



Substrato a base de rejeito de mineração de cobre na produção de ipê-branco

Cooper mining tailings substrate in the production of white ipe

Anna Gabriela Rocha Arruda¹, Denilson da Silva Costa², Louis Dostoevsky Gomes Tabosa³,
José Ronaldo Medeiros Costa⁴, Ângelo Kidelman Dantas de Oliveira⁵, Fernando Kidelmar Dantas de
Oliveira⁶

¹Engenheira de Minas e Meio Ambiente, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, Pará, +5594981167385, arruda.annagabriela@gmail.com. ²Doutor, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, Pará, denilson@unifesspa.edu.br. ³Mestre, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, Pará, louis.tabosa@unifesspa.edu.br. ⁴Doutor, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Barreiros, Pernambuco, ronaldo.costa@barreiros.ifpe.edu.br. ⁵Pós-Doutor, Universidade Federal de Campina Grande, Cuité, Paraíba, kidelman3@hotmail.com. ⁶Doutor, Universidade Federal de Campina Grande, Cuité, Paraíba, kidelmar@ufcg.edu.br.

ARTIGO

Recebido: 19/05/2020
Aprovado: 08/12/2020

Palavras-chave:

Produção de plantas
Fitorremediação
Fitoestabilização
Metal pesado
Desempenho
morfológico

Key words:

Plant production
Phytoremediation
Phytostabilization
Heavy metal
Morphometric
performance

RESUMO

Um dos principais metais explorados no mundo é o cobre (Cu), um elemento nativo, que dificilmente é encontrado puro na natureza. A lavra e beneficiamento do cobre geram debates ambientais devido à formação de agentes poluidores nas áreas de concentração, fundição e refino, além dos impactos negativos na vegetação e topografia da área minerada. Este trabalho teve como objetivo investigar o desempenho morfológico inicial do ipê-branco (*Tabebuia roseo-alba* (Ridl.) Sandwith) em substrato composto por rejeito de mineração de cobre e percentuais crescentes de matéria orgânica, bem como, avaliar seu potencial fitorremediador e o Índice de Qualidade de Dickson (IQD). O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, onde se coletou dados morfológicos dos tratamentos referentes à altura, diâmetro do caule e número de folhas da espécie vegetal que posteriormente foram submetidos à análise estatística e ao IQD, além dos cálculos relacionados ao índice e fator de translocação do cobre na planta e sua capacidade fitoextratora. A fitomassa compartimentalizada em raízes e parte aérea foi coletada, colocada em estufa, moída e enviada ao laboratório para as devidas avaliações do metal cobre nos compartimentos da espécie vegetal, além da avaliação química do substrato. Concluiu-se que o ipê-branco possui potencial fitoestabilizador do elemento cobre proveniente de rejeito de mineração, bem como atingiu um IQD satisfatório no tratamento composto por 90% de rejeito de mineração e 10% de matéria orgânica.

ABSTRACT

One of the main metals explored in the world is copper (Cu), a native element, which is rarely found pure in nature. The mining and processing of copper generates environmental debates due to the generation of polluting agents in the areas of concentration, smelting and refining, in addition to the negative impacts imposed on the vegetation and topography of the mined area. The study aimed to investigate the initial morphometric performance of the white ipe (*Tabebuia roseo-alba* (Ridl.) Sandwith) in a substrate composed of copper mining tailings and increasing percentages of organic matter, evaluate its phytoremediator potential and the Dickson's Quality Index (IQD). The experimental design was the entirely randomized one. Morphometric data of the treatment were collected regarding height, stem diameter and number of leaves of the plant species where they were later submitted to statistical and IQD analysis, in addition to calculations related to the index and translocation factor of copper in the plant and its phytoextracting capacity. The phytomass compartmentalized in roots and aerial part was collected, placed in a drying oven, ground and sent to the laboratory for the proper evaluation of the copper metal in the compartments of the plant species, in addition to the chemical evaluation of the substrate. It was concluded that white ipe has the potential to phytostabilize the copper element coming from mining tailings, as well as achieving a satisfactory IQD in treatment composed of 90% of mining tailings and 10% of organic matter.



INTRODUÇÃO

De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2016) a atividade minerária engloba o aproveitamento de recursos minerais, do solo e subsolo, se diferenciando dos outros setores produtivos à medida que provem as matérias-primas para as demais indústrias, além de ocasionar a geração de resíduos sólidos, também denominados no meio mineral de rejeitos. Após a Revolução Industrial, estes rejeitos minerais tiveram um aumento significativo devido o avanço tecnológico, o que proporcionaram uma maior degradação ambiental em função da disposição destes em barragens.

Um dos principais metais explorados no mundo é o cobre (Cu), um elemento nativo, que dificilmente é encontrado puro na natureza, ocorrendo em associações com outros elementos químicos, em diferentes combinações, estruturas e proporções, gerando diferentes minerais. A lavra e beneficiamento do cobre geram debates ambientais devido à produção de agentes poluidores nas áreas de concentração, fundição e refino, além dos impactos negativos na vegetação e topografia da área minerada segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM, 2020).

A busca de opções de reaproveitamento dos rejeitos provenientes da mineração gerou e vem gerando diferentes estudos de reutilização desses materiais. Uma das alternativas de reuso é o emprego do rejeito como substrato a ser descontaminado por meio da biorremediação, denominada assim por empregar organismos vivos, microrganismos ou plantas, para a descontaminação de solos ou água (COUTINHO; BARBOSA, 2007).

Uma vertente da biorremediação é a fitorremediação. Segundo Anselmo e Jones (2005) a fitorremediação é uma técnica que utiliza plantas como o agente de descontaminação do solo e da água, possuindo relevância essencialmente por apresentar potencial para tratamento *in situ* e por ser economicamente viável. Ademais, após a extração de contaminantes e metais do solo, as plantas os armazenam em seus tecidos, o que concede a possibilidade de um tratamento posterior, ou permite a metabolização, podendo transformá-los em produtos de menor toxicidade ou inofensivos, ainda de acordo com os autores supracitados.

