxico, ou seja, a presença do cobre em concentrações excessivas ou não, mostrou-se indiferente em relação aos efeitos sobre o número de perfilhos e ao comprimento destes.

Tabela 3: Número de perfilhos e comprimento médio.

Tratamentos	Número de Perfilhos	Comprimento médio (cm)	Desvio Padrão
1	6	22,22	10,12
(2,13 mg.g ⁻¹)	4	33,25	6,65
	4	22,5	10,39

2	6	22,88	12,03
(2,18 mg.g ⁻¹)	4	27,5	8,08
	5	32,0	7,98
3	5	23,18	11,03
(2,63 mg.g ⁻¹)	7	19,37	8,85
	4	20,98	14,44
4	3	27,5	4,61
(7,12 mg.g ⁻¹)	4	25,64	5,02
	5	23,78	5,43

3.3.2. Análise da massa fresca e seca da biomassa aérea da tiririca

3.3.2.1. Massa fresca

A partir da Figura 6, observa-se que a massa fresca da parte aérea (MFPA) foi menor no tratamento 4 que tinha a maior dose de cobre. Os resultados deste tratamento divergiram significativamente dos encontrados nos demais (T1 e T4 ($p < 0,05$), T2 e T4 ($p < 0,05$), T3 e T4 ($p < 0,05$)), quanto a comparação em blocos, não foi observada diferença significativa ($p = 0,68$). De forma geral, quando esse micronutriente está em condições de deficiência no solo, há uma diminuição no desenvolvimento da planta, principalmente dos órgãos reprodutivos e folhas mais jovens (KUMAR et al. 2021). De maneira semelhante aos efeitos gerados pela deficiência desse elemento, quando em excesso no solo e disponível, pode facilitar danos a planta, especialmente favorecendo o surgimento de disfunções metabólicas devido o estresse oxidativo ao gerar espécies reativas do oxigênio (HUANG et al. 2020). Melhor dizendo, ao absorver, transportar e distribuir o cobre, a planta acaba criando irregularidades no próprio metabolismo, o que afeta a produção de estruturas na parte aérea, conforme visto no tratamento cujo a fitoextração alcançou 86% do cobre.

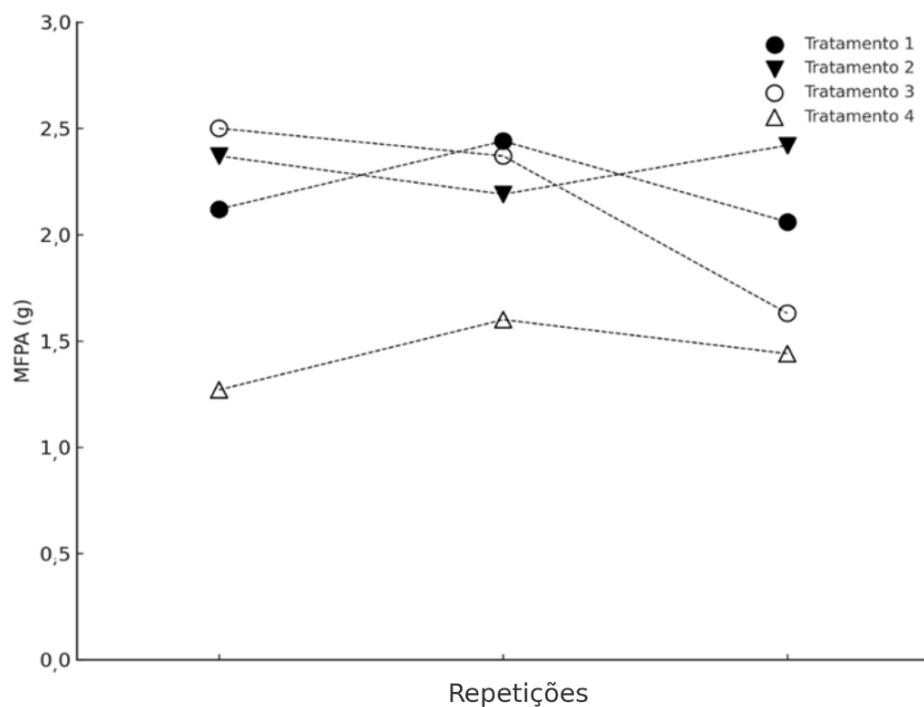


Figura 6. Massa fresca da parte aérea das tiriricas obtida após sete dias de exposição ao cobre.

