

PATRÍCIA MENEZES COSTA MACIEL

**EFEITO TÓXICO DO SULFATO DE NÍQUEL EM PLÂNTULAS DE *Cereus jamacaru*
DC (CACTACEAE)**

SERRA TALHADA,

2020



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
UNIDADE ACADÊMICA DE SERRA TALHADA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE E CONSERVAÇÃO

**EFEITO TÓXICO DO SULFATO DE NÍQUEL EM PLÂNTULAS DE *Cereus jamacaru*
DC (CACTACEAE)**

PATRÍCIA MENEZES COSTA MACIEL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação da Universidade Federal Rural de Pernambuco como exigência para obtenção do título de Mestre.

Linha de pesquisa: Ecologia, Conservação e uso da Biodiversidade de Ambientes Terrestres

Prof.(a) Dr.(a) Rogério De Aquino Saraiva
Orientador

Prof.(a) Dr.(a) André Luiz Alves De Lima
Co-orientador

SERRA TALHADA,

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C837e MENEZES COSTA MACIEL, PATRÍCIA
EFEITO TÓXICO DO SULFATO DE NÍQUEL EM PLÂNTULAS DE *Cereus jamacaru* DC
(CACTACEAE) / PATRÍCIA MENEZES COSTA MACIEL. - 2020.
70 f.

Orientador: ROGERIO DE AQUINO SARAIVA.

Coorientador: ANDRE LUIZ

ALVES DE LIMA. Inclui
referências, apêndice(s) e
anexo(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em
Biodiversidade e Conservação, Serra Talhada, 2020.

1. Elementos tóxicos. 2. mandacaru. 3. metais pesados. 4. níquel. 5. toxicidade. I.
SARAIVA, ROGERIO DE AQUINO, orient. II. LIMA, ANDRE LUIZ ALVES DE, coorient. III.
Título

CDD 338.95

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
UNIDADE ACADÊMICA DE SERRA TALHADA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE E CONSERVAÇÃO

**EFEITO TÓXICO DO SULFATO DE NÍQUEL EM PLÂNTULAS DE *Cereus jamacaru*
DC (CACTACEAE)**

PATRÍCIA MENEZES COSTA MACIEL

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de mestre em Biodiversidade e Conservação. Defendida e aprovada em 17/02/2020 pela seguinte Banca Examinadora.

Prof^(a). Dr^(a) Rogério de Aquino Saraiva - Orientador
[UAST/UFRPE]

Prof^(a). Dr^(a). Kelem da Silva Fonseca – Membro Externo
[UAST/UFRPE]

Prof^(a). Dr^(a). Katya Maria Oliveira de Sousa – Suplente Externo
[UAST/UFRPE]

"É dever de todos proteger e conservar o maior patrimônio nacional, pois a nação que destrói o seu solo destrói a si mesma."

- Franklin Delano Roosevelt

Dedicatória

Dedico este trabalho à meus pais (Marluce e Francisco), a minha irmãzinha (Karol) e a meu marido (Leonaldo Júnior). Eles são minha base. São meu tudo.

Agradecimentos

Agradeço,

Primeiramente a Deus. Por me dar toda a força e coragem para buscar novas conquistas, por estar sempre ao meu lado, me ajudando e guiando por um caminho sempre de luz. Obrigada Jeová.

A minha família, Francisco (pai), Marluce (mãe), Karol (irmã) e Júnior (marido), por estarem sempre comigo nos momentos felizes, mas também nos momentos tristes e por sempre me ajudar a levantar quando caí. Amo vocês.

A Rogério Saraiva, pela tutoria e por todo conhecimento repassado de forma incrível.

A minhas amigas, Cidinha e Ranieli. Vocês são pessoas tão maravilhosas e todos os dias agradeço por ter vocês em minha vida.

A Paulo Henrique, por toda a ajuda, dicas, força para continuar nesta jornada e pela amizade que perdura mesmo estando distante.

Aos membros do Grupo de Estudos em Bioquímica e Ecotoxicologia: Robson, Yuri, Luana, Maraiza, Lisandra, Maria da Saúde, Jaqueline e em especial Janaina Renata, pela ajuda, pela amizade, por ser uma pessoa incrível e guerreira que faz tudo e mais um pouco em busca de uma vida melhor para si e seu filho lindo (Álex). Obrigada flor de Urucum (apelido interno ente nós) por me ensinar que tudo é possível quando se batalha.

Aos meus colegas de mestrado, Jeff, Keyla, Geane e Thamyres, Turma de 2018.1 maravilhosa;

A UFRPE/UAST, ao Grupo de Instrumentação e Análises Química pela estrutura e equipamentos cedidos para realização dos experimentos;

Aos Programas de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conversação (PGBC) e em Produção Vegetal (PGPV), ambos da UFRPE/UAST;

A Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela bolsa concedida.

No mais, a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão do presente trabalho, seja no âmbito da Universidade ou fora dela.

Resumo

O níquel (Ni) é um metal de transição interna de ocorrência natural na crosta terrestre e amplamente extraído e utilizado nas indústrias metálicas e de eletrônicos. Ultimamente, tem-se notado um aumento significativo desse elemento tóxico nos ecossistemas devido a ações antropogênicas, tornando-o altamente persistente no ambiente. Embora seja um micronutriente para plantas e microrganismos, o Ni em elevadas concentrações induz efeitos tóxicos nos vegetais. Diante disso, é importante avaliar os efeitos dessa toxicidade em vegetais importantes para manutenção da biodiversidade de sua região, além de seu uso para o homem em diferentes áreas econômicas, como veterinário, médico, alimentício e química. *Cereus jamacaru* é uma cactácea endêmica e nativa da Caatinga e amplamente utilizada nesta região para diversos fins. Neste trabalho, buscou-se avaliar a toxicidade do níquel em diferentes concentrações sobre plântulas de *C. jamacaru*. Foram realizados ensaios de toxicidade com diferentes concentrações (0,0; 0,1; 0,5; 1,0; 5,0 e 10 mM) de sulfato de níquel (NiSO_4), as quais foram aplicadas em sementes de mandacaru semeadas em placas de Petri. Para avaliação do efeito tóxico, foram avaliados a germinação, parâmetros biométricos (comprimento e integridade dos órgãos das plântulas), fisiológicos (clorofilas e carotenóides) e anatômicos. Em todas as concentrações testadas, o Ni se mostrou tóxico para as plântulas, variando entre os parâmetros analisados e acarretando na morte do indivíduo nas concentrações mais altas (5 e 10 mM).

Palavras-chave: Elementos tóxicos, mandacaru, metais pesados, níquel, toxicidade

Abstract

Nickel (Ni) is a naturally occurring internal transition metal in terrestrial areas and widely extracted and used in the metal and electronic industries. Lately, there has been a significant increase in this toxic element in ecosystems due to anthropogenic actions, making it highly persistent in the environment. Although it is a micronutrient for plants and microorganisms, Ni in high concentrations induces toxic effects on plants. Therefore, it is important to evaluate the effects of this toxicity on plants important for maintaining the biodiversity of your region, in addition to its use for man in different economic areas, such as veterinarian, doctor, food and chemistry. *Cereus jamacaru* is an endemic cactus native to the Caatinga and widely used in this region for various purposes. In this work, we sought to evaluate the toxicity of nickel in different concentrations on seedlings of *C. jamacaru*. Toxicity tests were performed with different concentrations (0.0; 0.1; 0.5; 1.0; 5.0 and 10 mM) of nickel sulfate (NiSO₄), which were applied to mandacaru seeds sown in petri dishes. To evaluate the toxic effect, germination, biometric parameters (length and integrity of seedling organs), physiological (chlorophylls and carotenoids) and anatomical parameters were evaluated. In all concentrations tested, Ni proved to be toxic to seedlings, varying between the parameters analyzed and leading to the death of the individual in the highest concentrations (5 and 10 mM).

Keywords: Heavy metals, mandacaru, nickel, toxic elements, toxicity.