O território brasileiro, além de ser rico no aspecto mineral, também possui uma vasta riqueza em sua flora, o que torna apto o emprego da fitorremediação como agente descontaminador de solos e águas, apesar do fato desta técnica não ser muito conhecida, a fitorremediação está crescendo no meio científico (SILVA et al., 2015), sendo uma das técnicas usadas para limpeza de áreas degradadas mais viáveis no quesito econômico em função de sua eficiência, que segundo Lamego e Vidal (2007), é o uso de vegetais e microrganismos para degradar, extrair, conter ou imobilizar poluentes em meio sólido, líquido ou gasoso a níveis seguros e compatíveis à saúde humana, ou Andrade et al. (2007), que conceituam de forma resumida, que a fitorremediação é o uso de plantas e seus microrganismos associados, ao tratamento de solo, água ou ar contaminados e, para Oliveira et al. (2006), é o processo que utiliza as plantas como agentes de purificação de ambientes aquáticos ou terrestres, contaminados ou poluídos pelo depósito de

substâncias inorgânicas como elementos químicos e rejeitos de minério.

Com isso, o uso da revegetação, na qual são plantadas determinadas espécies tem por objetivo remover, transferir, estabilizar ou destruir elementos nocivos que, de acordo com Estrela et al. (2018), esta é uma tecnologia emergente e de baixo custo que pode mitigar a contaminação por metais pesados.

O emprego de espécies vegetais arbóreas na fitorremediação chama atenção no meio científico. Uma das espécies originárias do Brasil é o ipê-branco (*Tabebuia roseoalba* (Ridl.) Sandwith), com caráter ornamental e de beleza exuberante é bastante empregada em paisagismos e arborização de ruas (MACEDO, 2011). É utilizada, também, em reflorestamentos de terrenos secos e pedregosos, ajudando na recomposição da vegetação (LORENZI, 2002).

O objetivo geral da pesquisa foi investigar o desempenho morfométrico inicial do ipê-branco em substrato composto por rejeito de mineração de cobre e percentuais crescentes de matéria orgânica, e os específicos foram o de encontrar o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) e avaliar o potencial fitorremediador da espécie, por meio do índice e fator de translocação e capacidade de extração.

MATERIAL E MÉTODOS

Este experimento foi realizado no período de setembro de 2018 a janeiro de 2019, cuja instalação do mesmo foi conduzido na casa de vegetação administrada pela Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente (FEMMA) na Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA), Marabá, Pará, na região Sudeste do estado, localizada na Latitude -5.36997 e Longitude -49.1169 com altitude de 84 m. Segundo Raiol (2010) o clima do município de Marabá caracteriza-se como torropical, quente e úmido, apresentando temperaturas médias mensais entre 22,9 °C e 32 °C, com média anual de 26 °C, a umidade relativa do ar varia de 73% a 93% e a precipitação anual fica em torno 1.976 mm. O período mais chuvoso se inicia em janeiro e termina em março, e o mais seco vai de julho a setembro. De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger a climatologia do município de Marabá é Af (clima das florestas pluviais, com chuvas abundantes e bem distribuídas), segundo Almeida (2007).

Como substrato foi utilizado rejeito de barragem de cobre e matéria orgânica (esterco bovino). O rejeito de cobre foi proveniente da empresa Vale S.A., localizada no município de Canaã dos Carajás-PA. As amostras dos constituintes do substrato apresentaram a seguinte composição química: rejeito de cobre: pH em H₂O= 8,6; Cu=190 mg mg dm⁻³; esterco bovino: pH em CaCl₂= 5,7; EC= 3,3 dS m⁻¹; CTC= 380 mmol kg⁻¹; Matéria Orgânica Total= 34,46%; N= 0,62%; P₂O₅= 0,29%; K= 1,2%; S= 0,37%; Ca= 0,48%; Mg= 0,26%; Fe= 0,17 mg dm⁻³; Zn= 38,7 mg dm⁻³; Cu= 8 mg dm⁻³; Mn= 103,3 mg dm⁻³ e B= 5,7 mg dm⁻³.

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado (DIC), constituído de cinco tratamentos (T) e cinco repetições, sendo as parcelas experimentais compostas de cinco tubetes (400 g), distribuídos em 5 bandejas de 25 tubetes cada uma, resultando em 125 amostras, com diferentes proporções de matéria orgânica e rejeito de cobre. Os tratamentos foram

representados por T1= 400 g de rejeito de cobre (100%) + 0 g de esterco bovino (EB) (0,0%); T2= 390 g de rejeito de cobre (97,5%) + 10 g de EB (2,5%); T3= 380 g de rejeito de cobre (95,0%) + 20 g de EB (5%); T4= 370 g de rejeito de cobre (92,5%) + 30 g de EB (7,5%) e T5= 360 g de rejeito de cobre (90%) + 40 g de EB (10%).

As sementes de ipê-branco foram provenientes de matrizes localizadas na Unidade II da UNIFESSPA, Marabá-PA. O substrato foi pesado, depositado nos tubetes e estes foram incubados, com auxílio de lona plástica, por um período de 15 dias antes do semeio. Passado o período de incubação, se realizou o semeio e aos 10 dias deste, foi realizado o desbaste mantendo a planta mais vigorosa. Para garantir a germinação o experimento foi irrigado diariamente no período da manhã, se mantendo este procedimento durante todo o ensaio.

Foram realizadas avaliações morfométricas em 20, 40, 60 e 80 dias após o semeio. As variáveis avaliadas foram altura de planta, diâmetro do caule e número de folhas, cujas medidas de altura foram realizadas com auxílio de uma régua de 30 cm, o diâmetro do caule foi mensurado com paquímetro digital 6" 150 mm aço inox 01,0004 Zaas e a contagem de folhas foi realizada de forma direta contabilizando as unidades desenvolvidas durante a experimentação.

Aos 80 dias foi realizada a coleta final e secção das partes aéreas e radiculares das plantas. Cada compartimento vegetal foi colocado em sacos de papel de acordo com os seus tratamentos e encaminhados ao laboratório para análise. Após estes procedimentos, as amostras de fitomassa e substrato foram levados para estufa a 70 °C por 72 h, após atingirem peso constante, compondo assim a fitomassa seca, que posteriormente foi enviada ao laboratório para análises de macro e micronutrientes.