Fonte: Autor, 2024.

3.3.2.2. *Relação entre massa seca e fresca*

A seguir (Figura 7) é apresentado os valores da massa seca da parte aérea (MSPA) obtida após a massa fresca ser levada para estufa. A massa seca variou de 0,25 a 0,44 gramas, a diferença significativa encontrada foi a mesma em relação à análise da fresca. Ademais, após a análise da relação entre massa fresca e seca da parte aérea (%), constatou-se uma média de 81,17% de água na massa aérea (Figura 8).

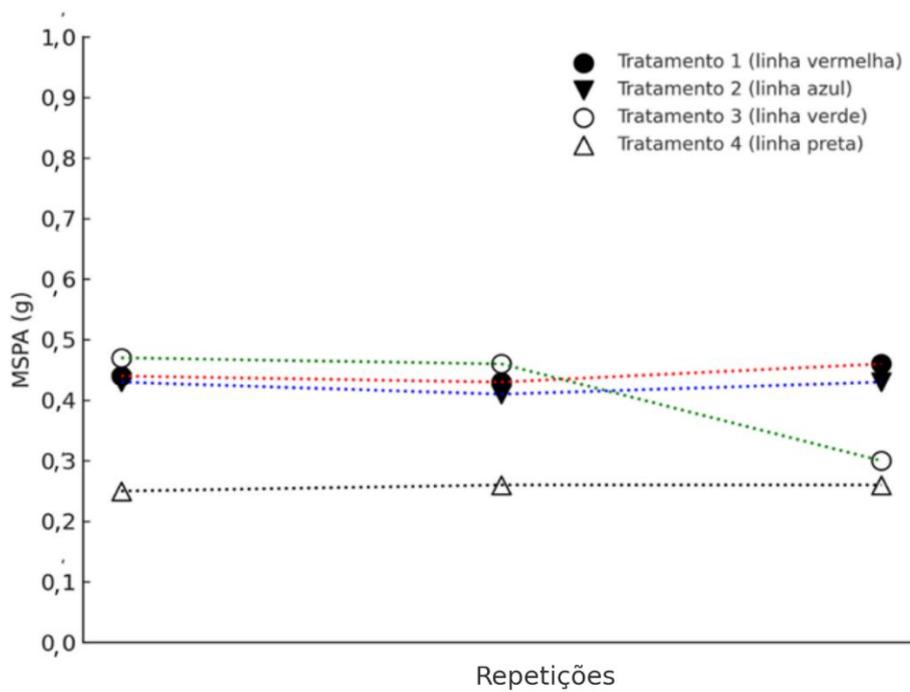


Figura 7. Massa seca da parte aérea obtida após a massa fresca ser levada para estufa por uma hora a 65°C.

Fonte: Autor, 2024.