Lista de Figuras

Figura 1. Estágios de crescimento de *Cereus jamacaru* analisados durante 150 dias (A até H), apresentando oito estágios e a partir do 90° dia (G) com poucas alterações morfológicas, ocorrendo diferenças apenas no crescimento das plantas. Legenda: hr - eixo hipocótilo-radícula; hp - hipocótilo; rd - radícula; ct-cotilédones; ep - epicótilo; r - raiz. Adaptado de Abud et al. (2013).....24

Artigo Científico

Figura 1. Índices de avaliação de crescimento e desenvolvimento de plântulas de *Cereus jamacaru* DC submetidas a diferentes concentrações de NiSO₄ durante 20 dias. (A) Índice de tolerância (IT) radicular e (B) índice de vigor (IV). Letras iguais não diferem significativamente ($p>0,05$).....63

Figura 2. Morfometria linear (A) da radícula e (B) do cladódio de plântulas de *Cereus jamacaru* DC tratadas com diferentes concentrações de NiSO₄. Cada ponto da curva representa a média $\pm$ E.P.M de seis plântulas de quatro réplicas. Letras iguais não diferem significativamente para $p>0,05$ (ANOVA de uma via seguida do teste de Tukey).....63

Figura 3. Plântulas de *Cereus jamacaru* DC tratadas nas concentrações de NiSO₄ (A) 0,0 mM; (B) 0,1 mM; (C) 0,5 mM; (D) 1,0 mM; (E) 5,0 mM e (F) 10 mM de NiSO₄. As seis plântulas evidenciadas são representativas de 4 réplicas.....64

Figura 4. Características físico-químicas de soluções de NiSO₄. (A) condutividade elétrica e (B) potencial osmótico. Letras iguais não diferem significativamente ($p>0,05$).....64

Figura 5. Teor de pigmentos fotossintéticos em plântulas de *Cereus jamacaru* DC tratadas com diferentes concentrações de NiSO₄. (A) clorofila a, (B) clorofila b, (C) clorofilas totais e (D) carotenóides totais. Cada ponto da curva representa a média $\pm$ E.P.M. de quatro réplicas. Letras iguais não diferem significativamente para $p>0,05$ (ANOVA de uma via seguida do teste de Tukey).....65

Figura 6. Cortes histológicos transversais da radícula e do cladódio de plântulas de *Cereus jamacaru* da amostra controle (A e B) e tratadas com NiSO₄ (C e D). EP – epiderme; CX – córtex; PC – periciclo; XL – xilema; FL – Floema; ST – estômato; PA – parênquima Aquífero. Figuras representativas da amostra geral.....66

Figura 7. Cortes transversais dos cladódios de *C. jamacaru* da amostra controle 0,0 mM (A) e das amostras tratadas com NiSO₄ 0,5 mM (B), 1,0 mM (C) e 5,0 mM (D). O corante utilizado, lugol, marca em preto os grãos de amido, demonstrados pela setinha branca (➤).....67

Figura 8. Cortes transversais dos cladódios de *C. jamacaru* da amostra controle 0,0 mM (A) e da amostra tratada com 5,0 mM (B) de NiSO₄. O corante utilizado, sudan III, marca em vermelho roseado gotículas de lipídeos, demonstrados pela setinha branca (➤), presentes nas paredes das células vegetais.....67

Figura 9. Cortes transversais à mão dos cladódios de *C. jamacaru* da amostra controle 0,0 mM (A) e da amostra tratada com 10 mM (B) de NiSO₄. A solução dimetilglioxima (DMG) reage com o níquel formando um complexo DMG-Ni, corando em vermelho as estruturas celulares que foram expostas ao Ni. EP – epiderme; VB – feixes vasculares.....68

Figura 10. Cortes transversais à mão das raízes de *C. jamacaru* da amostra controle 0,0 mM (A) e da amostra tratada com 10 mM (B) de NiSO₄. A solução dimetilglioxima (DMG) reage com o níquel formando um complexo DMG-Ni, corando de vermelho as células que foram expostas ao Ni. EP – epiderme; VB – feixes vasculares; CX - córtex. As setas (➤) destacam a presença do níquel no simplasto, já as setas brancas (➤) demonstram a preferência do Ni pela via apoplástica.....68

Lista de Tabelas

Tabela 1. Categorias de usos, parte utilizada da planta e utilidades de *Cereus jamacaru* por comunidades rurais. Adaptado de Lucena et al. (2015).....26

Artigo Científico

Tabela 1. Percentual de sementes germinadas (%SG), índice de velocidade de germinação (IVG), índice de tolerância do cladódio (IT_{Cd}) e índice de tolerância da radícula (IT_R) determinados durante a germinação e desenvolvimento inicial de plântulas de *Cereus jamacaru* DC expostas a diferentes concentrações de sulfato de níquel (NiSO₄).....61

Tabela 2. Características físico-químicas: pH, condutividade elétrica (CE) e potencial osmótico (Ψ_o) de diferentes concentrações de NiSO₄.....61

Tabela 3. Efeito do níquel no teor de clorofilas e carotenóides em plântulas de *Cereus jamacaru* DC, cultivadas durante 20 dias.....62

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 TOXICIDADE EM PLANTAS CAUSADA POR ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS	16
2.1.1 Fontes Naturais e não Naturais dos Elementos Tóxicos.....	19
2.1.2 Níquel: generalidades	20
2.2 ASPECTOS BOTÂNICOS DE CACTACEAE	21
2.3 CARACTERÍSTICAS BOTÂNICAS DE <i>CEREUS JAMACARU</i> DC	23
2.4 ETNOBOTÂNICA E BOTÂNICA ECONÔMICA DE <i>CEREUS JAMACARU</i> DC....	24
3. REFERÊNCIAS.....	28
4- ARTIGO CIENTÍFICO	42

1. INTRODUÇÃO

O impacto antropogênico no meio ambiente é uma grande preocupação em todo o mundo, principalmente, ocasionado pelos elementos potencialmente tóxicos (metais pesados) (ZEITOUN E MEHANA, 2014; FRANÇA et al., 2017). Estes elementos possuem fontes variadas, incluindo mineração e fundição de minérios, lodo de esgoto, queima de combustíveis fósseis, fertilizantes, pesticidas, pilhas e baterias (GAUR E ADHOLEYA, 2004). Além disso, a parte mais crítica é a migração desses contaminantes para áreas não contaminadas, elevando as concentrações ambientais de metais como chumbo (Pb), cromo (Cr), arsênico (As), zinco (Zn), cádmio (Cd), cobre (Cu), mercúrio (Hg) e níquel (Ni), através de poeira ou lixiviados pelo solo, contribuindo para a contaminação dos ecossistemas em geral (GAUR E ADHOLEYA, 2004; WUANA E OKIEIMEN, 2011).

Dentre estes metais, o níquel (Ni) é um metal de transição amplamente utilizado em fábricas de ligas metálicas e de equipamentos eletrônicos (NICKEL INSTITUTE, 2006), é um dos metais mais abundantes e compõe cerca de 3% da composição da Terra (ZAMBLE et al., 2017). No começo da década de 1960, o níquel era considerado significativo biologicamente apenas por causa da sua toxicidade. Contudo, passou a ser considerado um micronutriente essencial para os microrganismos e plantas a partir de 1965 (HAUSINGER, 1987). Sua essencialidade foi descoberta, principalmente, devido sua participação na enzima urease, mas o Ni também atua como cofator da glioxalase e glutatona (FABIANO et al., 2015; SHAHZAD et al., 2018). No entanto, o Ni leva a uma série de distúrbios fisiológicos nas plantas quando em altas concentrações, como alterações no comprimento de raízes e parte aérea, germinação e biomassa em plantas de milho (ANSARI et al., 2014), diminui as concentrações de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) e o rendimento em arroz (NAZIR et al., 2015). Além do supracitado, pode ocorrer bioacumulação nas plantas e biomagnificação na teia alimentar, contaminando diversos outros organismos (SHAHID et al., 2017).

Para desintoxicação de seus tecidos, as plantas empregam diferentes estratégias, ajustando ou induzindo mecanismos de adaptação ou tolerância para superar as condições de estresse (THAO et al., 2015). Um dos primeiros mecanismos adotados é a restrição da captação de metais do solo ou exclusão, sequestro e compartimentalização de metais, ligação de metais à parede celular e quelação de íons metálicos, o qual libera várias substâncias (por exemplo, ácidos orgânicos, polissacarídeos, fitoquelatinas) (EMAMVERDIAN et al., 2015). Muitos trabalhos tem pesquisado e realizado diversos estudos para compreender todos os efeitos e alterações nos vegetais, além de métodos para remediação destes elementos

(RAMANA et al., 2014; TAUQEER et al., 2016; OYUELA et al., 2017; SARWAR et al., 2017; SOBARIU et al., 2017).

Cereus jamacaru De Candolle é uma Cactaceae nativa do Semiárido do Brasil, conhecida popularmente como "mandacaru" ou "mandacaru de boi". É um cacto colunar comum, crescendo em solos com baixos níveis de nutrientes e sobrevive com o mínimo de precipitação, sendo bem adaptada às condições semiáridas (BRITTON E ROSE, 1920; CAVALCANTI E RESENDE, 2007; GOMES et al., 2014). Esta espécie possui diversas utilidades para a população, desde o uso como forragem, medicinal, alimentação humana, ornamentação e construção civil, até práticas religiosas e mágicas (ALBUQUERQUE et al., 2007; MESSIAS et al., 2010; LUCENA et al., 2015; SILVA et al., 2019). Além disso, recentemente vem sendo mostrado em alguns trabalhos sua potencial utilização como bioissorvente de contaminantes ambientais (MICHELON et al., 2020; GEORGIN et al., 2020).

