

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

MAXWELL PEREIRA DE PÁDUA

***COPAIFERA LANGSDORFFII* DESF. CULTIVADA EM REJEITO DE MINERAÇÃO DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO, EM MARIANA, MINAS GERAIS, BRASIL, EM DUAS CONDIÇÕES DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA.**

Alfenas - MG

2020

MAXWELL PEREIRA DE PÁDUA

COPAIFERA LANGSDORFFII DESF. CULTIVADA EM REJEITO DE MINERAÇÃO DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO, EM MARIANA, MINAS GERAIS, BRASIL, EM DUAS CONDIÇÕES DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA.

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício José Pereira

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Polo

Alfenas - MG

2020

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas

Pádua, Maxwell Pereira de.
P125c *Copaifera langsdorffii* Desf. cultivada em rejeito de mineração do rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Brasil, em duas condições de disponibilidade hídrica / Maxwell Pereira de Pádua -- Alfenas/MG, 2020.
28 f. il. --
Orientador: Fabrício José Pereira.
Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Alfenas, 2020.
Bibliografia.

1. Anatomia foliar. 2. Ecofisiologia. 3. Lama. 4. Restrição Hídrica.
5. Trocas gasosas. I. Pereira, Fabrício José. II. Título.

CDD-577

MAXWELL PEREIRA DE PÁDUA

"Copaifera langsdorffi Desf. cultivada em rejeito de mineração do rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Brasil, em duas condições de disponibilidade hídrica"

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Ciências Ambientais.

Aprovada em: 11 de fevereiro de 2020

Prof. Dr. Fabrício José Pereira
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Thiago Correa de Souza
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Vinícius Politi Duarte
Instituição: Universidade Federal de Lavras



Documento assinado eletronicamente por **Vinícius Politi Duarte, Usuário Externo**, em 23/02/2020, às 19:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabricio Jose Pereira, Presidente**, em 27/02/2020, às 16:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thiago Corrêa de Souza, Professor do Magistério Superior**, em 28/02/2020, às 11:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0268490** e o código CRC **A8D87E66**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe, Maria, por acreditar no meu potencial e me apoiar totalmente nos estudos e na vida.

Agradeço à minha namorada, amiga e companheira, Gabriela, que me auxiliou e me apoiou durante todo essa trajetória, e me incentivou nos momentos mais difíceis.

Ao Alessandro pela parceria, pelo apoio e amizade em todos os momentos durante o curso e a pesquisa.

Ao apoio e incentivo da família, em especial aos meus irmãos Sigrid, Willian e Maicon.

À Gleika e ao Valdir pela amizade, boa vontade e disponibilidade para ajudar.

Ao professor Dr. Marcelo Polo, pela orientação, oportunidade, amizade, incentivo e todo apoio durante a pesquisa.

Ao professor e orientador Dr. Fabrício, pelo inspirador exemplo de pesquisador, por compartilhar seu tempo e conhecimentos que foram fundamentais para construção desse trabalho e para minha formação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da UNIFAL, e a todos os funcionários pelo apoio, oportunidades e experiências oferecidas durante esse tempo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi testar o efeito da restrição hídrica em *Copaifera langsdorffii* Desf cultivada em rejeito de mineração do rompimento da barragem de Mariana-MG. As plantas foram separadas em duas condições: capacidade de campo e 50% da capacidade de campo. O delineamento proposto foi de dois tratamentos e 15 repetições por tratamento (n= 30) durante 60 dias. Foram avaliados os efeitos da restrição hídrica no crescimento, trocas gasosas, potencial hídrico e anatomia foliar de *C. langsdorffii*. A redução na disponibilidade hídrica não promoveu modificações na massa fresca das folhas e caule, contudo, aumentou a massa fresca total e das raízes. Além disso promoveu aumento no investimento de biomassa em raízes, reduzindo em contrapartida a alocação em folhas e caule, essa condição hídrica também aumentou o comprimento da maior raiz, número de folhas e área foliar. A diminuição na disponibilidade de água não modificou o potencial hídrico foliar e teor de água das plantas. Sob capacidade de campo, as trocas gasosas e teor de clorofila foram reduzidos, as taxas fotossintéticas foram cerca de quatro vezes menores do que nas plantas cultivadas em 50% da capacidade de campo. A restrição hídrica aumentou a razão entre os diâmetros polar/equatorial e reduziu o tamanho dos estômatos de *C. langsdorffii*, contudo, não promoveu efeito na densidade estomática. Conclui-se que o rejeito de mineração não causa prejuízos nas relações hídricas, fotossintéticas e de crescimentos sob déficit hídrico em *C. langsdorffii*. As plantas crescem e se desenvolvem bem no rejeito de mineração com a redução na disponibilidade hídrica para até 50% da capacidade de campo. O aporte hídrico de 100% da capacidade de campo permite a sobrevivência das plantas ao menos por 60 dias, as plantas possuem plasticidade anatômica para tolerar essa condição, contudo, em um maior aporte de água as trocas gasosas, crescimento e desenvolvimento são reduzidos.

Palavras-chave: Anatomia foliar. Ecofisiologia. Lama. Restrição Hídrica. Trocas gasosas.

ABSTRACT

The objective of this work was to test the effect of water restriction on *Copaifera langsdorffii* Desf cultivated in mining tailings from the Mariana-MG dam rupture. The plants were separated in two conditions: field capacity and 50% of field capacity. The proposed design was two treatments and 15 repetitions per treatment (n = 30) for 60 days. The effects of water restriction on growth, gas exchange, water potential and leaf anatomy of *C. langsdorffii* were evaluated. The reduction in water availability did not promote changes in the fresh weight of the leaves and stem, however, it increased the total fresh weight and roots. In addition, it promoted an increase in the investment of biomass in roots, while reducing the allocation in leaves and stems, this water condition also increased the length of the largest root, number of leaves and leaf area. The decrease in water availability did not change the leaf water potential and water content of the plants. Under field capacity, gas exchange and chlorophyll content were reduced, photosynthetic rates were about four times lower than in plants grown at 50% of field capacity. Water restriction increased the ratio between polar / equatorial diameters and reduced the size of the stomata of *C. langsdorffii*, however, it did not promote an effect on stomatal density. It is concluded that mining tailings do not damage the water relations, photosynthetic and growth under water deficit in *C. langsdorffii*. Plants grow and thrive in mining tailings with a reduction in water availability to up to 50% of field capacity. The water supply of 100% of the field capacity allows the plants to survive for at least 60 days, the plants have anatomical plasticity to tolerate this condition, however, in a larger water supply, gas exchange, growth and development are reduced.