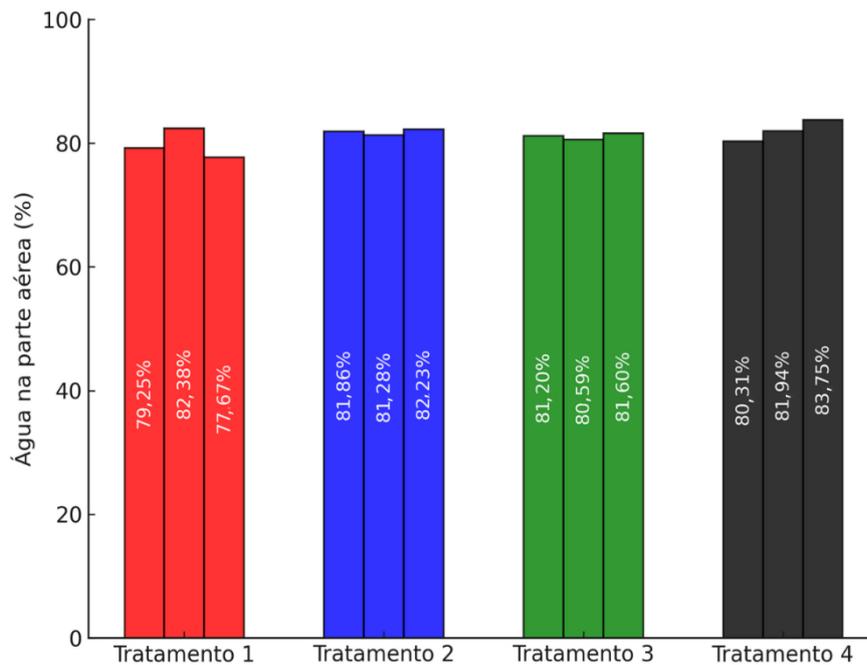


Figura 8. Porcentagem de água na parte aérea das tiriricas.

Fonte: Autor, 2024.

Os resultados obtidos na parte aérea indicam que o cobre exerceu influência na inibição da formação de biomassa vegetal, especialmente no tratamento com a dosagem mais elevada, onde o processo de fitoextração apresentou maior eficiência. Em relação à porcentagem de água na parte aérea, não houve diferenças significativas entre os tratamentos, indicando que o cobre não interferiu na absorção de água nem na sua translocação para a parte aérea. Adicionalmente, o estudo da parte aérea revelou ainda que embora o cobre tenha sido absorvido quase por completo no tratamento com maior dose, acredita-se que ele foi predominantemente armazenado nas raízes. Resultados similares foram encontrados por Oliva et al. (2010) em estudos realizados com a espécie *Erica andevalensis*, os autores observaram o acúmulo preferencial de cobre nas raízes, um fenômeno também identificado em outras plantas que se desenvolvem em solos contaminados com cobre.

3.4. PARÂMETROS QUÍMICOS DO SOLO

3.4.1. pH

O parâmetro de pH auxilia para compreender a interação da disponibilidade do cobre e a absorção dele pelas plantas. Normalmente em solos alcalinos, ele é imobilizado, enquanto a redução do pH aumenta sua concentração e disponibilidade para as plantas. No processo de absorção por sistemas radiculares, a presença de H^+ no solo permite a troca de Cu^{2+} por H^+ nas argilas, de modo que a disponibilidade de Cu^{2+} aumenta com a acidificação do meio (Torre et al. 2018, Silva et al. 2022). Na Tabela 4 são apresentados os dados de pH obtidos a partir das análises da solução do solo.

Tabela 4: Média dos dados de pH obtidos após experimento.

Tratamentos	pH	Temperatura (°C)
1 (2,13 mg.g ⁻¹)	9,99	22,4
2 (2,18 mg.g ⁻¹)	11,29	22,0
3 (2,63 mg.g ⁻¹)	10,10	21,2
4 (7,12 mg.g ⁻¹)	7,43	22,0

No tratamento 4, com $7,12 \text{ mg.g}^{-1}$ de cobre, o pH se situou em 7,43, indicando uma condição neutra/alcalina e sendo o menor pH encontrado entre os tratamentos. Isso ocorre porque a absorção de cobre pelas raízes implica ativação de H^+ -ATPases e acidificação da solução do solo, o que torna o cobre mais disponível e facilita ainda mais a absorção (Silva et al. 2022).

Em seguida (Figura 9) é apresentada uma relação do pH inicial do solo e a média obtida de cada tratamento após o experimento. Ocorreu aumento de pH nos tratamentos 1, 2 e 3, esse aumento pode estar relacionado a utilização do sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) para a contaminação. Quando o sulfato de cobre é adicionado ao solo, os íons hidróxido provenientes da dissolução do sulfato de cobre, neutralizam os íons de hidrogênio do solo, formando água. Essa neutralização reduz a quantidade de íons H^+ livres, o que faz com que o pH do solo aumente, tornando-o mais alcalino. É por isso que foi possível observar um aumento no pH do solo. O mesmo ocorreu no tratamento 4, no entanto, a absorção do cobre pelas raízes e ativação de H^+ -ATPases que liberou íons de H^+ na solução solo favoreceu a acidificação. Contudo, como o solo era bastante alcalino, é possível que tenha ocorrido a dissolução de outros sais básicos previamente depositados no solo.