Na avaliação do crescimento das mudas utilizou-se o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) (DICKSON et al., 1960), abaixo na equação 1 (Eq. 1), sendo utilizados os seguintes parâmetros: peso da fitomassa total (PMST), peso da fitomassa da parte aérea (PMSPA) e da fitomassa radicular (PMSR) em g, diâmetro do caule (DC) em mm e altura da planta (H).

$$IQD = \frac{MST(g)}{\frac{H(cm)}{D(mm)} + \frac{MSPA(g)}{PMSR(g)}} \quad \text{Equação 1.}$$

Para identificar a capacidade das plantas de translocar metais pesados nos compartimentos aéreos e radiculares foi utilizado o Índice e Fator de Translocação e Coeficiente de

Extração, cujo Abichequer e Bohnen (1998) sugere a equação seguinte (Eq. 2), para calcular o Índice de Translocação (IT).

$$IT = \frac{\text{Quantidade de metal na parte aérea}}{\text{Quantidade de metal na planta}} \times 100 \quad \text{Equação 2.}$$

O cálculo do Fator de Translocação (FT) (Eq. 3) deriva da equação 2, é um fator importante na fitorremediação, pois designa a habilidade da planta de translocar o metal da raiz para a parte aérea (MARCHIOL et al., 2004).

$$FT = \frac{\text{Teor de metal na parte aérea}}{\text{Teor de metal nas raízes}} \quad \text{Equação 3.}$$

O Coeficiente de Extração (CE) (Eq. 4) descreve a capacidade da planta de retirar metal do solo em porcentagem e é calculada de acordo com a equação 4 (KUMAR et al., 1995).

$$CE = \frac{\text{Peso (g) do metal por (g) de matéria seca vegetal}}{\text{Peso (g) do metal por (g) de matéria seca do solo}} \times 100 \quad \text{Equação 4.}$$

Após a análise preliminar em relação à normalidade dos dados, estes foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a $\alpha \leq 0,05$, utilizando o software Sisvar 5.6 Build 90 (FERREIRA, 2014). Foram realizadas análises de regressão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o crescimento das espécies nos primeiros 20 dias após o semeio (Tabela 1) não foram observadas variações significativas em relação aos dados morfométricos referentes à altura, diâmetro e número de folhas, como indica a comparação de médias.

Aos 40 dias do semeio ocorreram variações estatísticas referentes à altura e número de folhas dos tratamentos, em contrapartida, os dados de diâmetro do caule mostraram-se estatisticamente semelhantes. Do mesmo modo, aos 60 dias de cultivo da espécie, tanto a altura como o número de folhas apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos, onde os tratamentos T4 e T5 foram os que apresentaram melhor crescimento. Enquanto que, o diâmetro não diferiu estatisticamente. Transcorridos o tempo estimado de avaliações (80 dias), verificou-se que os tratamentos T4 e T5 possuem dados estatisticamente semelhantes em relação à altura e diâmetro, porém quanto ao número de folhas o tratamento T5 possui maior valor desta variável (Tabela 1).

Tabela 1. Dados médios referentes à altura (cm), diâmetro do caule (mm) e número de folhas (unidade) aos 20, 40, 60 e 80 dias de *Tabebuia roseo-alba* cultivadas em substrato com rejeito de mineração de cobre e percentuais crescentes de matéria orgânica.

20 dias			
Tratamentos	Altura (cm)	Diâmetro (mm)	Número de Folhas
T1	2,22 a	1,27 a	2,00 a
T2	3,01 a	1,20 a	2,00 a
T3	2,81 a	1,16 a	2,00 a
T4	2,70 a	1,19 a	2,00 a
T5	2,98 a	1,06 a	2,20 a
CV (%)	25,56	19,19	9,80

40 dias			
Tratamentos	Altura (cm)	Diâmetro (mm)	Número de Folhas
T1	3,79 a	1,59 a	2,50 a
T2	4,33 ab	1,67 a	3,24 ab
T3	4,60 ab	1,72 a	3,24 ab
T4	5,19 ab	1,76 a	4,00 b
T5	5,30 b	1,83 a	4,11 b
CV (%)	16,11	9,55	14,37
60 dias			
Tratamentos	Altura (cm)	Diâmetro (mm)	Número de Folhas
T1	4,34 a	2,03 a	2,85 a
T2	5,34 a	2,11 a	4,19 b
T3	5,77 a	2,19 a	4,96 bc
T4	7,31 b	2,40 a	5,82 cd
T5	8,14 b	2,35 a	6,55 d
CV (%)	12,99	11,69	11,89
80 dias			
Tratamentos	Altura (cm)	Diâmetro (mm)	Número de Folhas
T1	4,34 a	2,04 a	2,85 a
T2	6,34 ab	2,18 a	5,95 b
T3	7,14 ab	2,41 ab	6,66 bc
T4	9,64 bc	2,81 bc	7,70 c
T5	12,08 c	3,15 c	8,78 d
CV (%)	27,52	13,10	10,16

T1= 400 g de rejeito de cobre (100%) + 0 g de esterco bovino (EB) (0,0%); T2= 390 g de rejeito de cobre (97,5%) + 10 g de EB (2,5%); T3= 380 g de rejeito de cobre (95,0%) + 20 g de EB (5%); T4= 370 g de rejeito de cobre (92,5%) + 30 g de EB (7,5%) e T5= 360 g de rejeito de cobre (90%) + 40 g de EB (10%). CV = Coeficiente de variação. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($\alpha \leq 0,05$).