Keywords: Leaf anatomy. Ecophysiology. Mud. Water Restriction. Gas exchange.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - (A) Potencial hídrico (Ψ_w) e (B) teor de água em plantas de *Copaifera langsdorffii*, cultivada em rejeito de mineração do rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Brasil, em duas condições de disponibilidade hídrica. 17
- Figura 2 - Secções transversais dos folíolos de *C. langsdorffii* cultivada em rejeito de mineração de Mariana-MG em duas condições de disponibilidade hídrica. 20

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Análise dos principais macro e micronutrientes, bem como compostos tóxicos, e tamanho médio das partículas presentes no rejeito de mineração do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG. 15
- Tabela 2 - Crescimento de *Copaifera langsdorffii* cultivada em rejeito de mineração do rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Brasil, em duas condições de disponibilidade hídrica. 16
- Tabela 3 - Trocas gasosas e teor de clorofila de *Copaifera langsdorffii*, cultivada em rejeito de mineração do rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Brasil, em duas condições de disponibilidade hídrica. 18
- Tabela 4 - Características estomáticas de *Copaifera langsdorffii* cultivada em rejeito de mineração do rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Brasil, em duas condições de disponibilidade hídrica. 18
- Tabela 5 - Características anatômicas foliares de *Copaifera langsdorffii* cultivada em rejeito de mineração do rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Brasil em duas condições hídricas. 19

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 MATERIAL E MÉTODOS	11
2.1 CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO	11
2.2 ANÁLISE BIOMÉTRICA.....	12
2.3 ANÁLISES DAS TROCAS GASOSAS FOLIARES.....	12
2.4 TEOR RELATIVO DE CLOROFILA.....	13
2.5 POTENCIAL HÍDRICO FOLIAR E TEOR DE ÁGUA NAS PLANTAS	13
2.6 CARACTERÍSTICAS ESTOMÁTICAS E ANATOMIA FOLIAR	13
2.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA	14
3 RESULTADOS	15
4 DISCUSSÃO	21
5 CONCLUSÃO	25
REFERÊNCIAS	26

1 INTRODUÇÃO

A degradação ambiental pode ocorrer por fatores bióticos e abióticos e em muitos casos pode ser influenciada por ações antrópicas (REIS *et al.*, 2017). Uma das principais atividades humanas promotora de problemas socioambientais é a mineração, nestas atividades, alguns desastres podem ir além dos impactos já provocados pelo ciclo produtivo (LACAZ; PORTO; PINHEIRO, 2017). Como exemplo, destaca-se o rompimento de barragens de contenção dos rejeitos, fenômeno que possui diversos registros mundiais (RICO *et al.*, 2008). Impactos como a contaminação do solo e da água por produtos químicos e metais radioativos, desflorestamento, acidificação do solo, entre outros são consequências do rompimento destas barragens (FOULDS *et al.*, 2014; KARACA; CAMESELLE; REDDY, 2018; SILVA JUNIOR *et al.*, 2018).

Registros de vários episódios dessa natureza no Brasil intensificaram-se nos últimos anos (LACAZ; PORTO; PINHEIRO, 2017). O maior desastre desse tipo no mundo em termos de volume de rejeito derramado e extensão dos danos ambientais, ocorreu em 2015 na região de Mariana, Minas Gerais, Brasil, com o rompimento da Barragem de Fundão, da mineradora Samarco (LACAZ; PORTO; PINHEIRO 2017; CARMO *et al.*, 2017). Estima-se uma perda de mais de 1200 hectares de vegetação em torno dos primeiros quilômetros do rompimento da barragem (SILVA JUNIOR *et al.*, 2018), além disso, o acúmulo de rejeitos provenientes da mineração nas margens de rios e lagos pode provocar assoreamentos, principalmente nos períodos chuvosos (FOULDS *et al.*, 2014). Sendo assim, a recuperação da vegetação das áreas atingidas se mostra urgente e necessária, para reter detritos, auxiliar a fertilidade do solo e restabelecer relações ecológicas que foram perdidas ou impactadas após esse desastre ambiental.

Conforme Barbosa (2000), muitos projetos de recuperação envolvendo reflorestamento com espécies nativas não têm êxito devido à falta de conhecimento biológico das espécies, e seu comportamento no ambiente que será implantado. Andrade *et al.* (2018) sugerem que a correção do solo pode ser útil para o reflorestamento e agricultura, no entanto devido à extensão da área afetada pela lama do rejeito de mineração, técnicas físico-químicas de correção do solo são inviáveis em larga escala, pelo alto custo e grande demanda de tempo (KARACA; CAMESELLE; REDDY, 2018). Diante disso, é importante a investigação de espécies com potencial para revegetar as áreas afetadas, que se desenvolvam no rejeito de mineração sem a necessidade de correção do solo.

Além das características físico-químicas do rejeito de mineração, tamanho das partículas, concentração de elementos químicos e matéria orgânica (SEGURA *et al.*, 2016; ANDRADE *et al.*, 2018), outros fatores ambientais associados como a restrição hídrica, podem ser limitantes ao desenvolvimento e estabelecimento de algumas espécies vegetais. A região afetada pelo rompimento da barragem de Fundão possui um período de estiagem bem definido (ÁLVARES *et al.*, 2013) e as mudanças climáticas recentes podem aumentar os eventos de seca (MARENGO, 2008). Para viabilizar projetos de recuperação ambiental via reflorestamento, no sentido da boa tomada de decisões, deve-se levar em consideração as possíveis limitações impostas pelo ambiente e as características ecofisiológicas das espécies a serem utilizadas.

Copaifera langsdorffii Desf. é conhecida popularmente como copaíba sendo comumente utilizada em plantios em áreas de preservação e ambientes degradados (NUNES *et al.*, 2015; LIMA *et al.*, 2016; CARVALHO *et al.*, 2019). Portanto, esta é uma espécie potencial que pode ser utilizada em plantios de recuperação de áreas impactadas pelo desastre ambiental de Mariana-MG. É uma espécie nativa do Brasil, arbórea, com altura podendo chegar a 30 metros, produz grande quantidade de sementes (PEDRONE; SANCHEZ; SANTOS, 2002), o que auxilia na disseminação e estabelecimento da espécie no campo. Além disso, essa espécie é caracterizada como decídua ou semidecídua (PEDRONE; SANCHEZ; SANTOS, 2002), ou seja, em algumas épocas do ano, fornece boa quantidade de matéria orgânica para o solo.

Ainda não se conhece a fundo o comportamento e mecanismos de respostas de plantas expostas ao rejeito de mineração associado a outros fatores ambientais, como a variação na disponibilidade hídrica. Nesse sentido, esse trabalho pode contribuir com o conhecimento do comportamento de espécies arbóreas em ambientes degradados por rejeito de mineração e suas respostas ecofisiológicas e morfoanatômicas frente a variações no regime hídrico, além de fornecer bases teóricas que podem nortear projetos de recuperação. Diante disso, a hipótese deste trabalho é que *C. langsdorffii* é tolerante ao rejeito de mineração e pode suportar a deficiência hídrica como um fator de estresse secundário. O objetivo desse trabalho foi testar o efeito da restrição hídrica em rejeito de mineração do rompimento da barragem de Fundão em Mariana, no crescimento, desenvolvimento, trocas gasosas e anatomia foliar de *Copaifera langsdorffii* Desf.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As sementes de *C. langsdorffii* foram coletadas na Universidade Federal de Lavras, Lavras, estado de Minas Gerais, Brasil (21°13'42.1"S 44°59'15.9"W), armazenadas em sacos de papel e mantidas em temperatura ambiente até o momento da montagem dos experimentos.