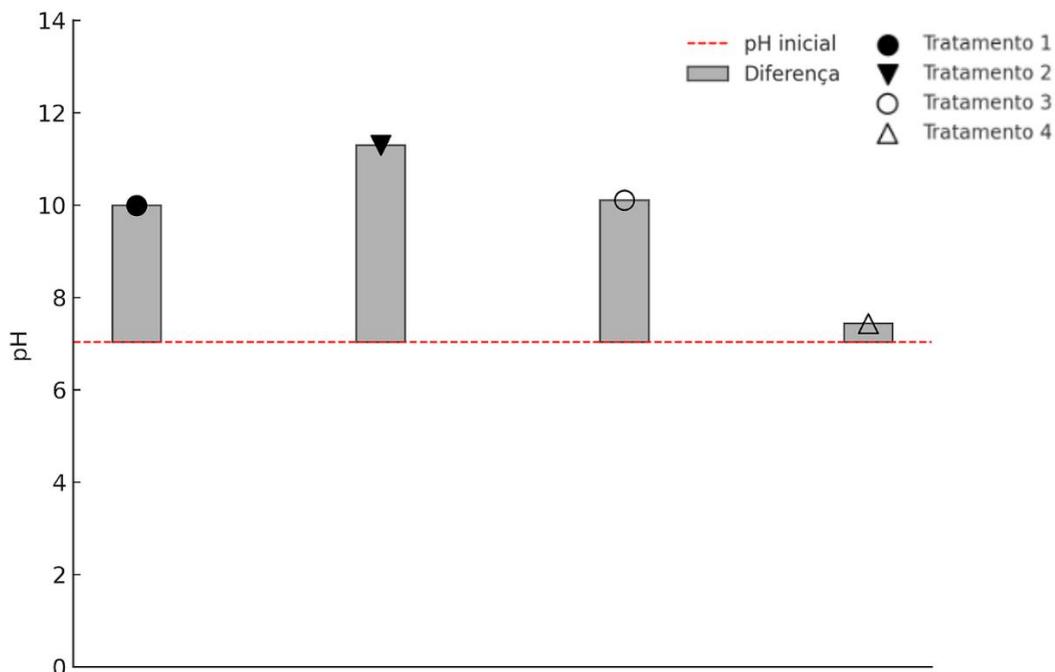


Figura 9. Relação do pH inicial do solo e a média obtida de cada tratamento após o experimento.

Fonte: Autor, 2024.

3.4.2. Condutividade elétrica

A condutividade elétrica (CE) é utilizada para medir a salinidade do solo. No experimento, a utilização do sulfato de cobre pentahidratado foi responsável por acrescentar sais no solo e assim aumentar a CE. Ao final do experimento, a CE chegou a 986.30 mS.cm⁻¹ (Tabela 5), indicando alto nível de CE. Altos níveis de salinidade limitam a captação da água pela planta reduzindo o potencial osmótico, o que interfere no desenvolvimento (Rabelo 2009). A tiririca se mostrou bastante tolerante a níveis elevados de sais, não foi observado nenhum efeito sobre a planta em decorrência do estresse hídrico gerado pela presença de concentrações altas de sais no solo. Por outro lado, a elevação da CE e a diminuição do pH podem ter a mesma origem, possivelmente como ocorreu no tratamento 4. Com a ativação de H⁺-ATPases, os H⁺ reduzem o pH e são íons que aumentam a CE da solução solo.

Tabela 5: Média dos dados de CE obtidos após experimento.