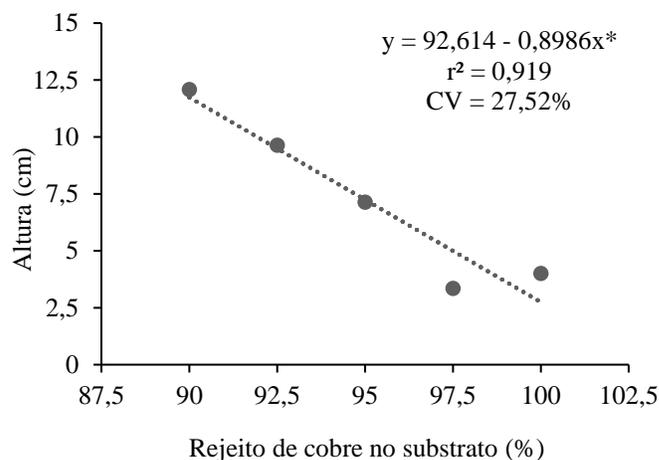
Segundo estudos de Silva et al. (2010), o excesso de cobre no solo reduziu o crescimento das mudas de canafístula (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.) uma árvore de médio a grande porte com diâmetro do caule semelhante aos valores recorrentes em indivíduos de ipê-branco. Este menor crescimento de espécies em solo rico em cobre também pode ser observado nos tratamentos T1, T2 e T3, onde, estatisticamente, os valores de altura, diâmetro do caule e número de folhas aos 80 dias de cultivo são semelhantes

Segundo a equação e o gráfico de regressão linear (Figura 1), referentes às médias de altura de plantas de todos os tratamentos e a quantidade de cobre no substrato, observa-se que quanto maior os valores quantitativos de cobre menor a altura das mesmas, visto que as plantas que apresentaram menor altura também continham menores quantidades de esterco bovino no solo e maiores quantidades de cobre na parte radicular.

Segundo Zampieri (2010) que estudou o comportamento morfológico de plantas da espécie de *Aechmea blanchetiana* (Baker) L.B. Smith com diferentes concentrações de cobre no substrato, observou que ocorreram reduções consideráveis em altura das plantas após 16 semanas (120 dias) de cultivo, obtendo as menores alturas as plantas que continham as maiores quantidades de cobre no substrato. Dados estes que corroboram com os resultados deste trabalho aos 80 dias de cultivo, final do período de observação do ensaio em questão, onde o

comportamento do ipê-branco na maior concentração de cobre obteve o menor crescimento das plantas (Figura 1).

Figura 1. Altura das plantas de *Tabebuia roseo-alba* aos 80 dias de cultivo em percentuais crescentes de rejeito de cobre no substrato.



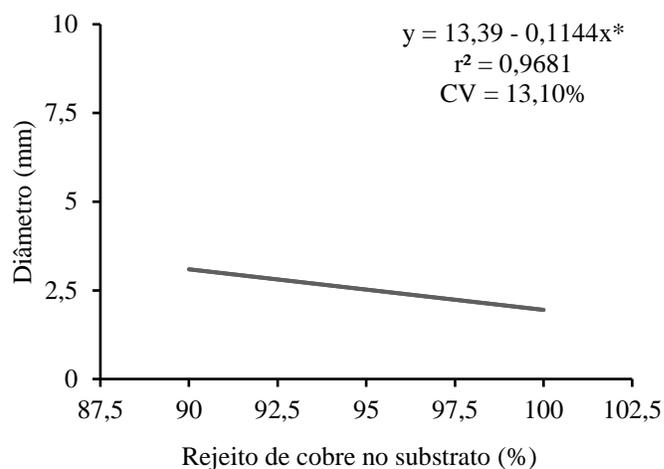
Trabalho semelhante realizado por Silva et al. (2016) observaram que as concentrações crescentes de cobre (0, 60, 120,

180, 240 e 300 mg dm⁻³) no solo interferiram negativamente e com maior intensidade no crescimento e qualidade das mudas de pata-de-vaca (*Bauhinia forficata* Link.) e carne-de-vaca (*Pterogyne nitens* Tul.) em relação à timbaúva (*Enterolobium contortisiliquum* Vell.). Estes resultados reforçam o dito anteriormente que, a maior concentração de cobre no substrato, menor é o desenvolvimento das plantas de ipê-branco, diminuindo seu crescimento de maneira significativa com 100% de rejeito de cobre (190 mg dm⁻³), cujo as mesmas cresceram apenas 4,34 cm de altura (T1), aumentando para 12,08 cm quando essa concentração diminuiu para 90% de rejeito de cobre mais 10% de matéria orgânica (T5). Relacionando os valores em crescimento das plantas do estudo feito por Silva et al. (2016), referentes aos 80 dias de cultivo das 3 espécies, percebe-se que a espécie *Pterogyne nitens* apresentou dados semelhantes ao tratamento T1 do ipê-branco no mesmo período, uma vez que com a concentração de 180 mg.dm⁻³ aos 80 dias, esta apresentou um valor médio em altura de 5,44 cm, enquanto a *Bauhinia forficata* e a *Enterolobium contortisiliquum* atingiram valores em altura de 7,58 cm e 8,24 cm, respectivamente.

Mota et al. (2018), analisaram a capacidade de remediação da planta *Talinum paniculatum* (Jacq.) em solo contaminado com cobre (0; 40; 80; 120 e 160 mg dm⁻³) onde não foram observadas diferenças significativas para as variáveis analisadas no período de 63 dias de cultivo das medidas morfológicas: diâmetro, número de folhas e altura. No mesmo período de cultivo com o ipê-branco e concentração de 190 mg dm⁻³ de cobre no substrato (tratamento T1), e nos demais tratamentos ensaiados estes não foram responsivos em relação ao diâmetro do caule, porém em relação à altura e número de folhas apareceram diferenças significativas, uma vez que os tratamentos T4 e T5 apresentaram os melhores resultados em relação aos demais. Resultado esse que diverge aos encontrados pelos autores supracitados, o que nos leva a crer que poderia estar relacionado com a espécie de planta ensaiada, haja vista, que nem todas as espécies respondem igualmente a um estresse ou estímulo induzido.