O trabalho foi realizado no Laboratório de Biotecnologia e Genotoxicidade (BIOGEN) da Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL – Alfenas, Minas Gerais, Brasil. Em sala de crescimento com temperatura de 26 ± 3 °C, fotoperíodo de 12 horas e irradiância de $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. O substrato utilizado para a germinação e crescimento das plantas de *C. langsdorffii* foi o rejeito de mineração do rompimento da barragem de Fundão de Mariana. Este rejeito foi coletado à cerca de 4 km do rompimento da barragem. A altura da camada de rejeito no local de coleta era de aproximadamente 1,0 m. Em muitos locais afetados pelo derramamento, o rejeito mineral cobriu uma extensa área e com espessura considerável, limitando ou impossibilitando o contato da vegetação com o solo, atualmente submerso (CARMO *et al.*, 2017; SILVA JUNIOR *et al.*, 2018), diante disso, nesse experimento optou-se por utilizar como substrato, apenas esse rejeito, da maneira como se encontra no local, sem adicionar ou comparar com outros substratos, tendo em vista a importância de se investigar plantas que podem se desenvolver nas áreas impactadas apesar da limitação do contato com o solo.

O rejeito de mineração foi peneirado em malha de 2,6 mm e 400 ml foi utilizado, correspondente a 650 g desse rejeito, em frascos de polipropileno com capacidade para 500 ml. Foi colocada uma semente previamente embebida diretamente em água destilada em cada frasco à 1 cm de profundidade e feita irrigação diária à capacidade de campo. A capacidade de campo do substrato foi determinada pelo método gravimétrico (SOUZA *et al.*, 2000), durante o experimento, a água perdida pela evapotranspiração, foi repostada diariamente, a quantidade de água necessária foi aferida pela diferença de massa de cada recipiente utilizando balança de precisão modelo Q-510-1500 (QUIMIS, Diadema, SP, Brasil). Após à emergência as plantas foram separadas em duas condições: capacidade de campo e 50% da capacidade de campo. Utilizou-se 15 repetições de uma planta mantidas nos dois tratamentos (n= 30) e nas condições descritas da sala de crescimento durante 60 dias.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO

Amostras do rejeito de mineração foram enviadas ao Laboratório de Análise de solos da Universidade Federal de Lavras, para determinar a presença e estimar as concentrações de alguns dos principais elementos. Micro e macro nutrientes (Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Zn), bem como elementos não essenciais (Al, Cd, Cr, Pb).

Para estimar a granulometria do substrato, uma amostra do rejeito foi peneirada em malha de 1mm, e seca em estufa de ar circulado à 60 °C durante 48h. Posteriormente foram preparadas 10 lâminas para fotomicrografias do material. O rejeito foi espalhado manualmente sobre as lâminas, foi adicionado água glicerizada a 50%, o material foi fechado com lamínulas e selado com esmalte. Foram fotografados três campos por lâmina, em cada campo fotografado foram medidos o diâmetro polar e equatorial de 10 partículas.

2.2 ANÁLISE BIOMÉTRICA

O comprimento da parte aérea das plantas foi medido semanalmente considerando-se o nível do substrato até a gema apical e utilizando uma régua. O número de folhas foi aferido semanalmente por contagem direta.

Após o experimento, as plantas foram retiradas do substrato e as raízes lavadas, o comprimento da maior raiz de cada planta foi medido com régua, as folhas foram fotografadas e a área foliar determinada utilizando o programa de análise de imagens ImageJ. Uma folha de cada planta foi fixada em etanol 70% para análises anatômicas. Além disso, foram determinadas as massas fresca e seca das folhas, do caule e das raízes, com balança analítica de precisão modelo AY220 (MARTE CIENTÍFICA, Santa Rita do Sapucaí, MG, Brasil). Para obtenção das massas secas, o material vegetal foi colocado em estufa com circulação de ar a 60 °C (SOLAB/SL-102, Sorocaba, SP, Brasil) até a obtenção de massa constante.

2.3 ANÁLISES DAS TROCAS GASOSAS FOLIARES

A análise das trocas gasosas foi realizada ao final do experimento, por meio de analisador de trocas gasosas por infravermelho (IRGA), modelo LI-6400XT (LI-COR, Lincoln, Nebraska, EUA) acoplado à câmara de 6,0 cm² com fonte de radiação (LI-6400-02B, Li-Cor, Lincoln, Nebraska, EUA). As análises foram feitas das 8 às 10 h em todas as plantas,

na primeira folha completamente expandida no sentido do ápice para o base, em dois folíolos do terço superior da folha. Foi determinado o valor da densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos de $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ na câmara do equipamento em função de uma curva de resposta à luz. Foram analisadas a taxa fotossintética (A), transpiração (E) e condutância estomática (gs).

A fotossíntese e transpiração total das plantas foram calculadas com a multiplicação dos valores de área foliar e taxa fotossintética, bem como de área foliar e taxa de transpiração respectivamente.

2.4 TEOR RELATIVO DE CLOROFILA

O teor relativo de clorofila foi estimado ao final do experimento com equipamento clorofilômetro SPAD 502-Plus (KONICA MINOLTA, Osaka, Japão). Foram feitas medições no terço inferior, médio e superior dos folíolos, na primeira folha completamente expandida no sentido da base para ápice. A quantidade de clorofila foi expressa em unidades SPAD.

2.5 POTENCIAL HÍDRICO FOLIAR E TEOR DE ÁGUA NAS PLANTAS

O potencial hídrico foliar (Ψ_w) foi determinado ao final do experimento com uma bomba de pressão modelo 3115 (SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP., Santa Barbara, EUA), as medições foram realizadas das 6 às 8 h em uma folha de cada planta. O teor de água nas plantas foi determinado pela diferença entre as massas fresca e seca.

2.6 CARACTERÍSTICAS ESTOMÁTICAS E ANATOMIA FOLIAR

Para as análises estomáticas foram retiradas amostras de folíolos das folhas fixadas em etanol 70% e realizado impressões paradérmicas com resina de cianoacrilato na parte abaxial dos folíolos. Foi confeccionada uma lâmina para cada repetição e foram realizadas fotomicrografias de quatro campos para cada lâmina. As fotomicrografias foram registradas utilizando câmera digital Canon powershot G10 (CANON, Tóquio, Japão) acoplada ao

microscópio óptico (ZEISS AXIO SCOPE.A1, Oberkochen, Alemanha). As características estomáticas foram analisadas utilizando-se o programa de análise de imagem ImageJ. As características analisadas foram: comprimento, largura, razão comprimento/largura e densidade dos estômatos.