Apesar de se conhecer a importância desta espécie e da sua família Cactaceae, *Cereus jamacaru* ainda é uma espécie pouco estudada e carece de dados que compreenda os efeitos que os elementos potencialmente tóxicos sobre o metabolismo destas plantas. Com base no exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os possíveis efeitos e alterações do níquel em plântulas de *Cereus jamacaru* DC.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 TOXICIDADE EM PLANTAS CAUSADA POR ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS

Há alguns anos, a literatura tem se concentrado bastante nos estudos das consequências que o acúmulo de metais pesados pode acarretar tanto nos ecossistemas como na teia alimentar (GOPAL et al., 2003). Estes elementos são importantes poluentes ecológicos, nutricionais, ambientais e evolutivos (Lenntech Water Treatment and Air Purification, 2004). Segundo Hawkes (1997), um elemento é considerado metal pesado quando possui uma gravidade específica acima de 5 g/cm^3 . Contudo, estudos recentes como o de Pourret e Hursthouse (2019) relatam que o uso do termo ‘metal pesado’ é inadequado, já que abrange todos os elementos em uma lista não definida, além de misturar metais, metalóides e não metais. Por isso, neste trabalho será abordado o termo ‘elementos potencialmente tóxicos’, que segundo os autores (POURRET E HURSTHOUSE, 2019) é mais consistente e menos ambíguo.

Nagajyoti et al. (2010) incluem chumbo (Pb), cádmio (Cd), níquel (Ni), cobalto (Co), ferro (Fe), zinco (Zn), crômio (Cr), ferro (Fe), arsênio (As), prata (Ag) e os elementos do grupo platina na lista de elementos potencialmente tóxicos (EPTs). Os autores ainda retratam que estes podem ser encontrados em formações rochosas, contudo a industrialização e a urbanização aumentaram sua disponibilidade, principalmente, no solo e nos ecossistemas aquáticos. A toxicidade causada pelos EPTs varia conforme a concentração, sua forma química, a composição do solo e pH (NAGAJYOTI et al., 2010).

Pesquisas vem sendo realizadas em todo o mundo para determinar os efeitos dos EPTs, principalmente, em plantas (FERNANDES E HENRIQUES, 1991; REEVES E BAKER, 2000; NAZIR et al., 2015; SHEETAL et al., 2016). O trabalho de Ouzounidou (1995) demonstra que o cobre (Cu) em altas concentrações ($160 \mu\text{M}$) causou diversas alterações em plantas de *Koeleria splendens*, dentre elas: redução na biomassa e no comprimento da raiz, bem como a diminuição da taxa de biossíntese de clorofila. Testando diferentes concentrações de cádmio ($10 \mu\text{M}$ e $50 \mu\text{M}$) em plantas de *Pisum sativum*, o estudo de Hernández e Cooke (1997) resultou em alterações negativas severas no crescimento das raízes e parte aérea, bem como afetou a composição lipídica da membrana plasmática.

Os efeitos que os EPTs podem ocasionar nas plantas são diferentes em seus diferentes estágios de crescimento, bem como dependendo da concentração, a qual pode ou não afetar os vegetais (CHENG, 2003). No estudo de Ebbs e Kochian (1997), a toxicidade do zinco e cobre sobre plantas do gênero *Brassica* ocasionou diferentes alterações nas plantas, como a diminuição do diâmetro da raiz lateral, pelo Zn, e inibição da elongação da raiz lateral, pelo Cu. Já Peralta et al. (2001) verificaram que a capacidade de germinação das sementes de alfafa (*Medicago sativa* L.) foi diminuída em 23% quando expostas a uma concentração de 40 ppm de Cr^{6+} .

Outros efeitos observados são mostrados no trabalho de Pandey e Sharma (2002), que realizaram o estudo utilizando os metais cobalto (Co^{2+}), Ni^{2+} e Cd^{2+} em alta concentração (500 mM) em plantas de repolho. Os autores verificaram que houve uma diminuição da captação de Fe e seu translocamento para as folhas, do conteúdo de clorofila, do potencial hídrico e da taxa de transpiração, acarretando no desenvolvimento de estresse hídrico. Na pesquisa de Rahman et al. (2005), eles observaram diferentes efeitos morfológicos causados pelo Ni (0; 1,0; 10 e 100 μM) em cevada (*Hordeum vulgare* L.), as quais apresentaram, na maior concentração de Ni, clorose e necrose foliar e escurecimento radicular.

Além do exposto, os elementos potencialmente tóxicos podem ainda ocasionar diversas alterações bioquímicas nas plantas. A produção de Espécies Reativas de Oxigênio (EROs) pode ocorrer diretamente, através de reações de Haber-Weiss (WOJTASZEK, 1997; MITHOFER et al., 2004) e ocasionar uma das alterações mais deletérias, a peroxidação lipídica, que causa deterioração das membranas celulares. A eliminação de espécies reativas de oxigênio é uma das condições para a continuação da vida aeróbica e o sistema antioxidante busca neutralizar as reações potencialmente perigosas, através da prevenção, interceptação e reparo (SIES, 1986).

Segundo Apel e Hirt (2004), os mecanismos enzimáticos de detoxificação de EROs em plantas incluem superóxido dismutase (SOD), ascorbato peroxidase (APX) e catalase (CAT). Quanto aos mecanismos não-enzimáticos, podemos citar o ácido ascórbico (AsA), glutatona reduzida (GSH) e carotenóides (APEL E HIRT, 2004; HURA et al., 2008; AHMAD et al., 2009). No trabalho de Gwozdz et al. (1997) com *Lupinus luteu* L., os estressores utilizados foram Pb (50, 100, 150, 200, 250, 300 e 350 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$), Cu (16,5 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) e Cd (35 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$), os resultados mostraram que nas concentrações mais baixas de Pb, a atividade das enzimas aumentaram, enquanto que nas concentrações mais altas, as atividades não aumentaram para SOD nem diminuíram para CAT e APX, enquanto Cd provocou a síntese de fitoquelatinas e o Cu aumentou a atividade da CAT.

Em plantas de batata sob estresse de zinco, Raigond et al. (2017) observou um aumento muito grande da atividade de CAT (212% para 500 ppm de Zn), indicando que o Zn levou as plantas a um estresse oxidativo. Nos estudos de Balestrasse et al. (2001) e Zhang et al. (2002), com pepino e soja, respectivamente, foi possível observar que o metal cádmio, em diferentes concentrações (de 0 a 250 μ M), teve efeitos negativos sobre estas plantas e que o conteúdo de AsA e outros antioxidantes foi diminuído, conforme a concentração do metal aumentava. No trabalho de Xiang et al. (2001) observa-se que as plantas com níveis baixos de GSH se mostraram hipersensíveis a Cd em uma concentração tão baixa do metal (5 mM), quando comparada com plantas que possuíam, pelo menos, 50% de GSH.

Além dos estudos supracitados mostrando as alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas, diversos estudos demonstram as alterações anatômicas causadas pelos EPTs. Gawayed e Almaghrabi (2013) demonstram em seu estudo que Cu e Cd ocasionou diminuição significativa no diâmetro da raiz e do cilindro central, espessura do córtex, área da seção transversal da raiz e área da seção transversal do cilindro central em plantas de milho, principalmente, na concentração de 150 μ mol/L de Cd. Qaisar et al. (2005) relataram algumas modificações anatômicas, como redução do tamanho das células da epiderme, redução da área da região vascular e, como resultado, redução significativa no diâmetro radicular.

Rabier et al. (2008) relataram um acúmulo significativo de Ni na epiderme e floema do caule e raízes de *Grevillea exul*. O estresse de níquel também causou redução no número de vasos do xilema e, conseqüentemente, na função dos tecidos vasculares de plantas de trigo (KOVACEVIC et al. 1999). Além de efeitos nas raízes, alguns trabalhos retratam os efeitos em caules, como desorganização das células epidérmicas, redução da espessura da parede celular da epiderme e hipoderme, além de redução no diâmetro do caule, número de feixes vasculares e tamanho das células das regiões de armazenamento como resultado da toxicidade do Ni (SETIA E BALA, 1994; SRESTY E RAO, 1999).

A redução no tamanho do vaso do xilema pode resultar na redução da condutância hidráulica na raiz e na parte aérea. de Silva et al. (2012) estudaram os efeitos do estresse por EPTs nas características do xilema em *Acer rubrum* e relataram uma redução na proporção de tecido do xilema, em seu diâmetro e densidade. Pode ocorrer também a diminuição do tamanho do parênquima do mesófilo, tamanho dos feixes vasculares, diâmetro dos vasos do xilema e tamanho das células epidérmicas, segundo é demonstrado no trabalho de Kovacevic et al. (1999). Trabalhando com *Brassica oleracea*, Molas (1997) relatou diminuição no volume dos espaços intercelulares e no tamanho do tecido paliçádico e do mesófilo nas folhas que foram expostas a EPTs.