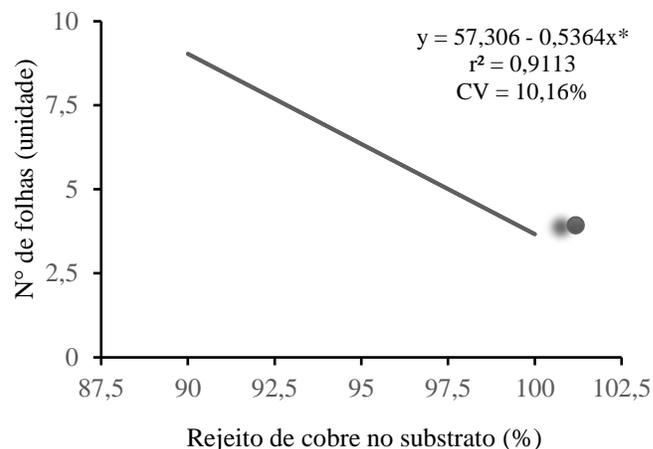
O valor referente ao diâmetro médio do caule das plantas só passou a apresentar diferenças significativas com o passar dos dias, onde aos 80 dias de cultivo (Figura 2) todos os tratamentos mostraram-se mais satisfatórias em relação à equação de regressão linear, apresentando valores razoáveis em relação ao crescimento das plantas estudadas, onde quanto maior o percentual de rejeito de cobre no substrato, como no tratamento T1, menor o diâmetro do caule, este aumentando em função da diminuição do rejeito no substrato e o aumento da matéria orgânica, como se pode observar no tratamento T5 que se diferencia dos demais de forma significativa, ainda que seja semelhante ao T4 (Tabela 1). Esses resultados diferem dos encontrados por Mota et al. (2018), porém há que levar em consideração que, como nos referimos anteriormente, pode haver sido em função do período estudado. O autor supracitado analisou seus dados aos 63 dias e estes foram aos 80 dias de cultivo.

Figura 2. Diâmetro das plantas de *Tabebuia roseo-alba* aos 80 dias de cultivo em percentuais crescentes de rejeito de cobre no substrato.



O crescimento de folhas (Figura 3) no experimento está relacionado com a quantidade de cobre no substrato e na planta, visto que as espécies com maiores números de folhas cresceram em solo com maiores quantidades de esterco bovino e menores quantidades de cobre nos seguimentos aéreos e radiculares.

Figura 3. Número médio de folhas das plantas de *Tabebuia roseo-alba* aos 80 dias de cultivo em percentuais crescentes de rejeito de cobre no substrato.



Os números de folhas que se observou neste ensaio com o ipê-branco pode ser comparado aos encontrados por Oliveira (2018) que estudando o comportamento das espécies *Schizolobium amazonicum*, *Leucaena leucocephala* e *Azadirachta indica* em substrato com 200 mg dm⁻³ de cobre obteve valores de número de folhas próximos de 4,5, 4,6 e 6 unidades, respectivamente, em 60 dias de cultivo, enquanto que, neste mesmo período, o número de folhas desenvolvidas pelo ipê-branco variaram de 2,85 unidades, para o tratamento T1, a 6,55 unidades, para o tratamento T5, com apenas 10% de matéria orgânica no substrato, confirmando que a mistura de matéria orgânica com o substrato a base de rejeito de cobre, favorece o

crescimento das plantas, haja vista que o número de folhas triplicou. Essa resposta positiva pode ser corroborada aos 80 dias de cultivo, onde o número de folhas em substrato com 10% de matéria orgânica obteve 8,78 unidades de folhas, resultado que pode ser comparado aos encontrados por Marques et al. (2004), que investigando o desenvolvimento da espécie *Schizolobium amazonicum* em substrato orgânico, puderam constatar que aos 90 dias de cultivo, a espécie em questão obteve valor médio para número de folhas igual a 8 unidades, reforçando a ideia de que a utilização de matéria orgânica no substrato, mesmo composto por rejeito de metais como o ensaiado neste trabalho, pode ser viável.

Em geral, observou-se que o crescimento do ipê-branco não apresentou anormalidades durante o período de 80 dias de cultivo. Os seus dados morfológicos (altura, diâmetro do caule e número de folhas) aumentaram proporcionalmente ao uso de matéria orgânica no substrato.

Em relação às características químicas do substrato com rejeito de mineração de cobre e percentuais crescentes de esterco bovino, os valores de Cu e Fe foram elevados, além de valores considerados altos em relação à quantidade de Mn e K (Tabela 2).

Tabela 2. Atributos químicos do substrato composto com rejeito de cobre e percentuais crescentes de matéria orgânica nos tratamentos com *Tabebuia roseo-alba*, aos 80 dias.

Atributos	Unidade	T1	T2	T3	T4	T5
K	mg dm ⁻³	280	240	210	210	210
Fe	mg dm ⁻³	579	581	528	546	535
Zn	mg dm ⁻³	2,2	1,7	2,9	2,8	4,3
Cu	mg dm ⁻³	54	37,5	36	33	30
Mn	mg dm ⁻³	110	112	117	107	121
pH em H ₂ O	-	8,4	8,2	8,0	7,9	7,9

T1= 400 g de rejeito de cobre (100%) + 0 g de esterco bovino (EB) (0,0%); T2= 390 g de rejeito de cobre (97,5%) + 10 g de EB (2,5%); T3= 380 g de rejeito de cobre (95,0%) + 20 g de EB (5%); T4= 370 g de rejeito de cobre (92,5%) + 30 g de EB (7,5%) e T5= 360 g de rejeito de cobre (90%) + 40 g de EB (10%).

Nos compartimentos (parte aérea e radicular) das plantas referentes a cada tratamento, de acordo com as análises químicas relacionadas à quantidade de cobre presente (Tabela 3), verifica-se que as maiores quantidades de cobre se encontram nos tratamentos com menores quantidades de esterco bovino. Nota-se que os valores encontrados nos compartimentos radiculares das plantas são maiores que os das partes aéreas. Segundo Oliveira (2018) espécies de plantas com quantidades superiores de metais em suas raízes são denominadas espécies fitoestabilizadoras ou que possam indicar este mecanismo de fitorremediação, o que foi verificado no ipê-branco nas circunstâncias apresentadas neste experimento.

Tabela 3. Quantidade de cobre (mg dm⁻³) nos compartimentos da parte aérea e radicular da *Tabebuia roseo-alba*.