Os cortes transversais foram realizados na região mediana do folíolo, foram feitos a mão livre com auxílio de lâminas de aço, utilizando um folíolo por replica. As secções foram clarificadas em solução a 50% de hipoclorito de sódio, posteriormente lavadas em água destilada e submetidas ao processo de coloração com corante safrablau, as lâminas foram montadas em água glicerinada a 50% entre lâmina e lamínulas e seladas com esmalte. Com as lâminas histológicas prontas, as secções foram fotografadas utilizando câmera digital Canon powershot G10 (CANON, Tóquio, Japão) acoplada ao microscópio óptico (ZEISS AXIO SCOPE.A1, Oberkochen, Alemanha). Foram analisadas três regiões para cada réplica, a região intervenal, a nervura mediana e região intervenal com canal secretor presente. Para cada região foi analisado quatro campos, foi feita a média aritmética dos dados para representar uma réplica. As características analisadas com o programa ImageJ foram: Diâmetros das epidermes abaxial e adaxial, dos parênquimas paliçádico e lacunoso, áreas interna e externa dos feixes vasculares, áreas do xilema e floema, diâmetro dos elementos de vaso e área interna e externa do canal secretor.

2.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram submetidos ao teste de variância (ANAVA) e as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância utilizando o programa de estatística SISVAR (FERREIRA, 2011).

3 RESULTADOS

Os teores dos principais macro e micronutrientes, bem como elementos potencialmente tóxicos estão presentes no rejeito de mineração, as concentrações mais elevadas de metais foram Fe e Al (Tabela 1). O valor médio do tamanho das partículas foi de 1,18724 μm (Tabela 1).

Tabela 1 - Análise dos principais macro e micronutrientes, bem como compostos tóxicos, e tamanho médio das partículas presentes no rejeito de mineração do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG.

Macronutrientes	$\text{mg}_{\text{elemento}} \text{kg}_{\text{resíduo}}^{-1}$ (ppm)
P	663,1
Mg	281,8
K	274,7
Ca	16837,4
Micronutrientes	$\text{mg}_{\text{elemento}} \text{kg}_{\text{resíduo}}^{-1}$ (ppm)
Mn	472,7
Fe	37873,0
Zn	24,7
Cu	5,8
Na	174,6
Tóxicos	$\text{mg}_{\text{elemento}} \text{kg}_{\text{resíduo}}^{-1}$ (ppm)
Al	2971,80
Cr	16,58
Cd	3,53
Pb	13,29
Diâmetro das partículas do rejeito	Micrômetro (μm)
Diâmetro médio	1,187

Fonte: Do autor.

A redução na disponibilidade hídrica não promoveu modificações na massa fresca das folhas e caule, contudo, com este fator, a massa fresca total e a massa fresca das raízes de *C. langsdorffii* foram maiores. Além disso, a maior disponibilidade hídrica promoveu reduções na massa seca das folhas e raízes e massa seca total apesar da massa seca do caule não ter apresentado diferenças significativas (Tabela 2). A restrição hídrica promoveu modificações na alocação da biomassa das plantas de *C. langsdorffii*, aumentando o investimento em raízes e reduzindo em contrapartida a alocação em folhas e caule (Tabela 2). Além disso, com o tratamento com 50% da capacidade de campo o comprimento da maior raiz, número de folhas e área foliar foi maior, mas a área foliar específica não apresentou diferenças significativas (Tabela 2). Interessantemente, a restrição hídrica não modificou o potencial hídrico foliar e teor de água em *C. langsdorffii* (Figura 1).

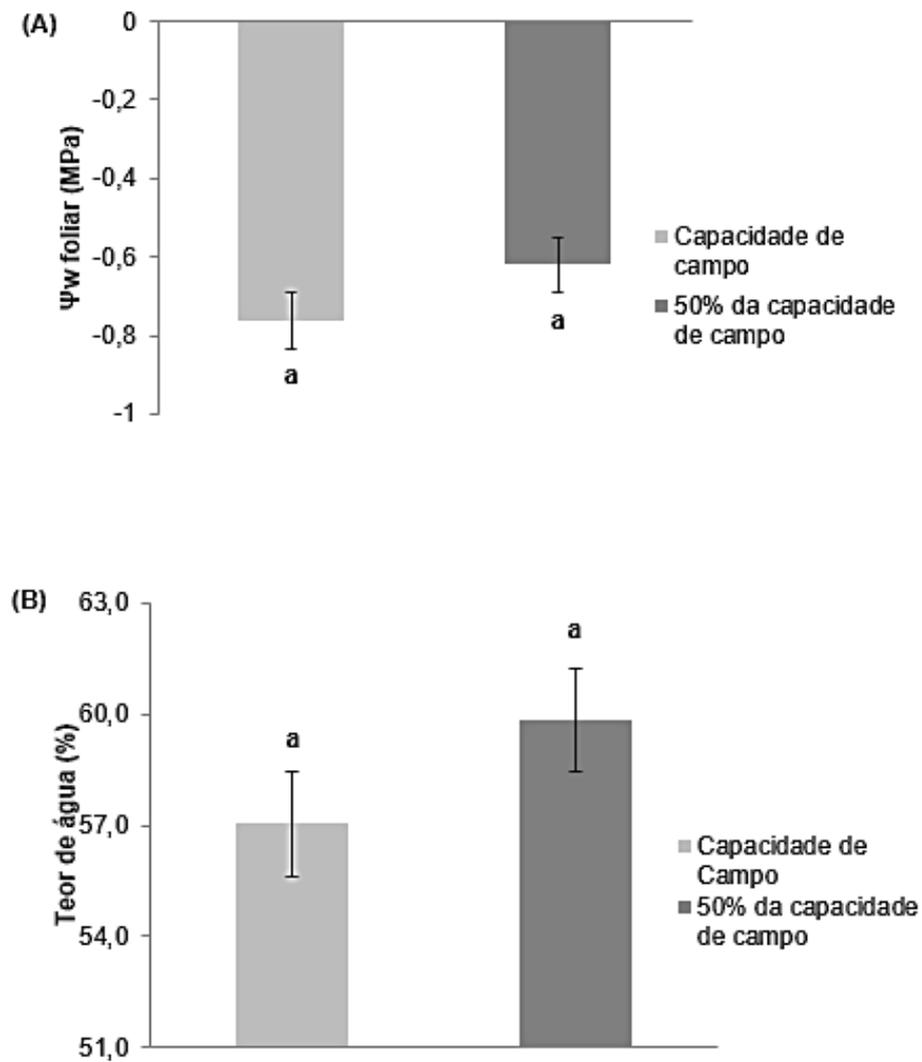
Tabela 2 - Crescimento de *Copaifera langsdorffii* cultivada em rejeito de mineração do rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Brasil, em duas condições de disponibilidade hídrica.