Vários dos metais pesados acima citados, são capazes de bioacumular ao longo da teia alimentar, são de difícil metabolização e não se degradam no meio ambiente. Por ser seres sésseis, as plantas possuem raízes que são um dos grandes e principais locais de absorção dos íons de metais pesados, contudo estes também são absorvidos de forma direta pelas folhas, devido as partículas presentes no ar atmosférico e que se depositam em suas superfícies (NAGAJYOTI et al., 2010).

2.1.1 Fontes Naturais e não Naturais dos Elementos Tóxicos

A aceleração do ciclo geoquímico dos metais causada pelos distúrbios antropogênicos vem causando o acúmulo destes elementos no meio ambiente. Isto ocorre devido as mais variadas fontes de contaminação que o homem produz (D'AMORE et al., 2005). De acordo com Nagajyoti et al. (2010), as diferentes fontes que podemos citar são (i) fontes naturais, (ii) fontes agrícolas, (iii) fontes industriais, (iv) rejeitos domésticos.

Em fonte naturais podemos encontrar diferentes concentrações de metais. As rochas ígneas depositam quantidades notáveis de Ni nos solos, bem como as rochas sedimentares, principalmente o xisto (NAGAJYOTI et al., 2010). Atividades vulcânicas são também grandes emissoras de metais (Zn e Ni, por exemplo), aumentando os teores destes no solo e nas plantas circundantes (CIMINO E ZIINO, 1983; SEAWARD E RICHARDSON, 1990). A agricultura vem sendo realizada pelo homem há muito tempo e desde que o uso de fertilizantes e pesticidas foi crescendo, o acúmulo e contaminação por metal pesado também aumentou. Produtos como fungicidas, fertilizantes inorgânicos e fosfatados, herbicidas possuem em sua composição Ni, promovendo o acúmulo em solos e plantas, desencadeando alterações que podem afetar a teia alimentar e a saúde humana (GIMENO-GARCÍA et al., 1996; NAGAJYOTI et al., 2010).

Uma das fontes industriais de metais pesados que todos conhecem é a mineração de ouro que utilizava o Hg em altas quantidades, contaminando os locais ao seu redor (LACERDA, 1997). Além disso, a fundição de metais é uma das fontes que mais contamina o meio ambiente. Análises de solos e plantas próximos das áreas de fundição revelam que são encontrados altas concentrações de metais (como Ni e Zn) em sua composição e, indiretamente, os vapores formados durante o processo, contém partículas de metais pesados, que ao entrarem em contato com a água atmosférica podem ser dispersos pelo vento e por precipitação, contaminando ambientes aquáticos e outros solos (HUTCHINSON E WHITBY, 1974; BI et al., 2006; NAGAJYOTI et al., 2010).

Segundo Nagajyoti et al. (2010), rejeitos domésticos possuem altas concentrações e são as principais fontes de metais em ambientes aquáticos. Um dos componentes nestes efluentes são os detergentes, Angino et al. (1970) demonstraram que os detergentes enzimáticos continham metais e, entre eles, o Zn estava presente em sua composição. Outro estudo também analisou as concentrações de metais (Zn, Cd e Cu) presentes em detergentes comerciais, demonstrando que há altas concentrações, principalmente de Zn (AONGHUSA E GRAY, 2002). Outras fontes também contribuem com o acúmulo de metais no ambiente, como queima de carvão e de óleo, aerossóis emitem Ni e Zn, lubrificantes para veículos e a queima dos resíduos das casas aumentam a concentração de diversos metais na natureza (NAGAJYOTI et al., 2010).

2.1.2 Níquel: generalidades

Níquel é um metal de transição com uma massa atômica igual a 58,69 u (DENKHAUS E SALNIKOW, 2002; NAGAJYOTI et al., 2010), resistente a corrosão pelo ar e água. São conhecidos cerca de cinco isótopos estáveis formando o níquel natural e vários estados de oxidação, contudo o que prevalece sob condições ambientais é Ni^{2+} (CEMPEL E NIKEL, 2006). Segundo Zamble et al. (2017), Ni compõe cerca de 3% da composição da Terra, além de ser o vigésimo quarto elemento mais abundante na crosta terrestre. Este metal de transição interna está presente na concentração de até $10 \mu\text{g.L}^{-1}$ na água potável, podendo ser encontrado em erupções vulcânicas, solos, água do oceano.

É um micronutriente essencial para as plantas e desempenha papéis importantes em diversos processos metabólicos (BROWN et al., 1987; CAKMAK E MARSCHNER, 1993). Contudo, em altas concentrações é capaz de apresentar toxicidade em plantas, causando diversos efeitos negativos em seu crescimento e desenvolvimento, através de alterações em processos bioquímicos e fisiológicos (CAKMAK E MARSCHNER, 1993; ZORNOZA et al., 1999). A absorção de Ni pelas plantas é feita, principalmente, pelo sistema radicular por difusão passiva ou transporte ativo. Essa absorção é essencial, pois este, é componente de diversas enzimas, como glioxalase, deformilases peptídicas, Metil Coenzima M redutase e ureases, além de algumas SOD e hidrogenases (CHEN et al., 2009).

Os estudos de Kozlow (2005), Asher (1991), Kupper et al. (2001) e Pollard et al. (2002) classificam as plantas quanto ao nível de Ni suportado e declaram que o nível crítico é acima de 10 mg.kg^{-1} (plantas sensíveis), acima de 50 mg.kg^{-1} são moderadamente tolerantes e acima de 1.000 mg.kg^{-1} são plantas hiperacumuladoras de Ni. Os principais efeitos do Ni nas

plantas são clorose, necrose, inibição do crescimento da parte aérea e das raízes e diminuição da área foliar (YUSUF et al., 2011). Ao crescer em condições normais, as plantas mantêm suas concentrações de níquel em níveis abaixo da toxicidade crítica, 0,05 a 10 mg.kg⁻¹ (CHEN et al., 2009), não apresentando os efeitos citados anteriormente.

O Ni possui uma característica que o diferencia dos demais EPTs, a qual está relacionada a sua facilidade de penetração, distribuição e translocação no tecidos vegetais. Ele pode se mover rapidamente através dos vasos do floema e do xilema, translocando-se suavemente da raiz para a parte aérea das plantas, passando pela barreira endodérmica e acumulando nas células do periciclo (EMAMVERDIAN et al., 2015).

2.2 ASPECTOS BOTÂNICOS DE CACTACEAE

Cactaceae é uma das famílias, entre as angiospermas, mais diversas e bem adaptadas à região Neotropical (GIBSON E NOBEL, 1986). Essa família está distribuída desde o Canadá até a Argentina (GUZMÁN et al., 2003), mas também pode ser encontrada em Madagascar e em outros países da África, Sul da Índia e Sri Lanka (NOBEL, 2002). Compreende cerca de 124 gêneros, 378 subespécies (ROWLEY E KIMNACH, 2006) e 1600 espécies distribuídas pelo mundo, com as mais variadas formas (GIBSON E NOBEL, 1986).

As Américas possuem quatro centros de diversidade: (1) México e o sudoeste dos Estados Unidos, onde o primeiro país possui, no mínimo, 570 espécies com 430 sendo endêmicas; (2) os Andes Centrais, principalmente Peru e Bolívia, contando com o sul do Equador, nordeste do Chile e noroeste da Argentina, detendo um total de 18% de gêneros endêmicos; (3) Leste do Brasil, com 80% das cactáceas sendo endêmicas, compreendendo 11% de todos os gêneros de cactos e um total de aproximadamente 145 espécies nativas; (4) as regiões centro-oeste e sul do Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina, com 85 espécies aceitas provisoriamente (OLDFIELD, 1997; NOBEL, 2002).

Possuem uma ampla distribuição climática e ecológica, podendo ser encontradas em um deserto quase sem chuva como em uma floresta tropical, que pode receber até 2000 mm de chuva por ano. Quanto a altitude, elas vão do nível do mar até 5.200 m nos Andes. Apresenta diversas formas: epífitas, litófitas, geófitas, espécies de árvores e arbustos, mas não existe forma parasita (OLDFIELD, 1997; NOBEL, 2002).

Morfológicamente, caracterizam-se por serem plantas lenhosas ou herbáceas, suculentas perenes, podendo alcançar até 20 m de altura; cladódios com forma do tipo globoso, cilíndrico, colunar ou plano, com ou sem espinhos, com nervuras, lisos ou

tuberculados; com ou sem folhas, de cor verde e caducas; aréolas axilares, podendo ter lâ, flores com pétalas e sépalas, imbricadas, numerosos estames, com um estilo; ovário inferior; fruto tipo baga seca ou carnudo com muitas sementes (WELSH, 1984; BARTHLOTT E HUNT, 1993). Uma característica essencial e única de cactos são as aréolas, cujas formam os espinhos, flores, tricomas, outros caules e folhas (TORRE, 2017).