Tratamentos	Parte aérea (mg dm ⁻³)	Parte radicular (mg dm ⁻³)
T1	48	115
T2	16	130
T3	12	103
T4	11	80
T5	10	70

T1= 400 g de rejeito de cobre (100%) + 0 g de esterco bovino (EB) (0,0%); T2= 390 g de rejeito de cobre (97,5%) + 10 g de EB (2,5%); T3= 380 g de rejeito de cobre (95,0%) + 20 g de EB (5%); T4= 370 g de rejeito de cobre (92,5%) + 30 g de EB (7,5%) e T5= 360 g de rejeito de cobre (90%) + 40 g de EB (10%). CV = Coeficiente de variação. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($\alpha \leq 0,05$).

Os IQDs que se observa na Tabela 4 aumentam em função do acréscimo da matéria orgânica no substrato, se mostrando satisfatórios principalmente nos últimos tratamentos, T4 e T5,

onde a probabilidade das plantas de ipê-branco de crescer em substrato semelhante ao utilizado neste experimento é um indicativo de que este índice significa, o qual define o momento ideal de levar as mudas para o plantio definitivo, apresentando assim à capacidade da planta de resistir às mudanças que acontecerão da fase de muda a fase inicial e adulta no campo. O quanto mais próximo do valor do índice de 0,2 este traduz a melhor qualidade da muda que de acordo com Azevedo et al. (2010), estes relataram que o IQD é um ótimo indicador da qualidade de mudas, porque leva em conta em seu cálculo a robustez e o equilíbrio da distribuição da biomassa na muda, ponderando os resultados de parâmetros importantes utilizados na avaliação da qualidade de mudas, como a altura, o diâmetro, matéria seca parte aérea, raiz e também a total.

Tabela 4. Índice de qualidade de Dickson da espécie de *Tabebuia roseo-alba* em substrato rico em rejeito de cobre e percentagens crescentes de esterco bovino.

Tratamentos	IQDs
T1	0,0228
T2	0,0467
T3	0,0631
T4	0,1011
T5	0,1306

T1= 400 g de rejeito de cobre (100%) + 0 g de esterco bovino (EB) (0,0%); T2= 390 g de rejeito de cobre (97,5%) + 10 g de EB (2,5%); T3= 380 g de rejeito de cobre (95,0%) + 20 g de EB (5%); T4= 370 g de rejeito de cobre (92,5%) + 30 g de EB (7,5%) e T5= 360 g de rejeito de cobre (90%) + 40 g de EB (10%). CV = Coeficiente de variação. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($\alpha \leq 0,05$).

Segundo Silva et al. (2014), que estudaram o comportamento do barbatimão (*Stryphnodendron polyphyllum* Mart.) e da cássia (*Cassia multijuga* Rich.), identificaram que a primeira espécie não sofreu diferenças em seu crescimento, enquanto a segunda espécie manteve a qualidade de mudas até 300 mg dm⁻³ de cobre adicionado ao solo, divergindo com os dados encontrados nesta pesquisa com o ipê-branco, onde o tratamento com maior percentual de rejeito de cobre no substrato (190 mg dm⁻³), T1, apresentou o menor IQD.

Na Tabela 5, o ipê-branco apresentou um índice de translocação (IT) variando de 29,45% (T1) a 12,50% (T5), ainda que o mais destacado foi para o tratamento sem matéria orgânica no substrato, apresentando os demais tratamentos um índice de translocação inferior e semelhantes entre si. Também, a quantidade de cobre no substrato foi decrescendo com o aumento da matéria orgânica no mesmo, o que poderia explicar essa tendência da translocação do cobre na planta.

Tabela 5. Índice de translocação (IT) e fator de translocação (FT) em *Tabebuia roseo-alba* em doses decrescentes de cobre e aumento da matéria orgânica no substrato de cultivo.

Tratamentos	Cu (mg dm ⁻³)	IT (%)	FT (%)
T1	163	29,45	0,41
T2	146	10,96	0,12
T3	115	10,43	0,11
T4	91	12,09	0,01
T5	80	12,50	0,01

T1= 400 g de rejeito de cobre (100%) + 0 g de esterco bovino (EB) (0,0%); T2= 390 g de rejeito de cobre (97,5%) + 10 g de EB (2,5%); T3= 380 g de rejeito de cobre (95,0%) + 20 g de EB (5%); T4= 370 g de rejeito de cobre (92,5%) + 30 g de EB (7,5%) e T5= 360 g de rejeito de cobre (90%) + 40 g de EB (10%). CV = Coeficiente de variação. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($\alpha \leq 0,05$). Cu (mg dm⁻³) representa o somatório das concentrações do metal na parte aérea e radicular da espécie.

Em pesquisa realizada por Silva et al. (2007), a baixa absorção de cobre no cultivo da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) em solos com diferentes níveis de contaminação foi consequência da elevada contaminação do solo por Zn, fato que não pode ser constatado no cultivo do ipê-branco, visto que as quantidades de Zn encontradas nos substratos de cultivo do ipê-branco são muito baixas em relação ao cobre existente. Enquanto, em experimento conduzido por Paiva et al. (2002), que avaliaram o índice de translocação de nutrientes em mudas de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) e de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.) submetidas a doses crescentes de Cd, Ni e Pb foi verificado que a presença de metais pesados em solução nutritiva faz com que haja resposta diferenciada no índice de translocação dos diferentes nutrientes, isso de acordo com a espécie.

Conforme Oliveira (2018) a utilização do índice e fator de translocação ocorre quando se deseja estimar o potencial fitorremediador de espécies vegetais, geralmente são as primeiras análises feitas. Após a obtenção do IT e FT ocorre à avaliação da capacidade da espécie de retirar metal pesado do substrato e transportar para a parte aérea por meio do cálculo do coeficiente de extração (CE). Ao se verificar um acúmulo maior de metal na parte radicular em comparação com o translocado a parte aérea a

espécie vegetal estudada é denominada fitoestabilizadora, como sugere os estudos realizados por Andrezza e Camargo (2011) que em áreas contaminadas com cobre e cultivada com plantas de mamona (*Ricinus communis* L.) foram encontrados valores de FT baixos (0,01; 0,01 e 0,03%), porém as plantas apresentaram alto potencial de fitoacumulação do metal nas raízes com valores de 1.131 mg dm⁻³ de cobre contido na parte radicular, caracterizando a planta como fitoestabilizadora. Ademais, mesmo com essa limitação do solo contaminado por cobre, a mamoneira apresentou capacidade de crescimento considerável (ANDREAZZA; CAMARGO, 2011).