Variáveis	Capacidade de campo	50% da capacidade de campo
Massa fresca do caule (g)	0,45 ± 0,12 a	0,47 ± 0,22 a
Massa fresca das folhas (g)	0,49 ± 0,15 a	0,53 ± 0,20 a
Massa fresca das raízes (g)	0,48 ± 0,23 b	1,93 ± 0,84 a
Massa fresca total (g)	1,40 ± 0,51 b	3,07 ± 1,31 a
Massa seca do caule (g)	0,20 ± 0,06 a	0,19 ± 0,10 a
Massa seca das folhas (g)	0,21 ± 0,09 b	0,31 ± 0,15 a
Massa seca das raízes (g)	0,19 ± 0,10 b	0,73 ± 0,37 a
Massa seca total (g)	0,61 ± 0,25 b	1,24 ± 0,58 a
Alocação de massa seca no caule (%)	36,06 ± 8,21 a	15,42 ± 1,86 b
Alocação de massa seca nas folhas (%)	33,62 ± 6,72 a	25,93 ± 8,65 b
Alocação de massa seca nas raízes (%)	30,30 ± 8,23 b	58,64 ± 8,65 a
Crescimento do caule (%)	52,78 ± 20,9 b	74,38 ± 12,46 a
Comprimento da maior raiz (cm)	6 ± 2,9 b	15,9 ± 3,7 a
Número de Folhas	3,6 ± 1,05 b	5,26 ± 1,22 a
Área Foliar (cm ² planta ⁻¹)	46,22 ± 16,29 b	71,55 ± 26,27 a
Área Foliar Específica (cm ² g ⁻¹)	237,63 ± 54,58 a	250,62 ± 64,56 a

Fonte: Do autor.

Nota: Os dados são apresentados como a média ± o desvio padrão. As médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0.05$).

Figura 1 - (A) Potencial hídrico (Ψ_w) e (B) teor de água em plantas de *Copaifera langsdorffii*, cultivada em rejeito de mineração do rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Brasil, em duas condições de disponibilidade hídrica.



Fonte: Do autor.

Nota: Os dados são apresentados como a média \pm o erro padrão. As médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0.05$).

A restrição hídrica aumentou a taxa fotossintética, a condutância estomática, transpiração e teor de clorofila também apresentaram maiores médias (Tabela 3).

Tabela 3 - Trocas gasosas e teor de clorofila de *Copaifera langsdorffii*, cultivada em rejeito de mineração do rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Brasil, em duas condições de disponibilidade hídrica.

Variáveis	Capacidade de campo	50% da capacidade de campo
Fotossíntese ($\mu\text{mol}_{\text{CO}_2} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	0,63 \pm 0,80 b	2,77 \pm 1,29 a
Condutancia Estomática ($\mu\text{mol}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	0,007 \pm 0,003 b	0,018 \pm 0,007 a
Transpiração ($\text{mmol}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	0,25 \pm 0,13 b	0,63 \pm 0,23 a
Fotossíntese total ($\text{nmol}_{\text{CO}_2} \text{ s}^{-1}$)	1,89 \pm 1,35 b	17,83 \pm 6,89 a
Transpiração total ($\mu\text{mol}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ s}^{-1}$)	1,09 \pm 0,47 b	4,67 \pm 2,82 a
Clorofila (Unidades SPAD)	34,5 \pm 5,34 b	43,19 \pm 6,07 a

Fonte: Do autor.

Nota: Os dados são apresentados como a média \pm o desvio padrão. As médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0.05$).

A restrição hídrica aumentou a razão entre os diâmetros polar/equatorial e reduziu o tamanho dos estômatos de *C. langsdorffii*, contudo, não promoveu efeito na densidade estomática (Tabela 4).

Tabela 4 - Características estomáticas de *Copaifera langsdorffii* cultivada em rejeito de mineração do rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Brasil, em duas condições de disponibilidade hídrica.

Variáveis	Capacidade de campo	50% da capacidade de campo
Comprimento dos estômatos (μm)	17,64 \pm 1,22 a	16,26 \pm 1,42 b
Largura dos estômatos (μm)	10,52 \pm 0,81 a	9,32 \pm 0,89 b
Razão comprimento/largura	1,68 \pm 0,11 b	1,75 \pm 0,17 a
Densidade estomática (estômatos mm^{-2})	174,13 \pm 31,92 a	171,28 \pm 22,25 a

Fonte: Do autor.

Nota: Os dados são apresentados como a média \pm o desvio padrão. As médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0.05$).

O feixe vascular bem como os tecidos vasculares em ambos os tratamentos mantiveram aproximadamente a mesma estrutura em tamanho (Figura 2). Houve uma pequena redução no diâmetro do elemento de vaso da epiderme abaxial e do parênquima paliçádico nas plantas em 100% da capacidade de campo (Tabela 5). As estruturas dos canais secretores não tiveram diferença significativa entre os tratamentos (Tabela 5).