As cactáceas vivem em ambientes de condições extremamente xéricas sofrendo pressões seletivas. Com isso, adotaram várias estratégias fisiológicas e morfofisiológicas, entre elas, a deposição de cera em sua epiderme impedindo a perda de água para o ambiente e refletindo a luz solar excedente. Além disso, a maioria de seus gêneros possuem espinhos em vez de folhas, reduzindo a transpiração (MAFFEI et al., 1997). Seus cladódios são fotossintéticos suculentos, possuindo um córtex vascularizado espesso que armazena água (MAUSETH, 1995). Outra adaptação observada, é o fechamento dos estômatos durante o dia e a abertura durante a noite, cuja estratégia serve para poupar água. Diferentemente da maioria das angiospermas, plantas dessa família possuem como estratégia fotossintética o mecanismo conhecido como metabolismo do ácido crassuláceo (CAM, do inglês Crassulacean Acid Metabolism). Nesse tipo de estratégia fotossintética, durante a noite, as plantas absorvem CO₂ e armazena na forma de ácido málico, quando a luz solar é absorvida o dióxido de carbono é utilizado para realização da fotossíntese (TORRE, 2017).

Os cactos estão entre os principais recursos vegetais utilizados pelo homem, além de serem importantes para a manutenção das interações ecológicas (CARMONA E CASAS, 2005). As diversas espécies que constituem esta família, possuem diferentes utilizações, seja como combustíveis, para fins medicinais, alimentícios, artesanais (LUNA-MORALE E AGUIRRE, 2001), ornamentais (CRUZ E CASAS, 2002), práticas religiosas e mágicas (ARELLANO E CASAS, 2003). Sua madeira é utilizada para a construção de cercas e casas, para queima de cerâmica, bem como são cultivadas para uso como cerca viva, o que ajuda na não erosão do solo (ARELLANO E CASAS, 2003). Seus frutos são muito apreciados e sua comercialização gera uma fonte de renda, pela venda dos frutos secos ou frescos, como água saborizada, sorvete e geléias (CRUZ E CASAS, 2002). Seus efeitos medicinais são diversos e muito utilizados pela população, quer como antioxidantes, anti-diabético, anti-inflamatório ou anti-viral, cujos são relatados em diversos estudos, como cita Feugang et al. (2006).

Suas espécies são também bastante utilizadas como forragem para bovinos, ovinos e caprinos durante a época de estiagem (LUCENA et al., 2013). Suas interações com o ambiente é bastante variada, aves e grandes abelhas realizam a sua polinização (DÍAZ E COCUCCI, 2003), seus frutos são importantes fontes de comida para aves e mamíferos

(EVERITT E ALANIZ, 1981). A dispersão de suas sementes é por zoocoria e por meio de suas três variantes (endozoocoria, epizoocoria e sinzoocoria), sendo realizadas por aves, mamíferos, reptéis e insetos (BREGMAN, 1988).

2.3 CARACTERÍSTICAS BOTÂNICAS DE *CEREUS JAMACARU* DC

Cereus jamacaru De Candolle é uma Cactaceae nativa da Caatinga e é conhecida popularmente como "mandacaru" ou "mandacaru de boi". É um cacto colunar comum, crescendo em solos com baixos níveis de nutrientes e sobrevive com o mínimo de precipitação, sendo bem adaptada às condições semiáridas (BRITTON E ROSE, 1920; CAVALCANTI E RESENDE, 2007; GOMES et al., 2014).

Caracterizam-se, morfológicamente, por serem plantas de tronco grosso, bastante ramificado, amadeirado podendo alcançar 10 m de altura; os ramos são geralmente eretos, possuindo de 4 a 6 costelas; aréolas grandes, de 2 a 3 cm; numerosos espinhos, de cor amarela de 20 a 30 cm; flores brancas, noturnas e grandes; perianto cai cedo, deixando apenas o estileto que é persistente; fruto grande, pode chegar até 12 cm comprimento e 8 cm de diâmetro, de cor vermelha brilhante, com uma polpa branca comestível com sementes, cor preta, imersas (BRITTON E ROSE, 1920).

Diversos estudos (GUEDES et al., 2009; VEIGA-BARBOSA et al., 2012) apontam que as sementes de *C. jamacaru* tem sua capacidade máxima de germinação em temperaturas de 20-30 °C, cuja germinação em folhas de papel ocorre ao 4º dia pós semeadura (ALENCAR et al., 2012). No trabalho de Abud et al. (2013), as sementes foram submetidas a temperatura de 25 °C e fotoperíodo de 12 h, a porcentagem de germinação e o índice de velocidade de germinação (IVG) foram os maiores. Quanto a incubação no escuro, este fator impediu a germinação (VEIGA-BARBOSA et al., 2012; ALENCAR et al., 2012) e anteriormente, Meiado et al. (2010) já haviam classificado *C. jamacaru* como uma espécie fotoblástica positiva, além de mostrarem que o estresse salino e hídrico afetaram negativamente sua germinação.

Uma vez alcançado o sucesso germinativo, Abud et al. (2013) classificou a germinação do tipo epígeo e fanerocotiledonar e observaram oito estágios de crescimento em 150 dias (fig. 1). Ao terceiro dia pós semeadura, os autores observaram a protrusão da radícula, em seguida, o hipocótilo se desenvolveu e no quinto dia, as plântulas tinham 8,7 mm de comprimento total (medida da raiz até a parte aérea); aos 17 dias, o hipocótilo estava completamente ereto, e os cotilédones estavam expostos; a partir dos 60 dias após a

semeadura, foi verificado o aparecimento de cerdas entre os cotilédones e o crescimento do epicótilo mostrou-se lento; aos 90 dias, a planta apresentava muitos espinhos; a partir dos 90 dias até os 150 dias após a sementeira, as alterações morfológicas foram pequenas, ocorrendo apenas o aumento do tamanho das plantas. Aos 150 dias, as plantas apresentavam 325,30 mm de comprimento (ABUD et al., 2013).

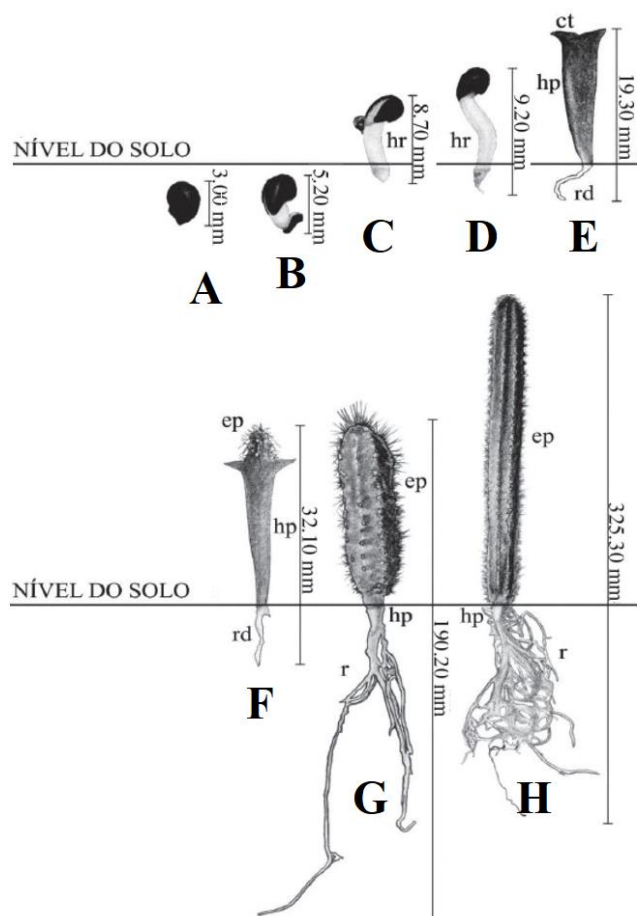


Figura 1. Estágios de crescimento de *Cereus jamacaru* analisados durante 150 dias (A até H), apresentando oito estágios e a partir do 90º dia (G) com poucas alterações morfológicas, ocorrendo diferenças apenas no crescimento das plantas. Legenda: hr - eixo hipocótilo-radícula; hp - hipocótilo; rd - radícula; ct-cotilédones; ep - epicótilo; r - raiz. Adaptado de Abud et al. (2013).

2.4 ETNOBOTÂNICA E BOTÂNICA ECONÔMICA DE *CEREUS JAMACARU* DC

Estudos etnobotânicos com cactáceas já foram realizados em diversos países como México (CASAS et al., 1997; BLANCAS et al., 2010; PARRA et al., 2012; CASAS et al., 2014; PÉREZ-NEGRÓN et al., 2014), Cuba (FUENTES, 2005), Colômbia (FERNÁNDEZ-

ALONSO, 2006; VILLALOBOS et al., 2007), Estados Unidos (APODACA, 2001), África do Sul (RASETHE et al., 2013) e Índia (KALITA et al., 2014).