Entretanto, a diferença do estudo dos autores supracitados, o FT deste trabalho foi superior no substrato com maior concentração de cobre, ou seja, que em relação à *Ricinus communis* o ipê-branco se apresenta com uma maior capacidade de translocar o cobre ao se encontrar um FT de 0,41%.

A fitoextração, um dos mecanismos utilizadas no processo de descontaminação ambiental empregando variedades de plantas, além de outros organismos onde, nas plantas estes contaminantes são absorvidos através das raízes e posteriormente translocados às folhas (FUENTES, 2001; ANDRADE et al., 2007), sendo o objetivo da fitoextração a limpeza *in situ* do meio contaminado de forma a retirar o contaminante e, se possível, reaproveitar os elementos que tenham utilidade nos processos produtivos atuais (TERRY; BAÑUELOS, 2000).

Os dados do coeficiente de extração do ipê-branco em substrato rico em rejeito de cobre e matéria orgânica apresentaram valores de acumulação de cobre, tanto na parte aérea como na radicular, porém com uma maior concentração nesta última (Tabela 6).

Tabela 6. Coeficiente de extração (%) de cobre em compartimentos de *Tabebuia roseo-alba*, cultivado em diferentes percentuais de matéria orgânica.

Tratamentos	Parte radicular	Parte aérea
T1	60,52	25,26
T2	68,42	8,42
T3	54,21	6,31
T4	42,10	5,78
T5	36,84	5,26

T1= 400 g de rejeito de cobre (100%) + 0 g de esterco bovino (EB) (0,0%); T2= 390 g de rejeito de cobre (97,5%) + 10 g de EB (2,5%); T3= 380 g de rejeito de cobre (95,0%) + 20 g de EB (5%); T4= 370 g de rejeito de cobre (92,5%) + 30 g de EB (7,5%) e T5= 360 g de rejeito de cobre (90%) + 40 g de EB (10%). CV = Coeficiente de variação. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($\alpha \leq 0,05$).

Nesse ensaio, o mecanismo de fitoestabilização, com os tratamentos com menores quantidades de matéria orgânica (T1 e T2), apresentando os maiores coeficientes de extração, tanto na parte aérea quanto na parte radicular, porém foi à raiz o órgão que mais acumulou o metal cobre. Assim mesmo, outros trabalhos podem corroborar os resultados deste estudo, por exemplo, como os estudos realizados por Caires (2005) com o ipê-roxo (*Handroanthus impetiginosus*), que alcançou importantes resultados ao encontrar nas raízes o maior acúmulo do metal cobre, indicando dessa maneira o potencial

fitorremediador da espécie em estudo, semelhante ao encontrado com o ipê-branco nesse estudo.

Essas espécies ao concentrar melhor o cobre em sua parte radicular, as caracterizam como plantas fitoestabilizadoras, pois a fitoestabilização pode ser entendida como a imobilização de produtos contaminantes pela absorção e acumulação nas raízes, adsorção por estas ou mesmo a precipitação destes na rizosfera, que segundo Andrade et al. (2007), este processo pode ou não remover as toxinas do solo, porém diminui sua mobilidade e impede que as mesmas migrem para as águas subterrâneas ou o ar, diminuindo o potencial de se introduzirem na cadeia alimentar.

O destino do material vegetal produzido dependerá da possibilidade ou não de seu aproveitamento, sendo decidido de acordo com a espécie vegetal cultivada, sua capacidade de bioacumulação e o risco ambiental que representa na hora de sua reutilização. Neste estudo se pensou na reutilização de rejeito de mineração de cobre como substrato para produção de essências florestais e ao mesmo tempo descobrir novas espécies que se desenvolvam nesses ambientes contaminados, ajudando na descontaminação.

CONCLUSÕES

A espécie *Tabebuia roseo-alba* cultivada em substrato com rejeito de cobre e 10% de matéria orgânica obteve melhor desempenho em morfométricas de altura, diâmetro de caule e número de folhas.

O índice de qualidade de Dickson foi alcançado de maneira satisfatória pela espécie *Tabebuia roseo-alba* no tratamento com substrato composto de 90% de rejeito de mineração de cobre e 10% de matéria orgânica.

O potencial fitorremediador da *Tabebuia roseo-alba* como espécie fitoestabilizadora em substrato com rejeito de cobre e matéria orgânica foi confirmado, em razão da capacidade que a espécie desenvolveu através do coeficiente de extração, mesmo em 100 % no substrato do referido rejeito.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará - UNIFESSPA.

REFERÊNCIAS

ABICHEQUER, A. D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 22, n. 1, p. 21-26, 1998.

ANSELMO, A. L. F.; JONES, C. M. Fitorremediação de solos contaminados – O estado da arte. XXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Porto Alegre: ABEPRO/PUCRS. 17 p. 2005.

ANM, Agência Nacional de Mineração. Cu. Balanço Mineral Brasileiro, 2001. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-Cu>> Acesso em: 24 Mar. 2019.

ALMEIDA, M. F. Caracterização agrometeorológica do município de Marabá, PA. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará, Marabá, 2007. 77p.

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

ANDREAZZA, R.; CAMARGO, F. A. O. Fitorremediação de áreas contaminadas com Cu utilizando plantas de mamona. Ciências Agrárias, Salão de Ensino (3 a 7 de outubro de 2011: UFRGS, Porto Alegre, RS). 2011. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/62888>>. Acesso em: 15 Jun. 2019.

AZEVEDO, I. M. G.; ALENCAR, R. M.; BARBOSA, A. P.; ALMEIDA, N. O. O estudo do crescimento e qualidade de mudas de marupá (*Simarouba amara* Aubl.) em viveiro. *Acta Amazônica*, v. 40, n.1, p. 157-164. 2010.