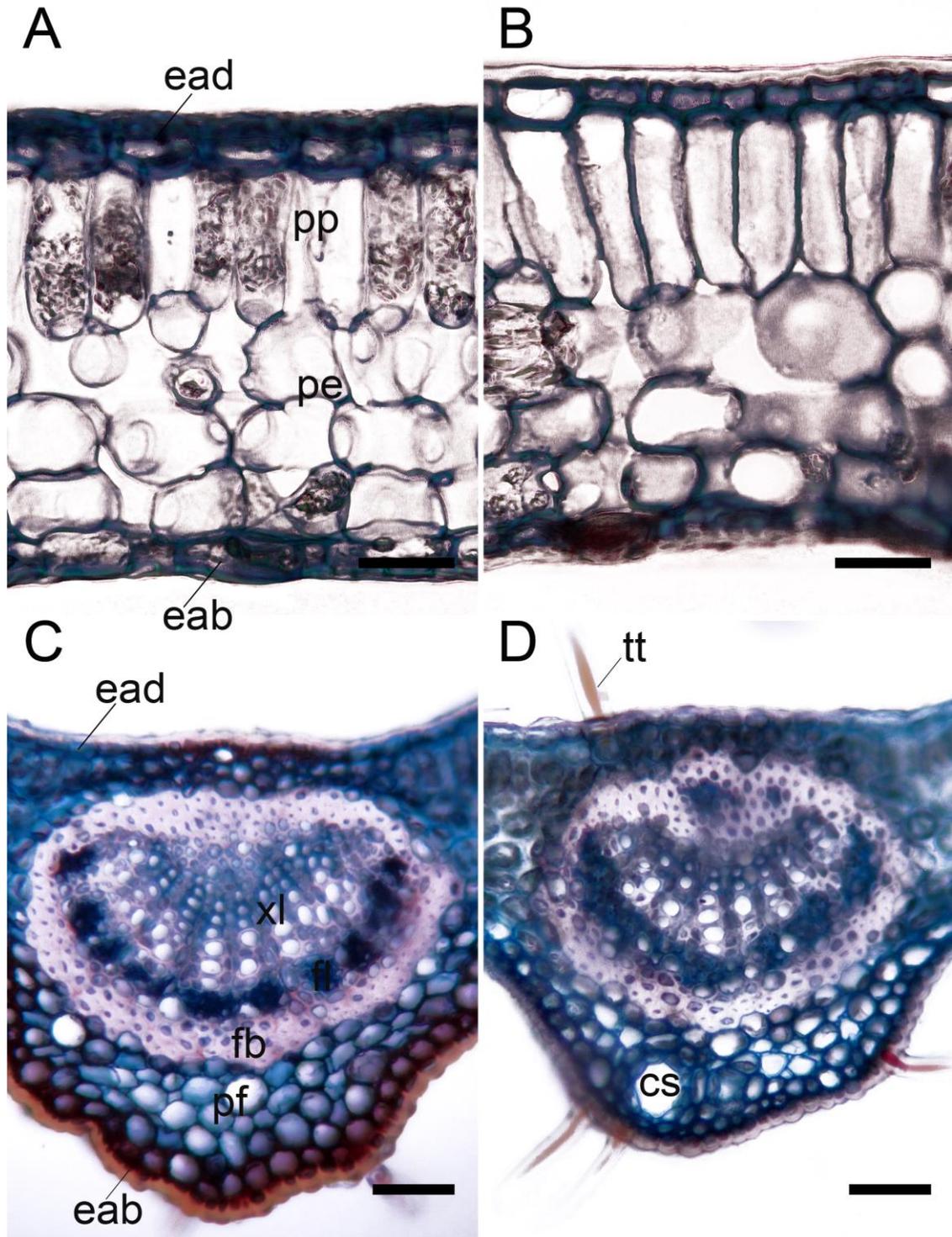
Tabela 5 - Características anatômicas foliares de *Copaifera langsdorffii* cultivada em rejeito de mineração do rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Brasil em duas condições hídricas.

Variáveis	Capacidade de campo	50% da capacidade de campo
Área do Floema (μm^2)	6129,95 \pm 1504,40 ^a	6303,01 \pm 2139,22 ^a
Área do Xilema (μm^2)	10657,59 \pm 2524,91 ^a	10836,34 \pm 3399,16 ^a
Área de fibras (μm^2)	15869,24 \pm 2209,62 ^a	16673,90 \pm 2537,11 ^a
Floema (%)	35,60 \pm 4,70 ^a	35,33 \pm 5,22 ^a
Xilema (%)	61,59 \pm 4,45 ^a	60,67 \pm 4,36 ^a
Fibras (%)	48,28 \pm 4,11 ^a	49,16 \pm 5,68 ^a
Diâmetro do elementos de vaso (μm)	9,75 \pm 0,82 ^b	10,23 \pm 0,98 ^a
Espessura da epiderme adaxial (μm)	14,76 \pm 1,55 ^a	14,64 \pm 1,53 ^a
Espessura da epiderme abaxial (μm)	12,84 \pm 1,52 ^b	13,18 \pm 1,53 ^a
Parênquima paliçádico (PP) (μm)	41,37 \pm 6,02 ^b	42,77 \pm 5,43 ^a
Parênquima esponjoso (PE) (μm)	61,28 \pm 7,69 ^a	62,16 \pm 6,62 ^a
Razão PP/PE	0,68 \pm 0,12 ^a	0,69 \pm 0,10 ^a
Espessura foliar(μm)	130,23 \pm 10,50 ^b	132,75 \pm 10,30 ^a
Área do epitélio canal secretor (μm^2)	1526,99 \pm 565,24 ^a	1517,14 \pm 449,22 ^a
Lúmen do canal secretor (%)	70,21 \pm 4,18 ^a	69,91 \pm 4,12 ^a
Epitélio do canal secretor (%)	29,79 \pm 4,18 ^a	30,09 \pm 4,12 ^a

Fonte: Do autor.

Nota: Os dados são mostrados como média \pm desvio padrão. As médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott para $p < 0,05$.

Figura 2 - Secções transversais dos folíolos de *C. langsdorffii* cultivada em rejeito de mineração de Mariana-MG em duas condições de disponibilidade hídrica.



Fonte: Do autor.

Legenda: A e C = 100% da capacidade de campo; B e D = 50% da capacidade de campo. A e B = região intervenal; C e D = nervura mediana. ead = epiderme da face adaxial; eab = epiderme da face abaxial; pp = parênquima paliádico; pe = parênquima esponjoso; fb = fibras; xl = xilema; fl = floema; cs= cavidade secretora; tt = tricoma; pf = parênquima fundamental. Barras = 25 μm (A e B);50 μm (C e D).

4 DISCUSSÃO

Na análise do rejeito de mineração foi detectado a presença dos principais micro e macronutrientes que podem ser utilizados pelas plantas. Também estão presentes elementos potencialmente tóxicos. As concentrações de Cu, Cr, Pb e Zn não ultrapassaram os valores de prevenção preconizados pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente do Brasil (CONAMA, 2009). Conforme Reis *et al.* (2017) a variação no regime de chuva pode alterar as concentrações de metais no ambiente. Os metais encontrados em maior quantidade foram o Fe e Al, esta tendência também foi encontrada em análises de solo da mesma região o que reflete características litológicas locais (ANDRADE *et al.*, 2012). As concentrações da maioria dos elementos amostrados no presente trabalho ficaram abaixo dos encontrados nos solos da região (ANDRADE *et al.*, 2012). Esses resultados corroboram o trabalho de Segura *et al.* (2016) que analisaram tanto o rejeito de mineração quanto solo não atingido por esse rejeito. Os autores atribuíram a redução nas concentrações de elementos presentes no rejeito ao processo de produção de uma polpa de minério de ferro, que pode ter removido ou diminuído as concentrações de alguns elementos.

Não houve mortalidade de plantas durante o experimento, o que indica que *C. langsdorffii* é tolerante às condições impostas pelo rejeito de mineração. Outro atributo do substrato que deve ser destacado é a sua granulometria, a menor partícula de solo na natureza é considerada argila com tamanho de $\leq 2 \mu\text{m}$ e o tamanho médio das partículas do rejeito mineral foi de $1,18 \mu\text{m}$. Quando as partículas de solo são reduzidas, menos espaços se tem entre as partículas o que acaba reduzindo sua porosidade. Solos com textura mais fina possuem alta capacidade de retenção de água (BEUTLER *et al.*, 2002). Além disso, como as partículas desse rejeito foram muito pequenas a capacidade de aeração do substrato pode ter sido prejudicada e essa limitação intensificada no tratamento em 100% da capacidade de campo.