Tratamentos	Condutividade Elétrica (mS.cm ⁻¹)	Temperatura (°C)
-------------	---	------------------

1	(2,13 mg.g ⁻¹)	89,69	23,9
2	(2,18 mg.g ⁻¹)	95,75	24,0
3	(2,63 mg.g ⁻¹)	218,10	23,9
4	(7,12 mg.g ⁻¹)	986,30	23,8

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das análises feitas e dos resultados obtidos, conclui-se que a espécie vegetal *C. rotundus* possui enorme potencial para a sua utilização na técnica de fitorremediação de solos contaminados por cobre. Esse potencial foi evidenciado pelo comportamento da planta, que demonstrou capacidade de absorção significativa do metal pesado mesmo em curto período de exposição ao contaminante. Vale ressaltar que as tiriricas utilizadas no experimento já apresentavam adaptação ao cobre, haja vista à presença de altas concentrações do metal no solo onde se desenvolviam, ou seja, indicando que a tiririca é uma planta capaz de efetuar adaptações no seu metabolismo para se desenvolver em solos contaminados com cobre. Além disso, observou-se que a eficiência da tiririca na fitoextração aumenta consideravelmente em solos com níveis elevados de cobre. Essa resposta adaptativa sugere que a planta possui alta capacidade de acumular o metal em condições de contaminação elevada, o que a torna uma alternativa eficaz para a descontaminação de solos, especialmente por meio da fitoextração.

A degradação dos solos por metais pesados é um problema cada vez mais frequente, impulsionado pelo aumento das atividades mineradoras destinadas a atender a demanda por fontes de energia verdes. O cobre, devido à sua excelente condutividade elétrica e térmica, é um dos metais mais demandados nesse contexto. Diante dessa realidade, o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de técnicas de descontaminação tornam-se indispensáveis. A fitorremediação desponta como uma solução sustentável para o manejo de solos poluídos por metais pesados. Assim, o presente estudo abriu caminho para revelar uma candidata promissora a ser utilizada na técnica de fitorremediação, particularmente para tratar solos onde a contaminação por cobre atinge níveis críticos. Com isso, também se abriu a possibilidade para o desenvolvimento de outras linhas de pesquisa com o uso da tiririca, especialmente voltadas à

criação de técnicas que tenham como objetivo a fitominação do cobre acumulado nas raízes da planta e sua reinserção na cadeia produtiva.

5. REFERÊNCIAS

Amaral FCS, Santos HG, Áglio MLD, Duarte MN (in memorian), Pereira NR, Oliveira RP, Carvalho WJ (2023) Mapeamento de solos e aptidão agrícola das terras do Estado de Minas Gerais. Rio de Janeiro: EMBRAPA. 103 p.

Andrade MG, Melo VF, Gabardo J, Souza LCP, Reissmann CB (2009) Metais pesados em solos de área de mineração e metalurgia de chumbo: I - Fitoextração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 33(6): 1879-1888. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600037>

Brady NC, Weil RR (2013) Elementos da natureza e propriedades dos solos: solos e poluição química. Rio de Janeiro: Porto Alegre RS. 716 p.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente (28 de dezembro de 2009) Resolução nº 420. Disponível: <https://www.mma.gov.br>. Acessado em 17 de fevereiro, 2024.

Cheng P, Wang Y, Cheng K, Li F, Qin H, Liu T (2017) The acid-base buffer capacity of red soil variable charge minerals and its surface complexation model. *Acta Chimica Sinica* 75: 637-644.

Embrapa (09 de dezembro de 2021) Argissolos Vermelhos. Disponível: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/argissolos/argissolos-vermelhos>. Acessado em 20 de agosto, 2024.

Fadigas FS, Amaral-Sobrinho NMB, Mazur N, Anjos LHC, Freixo AA (2002) Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros. *Bragantia* 61(2): 151-159. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052002000200008>

Festa RA, Thiele DJ (2011) Copper: an essential metal in biology. *Current Biology* 21(21). Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.09.040>. Acessado em 18 de agosto de 2024.

Freitas EVS, Nascimento CWA, Goulart DF, Silva JPS (2009) Disponibilidade de cádmio e chumbo para milho em solo adubado com fertilizantes fosfatados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 33(6): 1899-1907. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600039>

Giesbrecht E, Felicissimo AMP (1982) Experiências de química: técnicas e conceitos básicos. São Paulo: Moderna. 241 p.