CAIRES, S. M. Comportamento de mudas de espécies florestais nativas na fitorremediação de solo contaminado com zinco e cobre. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa. 2005. 81p.

COUTINHO, H. D.; BARBOSA, A. R. Fitorremediação: Considerações Gerais e Características de Utilização. *Revista Silva Lusitana*, Lisboa, v.15, n.1, p. 103-117, 2007.

DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *Forest Chronicle*, v.36, n.1, p.10-13, 1960.

ESTRELA M. A.; CHAVES L. H. G.; SILVA L. N. Fitorremediação como solução para solos contaminados por metais pesados. *Ceuma Perspectivas*. v. 31, p. 160-172. 2018.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. *Ciênc. agrotec.* v. 38, n. 2, p.109-112, 2014. [10.1590/S1413-70542014000200001](https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001).

FUENTES, H. D. Studies in the use of plant growth regulators on phytoremediation. Thesis (Doctoral). University of Western Sydney, Sydney / Austrália. 2001. 180 p.

IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração/Instituto Brasileiro de Mineração; Organizador, Instituto Brasileiro de Mineração. Brasília: IBRAM, 1. ed., 2016. 128 p.

JONES, C.M; ANSELMO, A.L.F. Fitorremediação de solos contaminados: O estado da arte. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2005.

- KUMAR, P. B. A. N.; DUSHENKOV, V.; MOTTO, H.; RASKIN, I. Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. *Environmental Science & Technology*, v. 29, n. 5, p. 1232-1238, 1995.
- LAMEGO, F. P.; VIDAL, R. A. Fitorremediação: Plantas como agentes de despoluição? *Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente*. Curitiba/Brasil, v. 17, p. 9-18, 2007.
- LORENZI, H. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil. 2. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, v. 2. 368 p. 2002.
- MACEDO, M. C. Produção de mudas de ipê-branco em diferentes substratos. *Cerne*, Lavras, v.17, n.1, p. 95-102. 2011. [10.1590/S0104-77602011000100011](https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000100011)
- MARCHIOL, L.; SACCO, P.; ASSOLARI, S.; ZERBI, G. Reclamation of polluted soil: Phytoremediation potential of crop-related Brassica species. *Water Air and Soil Pollution*. v. 158, n. 1, p. 345-356, 2004.
- MARQUES, T. C. L. L. S. M.; CARVALHO, J. G.; LACERDA, M. P. C.; MOTA, P. E. F. Exigências nutricionais do paricá (*Schizolobium amazonicum* Herb.) na fase de muda. *Cerne*, Lavras, v. 10, n. 2, p. 167-183, 2004.
- MOTA, D. G.; SILVA, M. S.; BERNADINO, M. M.; OLIVEIRA, W. T. G.; SOUZA, L. A.; LEAL, R. M. P. Utilização de *Talinum paniculatum* na fitorremediação de solo contaminado com Cu. 8º Seminário de Avaliação dos Programas de Pós-Graduação do IF Goiano, IF Goiano - Campus Rio Verde, 2018.
- OLIVEIRA, D. M.; CARA, D. V. C.; XAVIER, P. G.; PAULA, M. S.; SOBRAL, L. G. S.; LIMA, R. B.; LOUREIRO, A. Fitorremediação: o estado da arte. *Tecnologia Ambiental*, n. 39. Rio de Janeiro. 2006. 49p.
- OLIVEIRA, F. K. D. Potencial de espécies vegetais à fitorremediação de solo contaminado com cobre. 2018. Dissertação (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal da Paraíba, Areia-PB, 2018. 114p.
- PAIVA, H. N.; CARVALHO, J. G.; SIQUEIRA, J. O. Índice de translocação de nutrientes em mudas de cedro (*Cedrela Fissilis* Vell.) e de ipê-roxo (*Tabebuia Impetiginosa* (Mart.) Standl.) submetidas a doses crescentes de cádmio, níquel e chumbo. *Rev. Árvore* [online], v. 26, n. 4 p. 467-473. 2002. [10.1590/S0100-67622002000400009](https://doi.org/10.1590/S0100-67622002000400009).
- RAIOL, J. A. Perspectivas para o meio ambiente urbano: GEO Marabá. Belém, Pará. 2010. 136 p.
- SILVA, M. L. S.; VITTI, G. C.; TREVIZAM, A. R. Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 42, n. 4, p. 527-535, 2007.
- SILVA, R. F.; ANTONIOLLI, Z. I.; LUPATINI, M.; TRINDADE, L. L.; SILVA, A. S. Tolerância de mudas de canafístula (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.) inoculada com *Pisolithus microcarpus* em solo com excesso de Cu. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 147-156, 2010.
- SILVA, R. F.; MISSIO, E. V.; STEFFEN, R. B.; WEIRICH, C. C. K.; SCHEID, D. L. Efeito do Cu sobre o crescimento e qualidade de mudas de *Stryphnodendron polyphyllum* Mart. e *Cassia multijuga* Rich. *Ciência Florestal*. 2014, v. 24, n. 3, p. 717-725. [10.1590/1980-509820142403019](https://doi.org/10.1590/1980-509820142403019).
- SILVA, R. F.; ROS, C. O.; DELLAI, A.; GROLLI, A. L.; SCHEID, D. L.; VIEL, P. Interferência de doses de Cu no crescimento e na qualidade de mudas de *Bauhinia forficata* link, *Pterogyne nitens* Tul e *Enterolobium contortisiliquum* Vell. *Ciência Florestal*, v. 26, n.2, p. 647-655. 2016.
- TERRY, N.; BAÑUELOS, G. S. Phytoremediation of contaminated soil and water. Boca Raton: Lewis, 2000. 389 p
- ZAMPIERI, M. C. T. Estudos sobre o efeito do Cu e Zn no crescimento da plântula de *Aechmea blanchetiana* (Baker) L. B. Smith cultivada *in vitro*. Aplicação da análise por ativação com nêutrons. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2010. 166p.