Para *C. jamacaru* muitos trabalhos demonstram que esta espécie possui diversas utilidades para a população, desde o uso como forragem, medicinal, alimentação humana, ornamentação e construção civil, até práticas religiosas e mágicas (SILVA et al., 2019).

a) Uso medicinal – O estudo de Albuquerque et al. (2007) faz um levantamento de plantas medicinais da Caatinga, entre elas o mandacaru é citado e suas partes (cladódios, frutos e raízes) são utilizadas como remédio contra problemas hepáticos, influenza, constipação, hipertensão, enterite, febre, expectorante, antiemético, sífilis, problemas na coluna vertebral e problemas uretrais. O trabalho ainda relata que *C. jamacaru* possui uma alta importância relativa (IR) e que deve ser alvo de futuros estudos fitoquímicos e farmacológicos. Ainda com o levantamento de espécies medicicinais em duas comunidades, uma delas sendo indígena, Alburquerque et al. (2008) demonstram que muitos usos são comuns entre elas, a exemplo do mandacaru, usado pelas duas comunidades para fins terapêuticos.

A partir do preparo do chá da raiz, trata-se doenças como reumatismo, feridas, furúnculos, infecções urinárias e inflamação nos rins (LUCENA et al., 2013), e para tosse é preparado um xarope a partir da polpa (parênquima aquífero) (LUCENA et al., 2014). Agra et al. (2007; 2008) demonstram que das raízes é preparada uma infusão para o combate de doenças renais e respiratórias, já a polpa do tronco é amassada e ingerida com açúcar, agindo contra úlceras estomacais. Mandacaru também foi citado como sendo uma das plantas usadas com ação cicatrizante, anti inflamatória e antiséptica (ARAÚJO et al., 2008; CARTAXO et al., 2010).

b) Uso alimentício – ela é ainda citada como uma planta utilizada tanto para alimentação humana quanto para a forragem de bovinos, caprinos e ovinos, principalmente, na época de seca (ALVES et al., 2014; MEDEIROS E ALBUQUERQUE, 2014). Analisando a polpa com sementes dos frutos de mandacaru, coletados de comunidades rurais que os utilizavam para alimentação, Nascimento et al. (2011) demonstraram que os frutos apresentam um grande equilíbrio entre açúcares e acidez, o que indica a excelente palatabilidade.

Diversos estudos (CAVALCANTI E RESENDE, 2006; LUCENA et al., 2012, 2013; NASCIMENTO et al., 2013; ROQUE E LOIOLA, 2013; LUCENA et al., 2015; DANTAS et al., 2017) demonstram o quanto as comunidades rurais usufruem tantos dos frutos para sua alimentação como do indivíduo completo para alimentação dos animais domésticos. Já trabalhos como o de Santos et al. (2007), Gomes et al. (2014), Blanco et al. (2016), Abreu et

al. (2016) e Leal et al. (2017) apresentam a importância desta espécie como recurso alimentar para diversas espécies selvagens, garantindo a manutenção das interações ecológicas.

No trabalho de Lucena et al. (2015) sobre o conhecimento popular de cactáceas em comunidades rurais, diversas espécies são citadas e seus usos. *C. jamacaru* é a espécie mais versátil, se enquadrando em todas as categorias listadas (algumas na tabela 1).

Tabela 1. Categorias de usos, parte utilizada da planta e utilidades de *Cereus jamacaru* por comunidades rurais. Adaptado de Lucena et al. (2015).

Categorias de Uso	Parte Usada	Utilização
Bioindicação	Flor	Indica Chuva
Construção	Madeira	Portas, Ripas, Tábuas
	Indivíduo Completo	Cerca viva
Mágico	Indivíduo Completo	Mal olhado
Religioso		
Ornamental	Indivíduo Completo	Jardins e Quintais
Tecnologia	Madeira e Raiz	Cabo para ferramentas (machado, martelo)
		Tábuas para mesas e portas
Veterinário	Polpa	Garrafada (má digestão)
	Raiz	Infusão (Dor de barriga e câimbra de sangue)

De acordo com Almeida et al. (2011) os frutos de mandacaru, diferentemente do fruto da palma forrageira, não é explorado comercialmente, o que acaba gerando grandes desperdícios desses frutos. Em seu trabalho, os autores avaliaram a fermentação alcoólica e a caracterização físico-química da bebida fermentada utilizando a polpa do fruto, chegando ao resultado de que as análises realizadas mostraram qualidades comparáveis a outros fermentados de frutas, como caju, laranja e cajá. Com frutos de diferentes locais, Almeida et al. (2009) analisaram as características físicas e físico-químicas dos frutos, obtendo o resultado de que sua composição varia conforme o local de cultivo, mas que os frutos possuem potencial para uso na indústria de processamento e em processos biotecnológicos.

Estudos *in vitro* analisando as ações medicinais de *C. jamacaru* como, por exemplo, o trabalho de Dutra et al. (2018) com o extrato hidroalcoólico de mandacaru (62,5; 125,0; 250 e 500 $\mu\text{m.mL}^{-1}$), demonstra que o extrato apresentou ação antioxidante e inibiu a atividade de radicais DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil) ($\text{EC}_{50} = 427,74 \mu\text{g.mL}^{-1}$) em todas as concentrações testadas. Além disso, foi capaz de diminuir a viabilidade das células sarcoma-180 após 48h de incubação e inibiu os danos citotóxicos efetivamente, em todas as concentrações do extrato (10, 50 e 100 $\mu\text{g/mL}$). A toxicidade em plantas foi demonstrada pelo trabalho de Silva et al. (2015), cujos observaram que o extrato aquoso do cladódio (500/1 e 500/1,5 g/L) apresentou citotoxicidade nas células meristemáticas de *Allium cepa*.

Quanto aos estudos *in vivo*, foram realizados utilizando extratos de *C. jamacaru* avaliando sua toxicidade. No trabalho de Messias et al. (2010), o extrato metanólico de mandacaru foi administrado via oral (100, 250 e 500 mg/kg) em ratas grávidas e analisou-se parâmetros bioquímicos e hematológicos, cujos não apresentaram alterações, classificando o extrato de *C. jamacaru* como não tóxico. Pelo contrário, o estudo de Medeiros et al. (2018) com o extrato etanólico de *C. jamacaru* nas concentrações de 210 e 420 mg/kg em ratos machos, demonstrou que os animais apresentaram baixa ingestão de alimento e baixo peso corporal, além disso os testes genotóxicos realizados mostraram que o extrato possui ação genotóxica intrínseca.

Avaliando a ação antitumoral do extrato hidroalcoólico de mandacaru, Dutra et al. (2018) observaram uma redução de tumor em ratos com sarcoma. As concentrações do extrato utilizadas foram de 5, 10 e 20 mg/ g, mas apenas a maior concentração conseguiu diminuir significativamente o tumor em 86,07%. No trabalho de Souza et al. (2001) também analisou-se a ação anticancerígena do extrato hidroetanólico de *C. jamacaru* em ratos. Uma dose de 40 mg/kg foi injetada e observou-se uma redução do peso do sarcoma-180 ($\text{LD}_{50} = 400 \text{ mg/kg}$). Neste mesmo trabalho, ainda é relatado a toxicidade que o extrato pode causar, levando a uma leve excitabilidade no sistema nervoso.

No trabalho de Vatta et al. (2011) com ovelhas infectadas com nematódeos, os autores administraram uma dose única (32,6 g) e uma dose dupla (64,2 g) de plantas frescas de mandacaru. Os autores ao analisar as quantidades de ovos nas fezes dos animais, não observaram uma diminuição significativa, porém a dose dupla foi mais eficaz na redução. Contudo, os pesquisadores retratam a não eficácia do mandacaru no combate aos nematódeos, bem como também não observaram toxicidade causada pela ingestão do material vegetal.