Diversas espécies vegetais cultivadas sob restrição hídrica apresentam limitações no crescimento e desenvolvimento (MARTINEZ *et al.*, 2013; RAHMATI *et al.*, 2015; PADILHA *et al.*, 2016). Contudo, *C. langsdorffii* sob menor disponibilidade hídrica na lama de rejeito de mineração não apresentou tais limitações, ao contrário, como indicam os dados de crescimento e trocas gasosas, a condição de 50% da capacidade de campo foi melhor para estas plantas quando cultivadas no rejeito de mineração.

A maior alocação de biomassa para a parte radicular em *C. langsdorffii* sob restrição hídrica, possibilitou um aumento da superfície de absorção de água e nutrientes, com isso, mesmo com aporte menor de água no substrato, as plantas mantiveram o teor de água e potencial hídrico semelhante às plantas sob capacidade de campo. Estudos demonstram que plantas sob restrição hídrica para 50% da capacidade de campo do substrato apresentam redução do potencial hídrico (CRUZ *et al.*, 2019). Contudo, a espécie arbórea *Schinus molle* L. exibiu maiores potenciais hídricos em solos com menor aporte de água na estação seca (EWE; STENBERG, 2002), e os autores atribuem este fator ao alagamento das raízes na estação chuvosa. Efeito semelhante pode ter ocorrido em *C. langsdorffii* em função das partículas do rejeito de mineração serem muito pequenas e o substrato apresentar poucos poros, portanto, no tratamento com mais água (capacidade de campo) pode ter ocorrido redução na difusão de gases e alagamento do sistema radicular. Este resultado é importante uma vez que, como o rejeito de mineração recobre totalmente enormes áreas sujeitas à uma estação seca do ano, isso pode ser favorável ao reflorestamento.

A diminuição no tamanho dos estômatos é um mecanismo para diminuir a perda de água em ambientes com disponibilidade hídrica reduzida (MELO *et al.*, 2007). Em 50% da capacidade de campo, as plantas apresentaram redução na dimensão dos estômatos, entretanto, mantiveram a densidade estomática, essas modificações contribuíram para equilíbrio das trocas gasosas, uma vez que a captação de CO₂ necessário à fotossíntese não foi comprometido. Na verdade, nas plantas cultivadas em 50% da capacidade de campo, a taxa fotossintética foi mais de quatro vezes maior. Além disso, o número de folhas, área foliar e teor de clorofila também foram maiores nas plantas sob 50% da capacidade de campo, portanto, *C. langsdorffii* apresentou maior superfície e taxa fotossintéticas e a junção desses fatores pode ter resultado em um maior crescimento. Observando os dados, percebe-se que o rejeito de mineração não apresenta limitações severas para *C. langsdorffii*, que se desenvolve normalmente e apresentou taxas fotossintéticas normais, além disso, a restrição da disponibilidade de água no rejeito de mineração não causa estresse hídrico, pelo contrário, o maior aporte de água no rejeito foi mais limitante as plantas do que a redução na disponibilidade hídrica. Isso indica que *C. langsdorffii* se desenvolve bem nessa condição e pode ser destinada ao reflorestamento de áreas que possuem períodos de estiagem.

Um dos fatores do declínio da taxa fotossintética nas plantas em 100% da capacidade de campo pode estar relacionada à diminuição da condutância estomática, que causa redução da difusão de CO₂ para o interior das folhas. A redução na transpiração e trocas gasosas nesse

tratamento sugere fechamento estomático, resultado de um possível estresse pelo alto teor de água no substrato (RODRÍGUEZ-GAMIR *et al.*, 2011). Um estudo constatou que *C. langsdorffii* cultivada em 100% da capacidade de campo apresentou atividade elevada de enzimas antioxidantes indicando que essa condição hídrica é estressante para as plantas (ROSA *et al.*, 2017). Além disso, o fechamento estomático é uma resposta comum em plantas sob alagamento (BLANKE; COOKE, 2004; SIBBERNSEN; MOTT, 2010).

O percentual dos tecidos vasculares entre os tratamentos praticamente não mudou, o que demonstra que durante a ontogênese não teve nenhum mecanismo que estimulou o investimento maior em um tipo de tecido vascular do que outro em ambos os tratamentos. Houve uma pequena redução no diâmetro dos elementos de vaso nas plantas em 100% da capacidade de campo, essa redução pode ser encontrada em espécies submetidas ao alagamento (MEDRI *et al.*, 2011).

As características do canal secretor não apresentaram diferenças entre os tratamentos, o que reforça a capacidade da espécie em ajustar a estrutura foliar para manter sua funcionalidade. As plantas em 100% da capacidade de campo ajustaram a estrutura foliar para tentar manter a funcionalidade dos tecidos e capacidade fotossintética. A pequena redução de parênquima paliçádico não indica dano severo na estrutura foliar, além disso, a redução nessa proporção, cerca de 3%, não evidencia sintoma de estresse na estrutura anatômica, também não explica a diminuição expressiva nas taxas fotossintéticas. Isso indica que *C. langsdorffii* possui plasticidade anatômica para sobreviver no rejeito de mineração em 100% da capacidade de campo, porém, com prejuízos em seu desenvolvimento.

Com a queda nas taxas de fotossíntese por unidade foliar, as plantas tiveram menos recurso para investir na construção de folhas maiores e mais espessas. Desse modo, conforme realizado no trabalho de Cruz *et al.* (2019), considerando a área foliar total, foi calculado a fotossíntese total das plantas, o que evidenciou que com a redução da área foliar, a fotossíntese total nas plantas em 100% da capacidade de campo foi nove vezes menor do que nas plantas em déficit hídrico. A redução da área foliar é uma resposta de algumas espécies quando submetidas ao alagamento do substrato (LUQUEZ; ACHINELLI; CORTIZO, 2012; MARTINEZ; MOURÃO; BRIENZA JUNIOR, 2011). Mesmo com *C. langsdorffii* demonstrando um ajuste anatômico para não reduzir expressivamente os tecidos clorofilianos, o principal fator que influenciou negativamente a capacidade fotossintética foi a redução na área foliar.

Diante disso, esses resultados sinalizam que em longo prazo as diferenças no crescimento e desenvolvimento tendem a se acentuar entre os tratamentos, e reforçam que a diminuição na disponibilidade hídrica em função de uma estação seca característica do ambiente, pode favorecer o reflorestamento das áreas impactadas pelo rejeito de mineração, já que *C. langsdorffii* se desenvolve bem nessas condições e pode tolerar períodos chuvosos.

5 CONCLUSÃO

Copaifera langsdorffii é tolerante ao rejeito de mineração do desastre da Barragem de Fundão em Mariana-MG. O rejeito de mineração não causa prejuízos nas relações hídricas, fotossintéticas e de crescimento sob déficit hídrico.