Huang WL, Wu FL, Huang HY, Huang WT, Deng CL, Yang LT, Huang ZR, Chen LS (2020) Excess copper-induced alterations of protein profiles and related physiological parameters in citrus leaves. *Plants* 9: 291-310. <https://doi.org/10.3390/plants9030291>

- Jatav HS, Sharma LD, Sadhukhan R, Singh SK, Singh S, Rajput VD, Parihar M, Jatav SS, Jinger D, Kumar S (2020) An overview of micronutrients: prospects and implication in crop production. In: *Plant Micronutrients: Deficiency and Toxicity Management*. Cham: Springer. 1–30.
- Kumar V, Pandita S, Sidhu GPS, Sharma A, Khanna K, Kaur P, Bali AS, Setia R (2021) Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants: A comprehensive review. *Chemosphere* 262: 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127810>
- Kumar V, Pandita S, Singh GP, Sharma A, Khanna K, Kaur P, Bali AS, Setia R (2021) Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants: a comprehensive review. *Chemosphere* 262:1-25.
- La Torre TA, Iovino V, Caradonia F (2018) Copper in plant protection: current situation and prospects. *Phytopathologia Mediterranea* 57:201-236.
- Malavolta E, Vitti GC, Oliveira SA (1997) Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações Piracicaba: Potafos. 319 p.
- Marchiol L, Assolari S, Sacco P, Zerbi G (2004) Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil. *Environ Pollut* 132: 21-27.
- Martins CAS, Nogueira NO, Ribeiro PH, Rigo MM, Candido O (2011) Dynamics of soil trace metal. *Revista Brasileira de Agrociência* 17(3). Disponível: <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/CAST/article/view/2072>. Acessado em 15 de outubro de 2023.
- Mendonça AT, Santos CCA, Marques RFPV, Oliveira AS, Santos CS (2021) Potencial de remoção de cobre do solo por técnica de fitorremediação. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais* 12(4): 520-529. <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.004.0040>
- Mendonça AT, Santos CCA, Marques RFPV, Oliveira AS, Santos CS (2021) Potencial de remoção de cobre do solo por técnica de fitorremediação. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais* 12: 520-529. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.004.0040>
- Nascimento CWA, Xing B (2006) Phytoextraction: A review on enhanced metal availability and accumulation. *Sci Agríc* 63: 299-311.
- Nazir F, Hussain A, Fariduddin Q (2019) Hydrogen peroxide modulates photosynthesis and antioxidant systems in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants under copper stress. *Chemosphere* 230: 544-558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.001>.
- Oliva SR, Mingorance MD, Valdés B, Leidi EO (2010) Uptake, localisation and physiological changes in response to copper excess in *Erica andevalensis*. *Plant Soil* 328:411-420.]

Panozzo LE, et al. (2009) Métodos de manejo de *Cyperus esculentus* na lavoura de arroz irrigado. *Planta Daninha* 27:165-174.

Poggere G, Gasparin A, Barbosa JZ, Melo GW, Corrêa RS, Motta ACV (2023) Soil contamination by copper: sources, ecological risks, and mitigation strategies in Brazil. *Journal of Trace Elements and Minerals* 4(14). <https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2023.100059>

Rabello LM (01 de setembro de 2009) Condutividade elétrica do solo, tópicos e equipamentos. Disponível:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/658188/1/DOC432009.pdf>.

Acessado em 12 de setembro, 2014.

Raven PH, Eichhorn RFES (2018) *Biologia vegetal: nutrição vegetal e solos* Rio de Janeiro: Koogan. 2.720 p.

Santos AM, Fernandes MS, Souza SR, Santos LA (2018) Nutrição mineral de plantas: mecanismos de tolerância de plantas a metais pesados Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 649 p.

Santos MER, Fonseca DM, Balbino EM, Monnerat JPIS, Silva SP (2009) Caracterização dos perfis em pastos de capim-braquiária diferidos e adubados com nitrogênio. *Revista Brasileira de Zootecnia* 38:643-649. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009000400008>

Silva MLS, Vitti GF, Trevizam AR (2007) Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 42: 527-535.

Sodré FF, Lenzi E, Costa SCA (2001) Utilização de modelos físico-químicos de adsorção do comportamento do cobre em solos argilosos. *Química Nova* 24(3): 324-330.

Taiz L, Zeiger E (2009) *Fisiologia Vegetal*. Porto Alegre: Artmed. 848 p.