3. REFERÊNCIAS

- ABREU, F.; LA FUENTE, M.F.C.; SCHIEL, N. SOUTO, A. Feeding ecology and behavioral adjustments: Flexibility of a small neotropical primate (*Callithrix jacchus*) to survive in a semiarid environment. **Mammal Research**, v. 1, p. 1– 9, 2016.
- ABUD, H.F.; PEREIRA, M.S.; GONÇALVES, N.R.; PEREIRA, D.S.; BEZERRA, A.M.E. Germination and morphology of fruits, seeds and plants of *Cereus jamacaru* DC. **Journal of Seed Science**, v. 35, n. 3, p. 310-315, 2013.
- AGRA, M.F.; SILVA, K.N.; BASÍLIO, I.J.L.D.; FREITAS, P.F.; BARBOSA-FILHO, J.M. Survey of medicinal plants used in the region Northeast of Brazil. **Brazilian Journal of Pharmacognosy**, v. 18, p. 472-508, 2008.
- AGRA, M.J.F.; FREITAS, P.F.; BARBOSA-FILHO, J.M. Synopsis of the plants known as medicinal and poisonous in Northeast of Brazil. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 17, p. 114-140, 2007.
- AGRA, M.J.F.; FREITAS, P.F.; BARBOSA-FILHO, J.M. Synopsis of the plants known as medicinal and poisonous in Northeast of Brazil. **Brazilian Journal of Pharmacognosy**, v. 17, p. 114-140, 2007.
- ALBUQUERQUE, U.P.; MEDEIROS, P.M.; ALMEIDA, A.L.S.; MONTEIRO, J.M.; FREITAS LINS NETO, E.M.; MELO, J.G.; SANTOS, J.P. Medicinal plants of the caatinga (semi-arid) vegetation of NE Brazil: A quantitative approach. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 114, n. 3, p. 325–354, 2007.
- ALBUQUERQUE, U.P.; SILVA, V.A.; CABRAL, M.C.; ALENCAR, N.L.; ANDRADE, L.H.C. Comparisons between the use of medicinal plants in indigenous and rural caatinga (dryland) communities in NE Brazil. **Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas**, v. 7, n. 3, p. 156–170, 2008.
- ALENCAR, N.L.M.; GOMES-FILHO, E.; INNECCO, I. *Cereus jamacaru* seed germination and initial seedling establishment as a function of light and temperature conditions. **Scientia Agricola**, v. 69, n. 1, p. 70-74, 2012.
- ALENCAR, N.L.M.; GOMES-FILHO, E.; INNECCO, R. *Cereus jamacaru* seed germination and initial seedling establishment as a function of light and temperature conditions. **Scientia Agricola**, v. 69, n. 1, p. 70-74, 2012.
- ALMEIDA, M.M.; SILVA, F.L.H.; CONRADO, L.S.; FREIRE, R.M.M.; VALENÇA, A.R. Caracterização física e físico-química de frutos do mandacaru. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 11, n. 1, p. 15-20, 2009.

- ALMEIDA, M.M.; SILVA, F.L.H.; CONRADO, L.S.; MOTA, J.C.; FREIRE, R.M.M. Estudo cinético e caracterização da bebida fermentada do *Cereus jamacaru* P. DC. **Revista Verde**, v. 6, n. 2, p. 176-183, 2011.
- ALVES, C.M.; LUCENA, C.M.; SANTOS, S.S.; LUCENA, R.F.P.; TROVÃO, D.M.B.M. Ethnobotanical study of useful vegetal species in two rural communities in the semi-arid region of Paraíba state (Northeastern Brazil). **Boletim do Museu de Biologia Mello Leitão (N. Sér.)**, v. 34, p. 75-96, 2014.
- AMARI, A., ALALWAN, B., ELDIRDERI, M.M., MNIF, W., REBAH, F.B. Cactus material-based adsorbents for the removal of heavy metals and dyes: a review. *Materials Research Express*, v. 7, 2020.
- ANGINO, E.E.; MAGNUSON, L.M.; WAUGH, T.C.; GALLE, O.K.; BREDFELDT, J. Arsenic in Detergents: Possible Danger and Pollution Hazard. **Science**, v. 168, n. 3929, p. 389–390, 1970.
- ANSARI, M.K.A., AHMAD, A., UMAR, S., ZIA, M.H., IQBAL, M., OWENS, G. Genotypic Variation in Phytoremediation Potential of Indian Mustard Exposed to Nickel Stress: A Hydroponic Study. **International Journal of Phytoremediation**, v. 17, n. 2, p. 135–144, 2014.
- AONGHUSA, C.N.; GRAY, N.F. Laundry detergents as a source of heavy metals in Irish domestic wastewater. **Journal of Environmental Science and Health**, v. 37, n. 1, p. 1–6, 2002.
- APODACA, P. Cactus Stones: Symbolism and Representation In Southern California and Seri Indigenous Folk Art and Artifacts. **Journal of California and Great Basin Anthropology**, v. 23, n. 2, p. 215-228, 2001.
- ARAÚJO, T.A.S.; ALENCAR, N.L.; AMORIM, E.L.C.; ALBUQUERQUE, U.P. A new approach to study medicinal plants with tannins and flavonoids contents from the local knowledge. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 120, p. 72–80, 2008.
- ARELLANO, E.; CASAS, A. Morphological variation and domestication of *Escontria chiotilla* (Cactaceae) under silvicultural management in the Tehuacán Valley, Central Mexico. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 50, n. 4, p. 439–453, 2003.
- ASHER, C.J. Beneficial Elements, Functional Nutrients, and Possible New Essential Elements. In: MORTVEDT, J.J., COX, F.R., SHUMAN, L.M., WELCH, R.R. (ed). Micronutrients in agriculture. **Soil Science Society of America**, p. 703–723, 1991.
- BARAK, P.; HELMKE, P.A. The Chemistry of Zinc. **Zinc in Soils and Plants**, p. 1–13, 1993.

- BARTHLOTT, W.; HUNT, D.R. Cactaceae. In: KUBITSKI, K., ROHWER, J.G., BITTRICH, V. (Eds.) *The Families and Genera of Vascular Plants*. **Springer**, v. 2, p. 161–197, 1993.
- BI, X.; FENG, X.; YANG, Y.; QIU, G.; LI, G.; LI, F.; LIU, T.; FU, Z.; JIN, Z. Environmental contamination of heavy metals from zinc smelting areas in Hezhang County, western Guizhou, China. **Environmental International**, v. 32, n. 7, p. 883–890, 2006.
- BLANCAS, J.; CASAS, A.; RANGEL-LANDA, S.; TORRES, I.; PÉREZ-NEGRÓN, E.; SOLÍS, L.; DELGADO-LEMUS, A.; PARRA, F.; ARELLANES, Y.; CABALLERO, J.; CORTÉS, L.; LIRA, R.; DÁVILA, P. Plant management in the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. **Economic Botany**, v. 64, n. 4, p. 287–302, 2010.
- BLANCO, G.; BRAVO, C.; PACIFICO, E.C.; CHAMORRO, D.; SPEZIALE, K.L.; LAMBERTUCCI, S.A.; HIRALDO, F.; TELLA, J.L. Internal seed dispersal by parrots: an overview of a neglected mutualism. **PeerJ**, v. 4, 2016.
- BREGMAN, R. Forms of seed dispersal in Cactaceae. **Acta Botanica Neerlandica**, v. 37, n. 3, p. 395–402, 1988.
- BRITTON, N.; ROSE, J.N. The Cactaceae. **Washington: Carnegie Institute**, v. 2, n. 248, p. 8-9, 1920.
- BROWN, P.H.; WELCH, R.M.; CARY, E.E. Nickel: A Micronutrient Essential for Higher Plants. **Plant Physiology**, v. 85, n. 3, p. 801–803, 1987.
- CAKMAK, I.; MARSCHNER, H. Effect of zinc nutritional status on activities of superoxide radical and hydrogen peroxide scavenging enzymes in bean leaves. **Plant and Soil**, v. 155-156, n. 1, p. 127–130, 1993.
- CARMONA, A.; CASAS, A. Management, phenotypic patterns and domestication of *Polaskia chichipe* (Cactaceae) in the Tehuacán Valley, Central Mexico. **Journal of Arid Environments**, v. 60, n. 1, p. 115–132, 2005.
- CARTAXO, S.L.; SOUZA, M.M.A.; ALBUQUERQUE, U.P. Medicinal plants with bioprospecting potential used in semi-arid northeastern Brazil. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 131, p. 326–342, 2010.
- CASAS, A.; CAMOU, A.; OTERO-ARNAIZ, A.; RANGEL-LANDA, S.; CRUSE-SANDERS, J.; SOLÍS, L.; TORRES, I.; DELGADO, A.; MORENO-CALLES, A.I.; VALLEJO, M.; GUILLÉN, S.; BLANCAS, J.; PARRA, F.; FARFÁN-HEREDIA, B.; AGUIRRE-DUGUA, X.; ARELLANES, Y.; PÉREZ-NEGRÓN, E. Manejo tradicional de biodiversidad y ecosistemas en Mesoamérica: el Valle de Tehuacán. **Investigación Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 23-44, 2014.