A redução da disponibilidade hídrica para até 50% da capacidade de campo no rejeito de mineração favorece o crescimento e desenvolvimento de *C. langsdorffii*. O aporte hídrico em 100% da capacidade de campo em rejeito de mineração permite a sobrevivência das plantas ao menos por 60 dias, contudo, as trocas gasosas, o crescimento e o desenvolvimento são reduzidos. Maiores disponibilidades de água podem causar estresse em plantas por promover o alagamento do sistema radicular.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDRADE, G. F. *et al.* Agricultural use of Samarco's spilled mud assessed by rice cultivation: A promising residue use? **Chemosphere**, v. 193, p. 892-902, 2018.
- ANDRADE, L. N.; LEITE, M. G. P.; BACELLAR, L. A. P. Composição mineralógica e geoquímica dos solos do parque estadual do Itacolomi - Ouro Preto/MG **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 3, p. 1-8, 2012.
- BARBOSA, L.M. Considerações Gerais e Modelos de Recuperação de Formações Ciliares. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO, H.F. (Eds.). **Matas Ciliares: Conservação e Recuperação**. São Paulo: EDUSP, FAPESP, p. 289-312, 2000.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I. & ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de Latossolo sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.26, p. 829-834, 2002.
- BLANKE, M. M.; COOKE, D. T. Effects of flooding and drought on stomatal activity, transpiration, photosynthesis, water potential and water channel activity in strawberry stolons and leaves. **Plant Growth Regulation**, v. 42, n. 2, p.153–160, 2004.
- CARMO, F. F. *et al.* Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 15, ed. 3, p. 145-151, 2017.
- CARVALHO, T. F. *et al.* Restoration Strategies in an Area Invaded by *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn. **Floresta Ambiente**, Seropédica, v. 26, n. 2, 2019.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, nº 249, 2009, p. 81–84.
- CRUZ, Y. C. *et al.* Growth of *Typha domingensis* as related to leaf physiological and anatomical modifications under drought conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, 41:64, p. 1-9, 2019.
- EWE, S. M. L.; STERNBERG, L. S. L. Seasonal water-use by the invasive exotic, *Schinus terebinthifolius*, in native and disturbed communities. **Oecologia**, v. 133, p. 441–448, 2002.
- FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, p.1039-1042, 2011.

- FOULDS, S. A. *et al.* Flood-related contamination in catchments affected by historical metal mining: An unexpected and emerging hazard of climate change. **Science of The Total Environment**, v. 476–477, p. 165-180, 2014.
- KARACA, O.; CAMESELLE, C.; REDDY K. R. Mine tailing disposal sites: contamination problems, remedial options and phytocaps for sustainable remediation. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v.17, ed. 1, p. 205–228, 2018.
- LACAZ, F. A. C.; PORTO, M. F. S.; PINHEIRO, T. M. M. Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão/Samarco. **Revista brasileira de saúde ocupacional**, São Paulo, v. 42, ed. 9, 2017.
- LIMA, P. A. F. *et al.* Crescimento de mudas de espécies nativas na restauração ecológica de natas ripárias. **Neotropical Biology and Conservation**, v. 11, p. 72-79, 2016.
- LUQUEZ, V. M. C.; ACHINELLI, F.; CORTIZO, S. Evaluation of flooding tolerance in cuttings of *Populus clones* used for forestation at the Paraná River Delta, Argentina. **Southern Forests** 74: 61-70, 2012.
- MARENGO, J. A. Water and climate change. **Estudos avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 83-96, 2008.
- MARTINEZ, C.F. *et al.* Response to water deficit on tree growth from urban forestry of Mendoza city: Comparative analysis in sapling trees. **Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo**, Mendoza, v. 45, n. 2, p. 47-64, 2013.
- MARTINEZ, G. B.; MOURÃO, M.; BRIENZA JUNIOR, S. Respostas morfofisiológicas de plantas de açacu (*Hura crepitans* L.) provenientes de várzeas do rio Amazonas: efeito da anoxia do solo. **Revista Árvore**, v. 35, p. 1155-1164, 2011.
- MEDRI, C. *et al.* Morfoanatomia de órgãos vegetativos de plantas juvenis de *Aegiphila sellowiana* Cham. (Lamiaceae) submetidas ao alagamento do substrato. **Acta Botanica Brasilica**, Feira de Santana, v. 25, n. 2, p. 445-454, 2011.
- MELO, H.C. *et al.* Alterações anatômicas e fisiológicas em *Setaria anceps* Stapf ex Massey e *Paspalum paniculatum* L. sob condições de déficit hídrico. **Hoehnea**, v.34, p.145-153, 2007.
- NUNES, Y. R. F. *et al.* Sobrevivência e crescimento de sete espécies arbóreas nativas em uma área degradada de floresta estacional decidual, norte de minas gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 39, n. 5, p. 801-810, 2015.
- PADILHA, N. S. *et al.* Crescimento inicial do pinhão-manso submetido a diferentes regimes hídricos em latossolo vermelho distrófico. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 513-521, June 2016.
- PEDRONI, F., SANCHEZ, M. & SANTOS, F.A.M. Fenologia da copaíba (*Copaifera langsdorffii* Desf. – Leguminosae, Caesalpinoideae) em uma floresta semidecídua no sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Botânica** 25:183-194, 2002

RAHMATI, M. *et al.* Peach Water Relations, Gas Exchange, Growth and Shoot Mortality under Water Deficit in Semi-Arid Weather Conditions. **PLoS ONE**, v. 10, n. 4, p. 1-19, 2015.

REIS, D.A. *et al.* Influence of environmental and anthropogenic factors at the bottom sediments in a Doce River tributary in Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 7456-7467, 2017.

RICO M. *et al.* Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context. **Journal of Hazardous Materials**, v. 152, ed. 2, p. 846-852, 2008.

RODRÍGUEZ-GAMIR, J. *et al.* Root signalling and modulation of stomatal closure in flooded citrus seedlings. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 49, p. 636-645, 2011.

ROSA, DEREK B.C.J. *et al.* Gas exchange and antioxidant activity in seedlings of *Copaifera langsdorffii* Desf. under different water conditions. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 89, n. 4, p. 3039-3050, Dec. 2017.

SEGURA, F. R. *et al.* Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). **Environmental Pollution**, v. 218, p. 813-825, 2016.

SIBBERNSEN, E.; MOTT K. A. stomatal responses to flooding of the intercellular air spaces suggest a vapor-phase signal between the mesophyll and the guard cells. **Plant Physiology**, v. 153, p. 1435–1442, 2010.

SILVA JUNIOR, C. A. *et al.* Analysis of the impact on vegetation caused by abrupt deforestation via orbital sensor in the environmental disaster of Mariana, Brazil. **Land Use Policy**, v. 76, p. 10-20, 2018.

SOUZA, C. C. *et al.* Avaliação de métodos de determinação de água disponível e manejo da irrigação em terra roxa sob cultivo de algodoeiro herbáceo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.3, p.338-342, 2000.