- CASAS, A.; PICKERSGILL, B.; CABALLERO, J.; VALIENT-BANUET, A. Ethnobotany and Domestication in Xoconochtlí, *Stenocereus stellatus* (Cactaceae), in the Tehuacán Valley and La Mixteca Baja, México. **Economic Botany**, v. 51, n. 3, p. 279-292, 1997.
- CAVALCANTI, N.B.; RESENDE, G.M. Consumo do mandacaru (*Cereus jamacaru* DC.) por caprinos na época da seca no semi-árido de Pernambuco. **Revista Caatinga**, v. 19, p. 402-408, 2006.
- CAVALCANTI, N.B.; RESENDE, G.M. Consumption of the mandacaru (*Cereus jamacaru* D.C.) for the goats in the drought period of the semi-arid Pernambuco, Brazil. **Revista Caatinga**, v. 19, p. 402-408, 2004.
- CAVALCANTI, N.B.; RESENDE, G.M. Efeito de Diferentes Substratos no Desenvolvimento de Mandacaru (*Cereus jamacaru* DC.), Facheiro (*Pilosocereus pachycladus* RITTER), Xiquexique (*Pilosocereus gounellei* (A. WEBER EX K. SCHUM.) BLY. EX ROWL.) e Coroa-de-Frade (*Melocactus bahiensis* BRITTON & ROSE). **Revista Caatinga**, v. 20, n. 1, p. 28-35, 2007.
- CEMPEL, M.; NIKEL, G. Nickel: A review of its sources and environmental toxicology. **Polish journal of environmental studies**, v. 15, n. 3, p. 375-382, 2006.
- CHEN, C.; HUANG, D.; LIU, J. Functions and Toxicity of Nickel in Plants: Recent Advances and Future Prospects. **CLEAN - Soil, Air, Water**, v. 37, n. 4-5, p. 304-313, 2009.
- CHENG, S. Effects of Heavy metals on plants and resistance mechanisms. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 10, n. 4, p. 256-264, 2003.
- CIMINO, G.; ZIINO, M. Heavy metal pollution, Part VII. Emissions from Mount Etna Volcano. **Geophysical Research Letters**, v. 10, n. 1, p. 31-34, 1983.
- COSTA MOREIRA, J. Threats by heavy metals: human and environmental contamination in Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 188, p. 61-71, 1996.
- CRUZ, M.; CASAS, A. Morphological variation and reproductive biology of *Polaskia chende* (Cactaceae) under domestication in Central Mexico. **Journal of Arid Environments**, v. 51, n. 4, p. 561-576, 2002.
- D'AMORE, J.J.; AL-ABED, S.R.; SCHECKEL, K.G.; RYAN, J.A. Methods for Speciation of Metals in Soils. **Journal of Environment Quality**, v. 34, n. 5, p. 1707, 2005.
- DANTAS, M.K.M.; SANTOS, C.A.G.; MEDEIROS, M.F.T. Reports of knowledge and the uses of Cactaceae species in the *Historia Naturalis Brasiliae* (1648): comparative past-present analyses. **Ethnoscience**, v. 2, n. 1, 2017.

- DAVET, A.; VIRTUOSO, S.; DIAS, J.F.G.; MIGUEL, M.D.; OLIVEIRA, A.B.; MIGUEL, O.G.; Atividade antibacteriana de *Cereus jamacaru* DC, Cactaceae. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 19, p. 561-564, 2009.
- DE SILVA, N.D., CHOLEWA, G.E., RYSER, P. Effects of combined drought and heavy metal stresses on xylem structure and hydraulic conductivity in red maple (*Acer rubrum* L.). **Journal of Experimental Botany**, v. 63, p. 5957–5966, 2012.
- DEMIRAL, T.; TÜRKAN, I. Comparative lipid peroxidation, antioxidant defense systems and proline content in roots of two rice cultivars differing in salt tolerance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 53, p. 247–257, 2005.
- DENKHAUS, E.; SALNIKOW, K. Nickel essentiality, toxicity, and carcinogenicity. **Critical Reviews in Oncology/Hematology**, v. 42, n. 1, p. 35–56, 2002.
- DÍAZ, L.; COCUCCI, A.A. Functional Gynodioecy in *Opuntia quimilo* (Cactaceae), a Tree Cactus Pollinated by Bees and Hummingbirds. **Plant Biology**, v. 5, n. 5, p. 531–539, 2003.
- DUTRA, J.C.V.; FERREIRA, J.M.; PEREIRA, P.R.C.; OLIVEIRA, J.B.H.; GERVÁSIO, S.V.; XAVIER, M.B.; MOTA, M.M.; LUZ, A.C.; PRETTI, I.R.; FRANÇA, H.S.; JAMAL, C.M.; BATITUCCI, M.C.P. *Cereus jamacaru* DC. Hydroalcoholic Extract Promotes Anti-Cytotoxic and Antitumor Activity. **Pharmaceuticals**, v. 11, n. 130, 2018.
- EBBS, S.D.; KOCHIAN, L.V. Toxicity of Zinc and Copper to Brassica Species: Implications for Phytoremediation. **Journal of Environment Quality**, v. 26, n. 3, p. 776, 1997.
- EMAMVERDIAN, A., DING, Y., MOKHBERDORAN, F., XIE, Y. Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response. **The Scientific World Journal**, p. 1-18, 2015.
- EVERITT, J.H.; ALANIZ, M.A. Nutrient Content of Cactus and Woody Plant Fruits Eaten by Birds and Mammals in South Texas. **The Southwestern Naturalist**, v. 26, n. 3, p. 301, 1981.
- FABIANO, C.C., TEZOTTO, T., FAVARIN, J.L., POLACCO, J.C., MAZZAFERA, P. Essentiality of nickel in plants: a role in plant stresses. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, 2015.
- FATIMA, R.A.; AHMAD, M. Certain antioxidant enzymes of *Allium cepa* as biomarkers for the detection of toxic heavy metals in wastewater. **Science of The Total Environment**, v. 346, n. 1-3, p. 256–273, 2005.
- FERNANDES, J.C.; HENRIQUES, F.S. Biochemical, physiological, and structural effects of excess copper in plants. **The Botanical Review**, v. 57, n. 3, p. 246–273, 1991.
- FERNÁNDEZ-ALONSO, J.L. Nueva especie colombiana de *Browningia* (Cactaceae, Cactoideae, Browningieae) potencialmente promisorio para el país. **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias**, v. 30, n. 114, p. 19- 30, 2006.

- FEUGANG, J.M.; KONARSKI, P.; STINTZING, F.; ZOU, C. Nutritional and medicinal use of cactus pear (*Opuntia* spp.) cladodes and fruits. **Frontiers in Bioscience**, v. 11, p. 2574–2589, 2006.
- FLORA DO BRASIL 2020 EM CONSTRUÇÃO. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: < <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/> >. Acesso em: 28 de Janeiro de 2020.
- FRANÇA, F.C.S.S., ALBUQUERQUE, A.M.A., ALMEIDA, A.C., SILVEIRA, P.B., FILHO, C.A., HAZIN, C. A., HONORATO, E.V. Heavy metals deposited in the culture of lettuce (*Lactuca sativa* L.) by the influence of vehicular traffic in Pernambuco, Brazil. **Food Chemistry**, v. 215, p. 171–176, 2017.
- FUENTES, V.R. Etnobotánica de Cactaceae em Cuba. In: González Torres, L.R.; Palmadora, A.; Rodríguez, A. (Eds). Memorias del taller conservación de cactus Cubanos. **La Habana: Jardim Botánico Nacional, Universidad de La Habana**, p.15-24, 2005.
- GALLEGO, S.M.; BENAVIDES, M.P.; TOMARO, M.L. Effect of heavy metal ion excess on sunflower leaves: evidence for involvement of oxidative stress. **Plant Science**, v. 121, n. 2, p. 151–159, 1996.
- GAUR, A., ADHOLEYA, A. Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. **Current Science**, v. 86, n. 4, p. 528–534, 2004.
- GEORGIN, J., FRANCO, D., DRUMM, F. C., GRASSI, P., NETTO, M. S., ALLASIA, D., DOTTO, G. L. Powdered biosorbent from the mandacaru cactus (*cereus jamacaru*) for discontinuous and continuous removal of Basic Fuchsin from aqueous solutions. **Powder Technology**, 2020.
- GIBSON, A.C.; NOBEL, P.S. The cactus primer. **Harvard University Press**, Cambridge, MA, 1986.
- GIMENO-GARCÍA, E.; ANDREU, V.; BOLUDA, R. Heavy metals incidence in the application of inorganic fertilizers and pesticides to rice farming soils. **Environmental Pollution**, v. 92, n. 1, p. 19–25, 1996.
- GOMES, V.G.N.; QUIRINO, Z.G.M.; ARAUJO, H.F.P. Frugivory and seed dispersal by birds in *Cereus jamacaru* DC. ssp. *jamacaru* (Cactaceae) in the Caatinga of Northeastern Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 74, n. 1, p. 32–40, 2014.
- GOPAL, R.; DUBE, B.K.; SINHA, P.; CHATTERJEE, C. Cobalt toxicity effects on growth and metabolism of tomato. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 34, p. 619–628. 2003.

- GOWAYED, S.M., ALMAGHRABI, O.A. Effect of copper and cadmium on germination and anatomical structure of leaf and root seedling in maize (*Zea mays* L.). **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 7, p. 548–555, 2013.
- GUEDES, R.S.; ALVES, E.U.; GONÇALVES, E.P.; BRUNO, R.D.L.A.; BRAGA JÚNIOR, J.M.; MEDEIROS, M.S.DE. Germinação de sementes de *Cereus jamacaru* DC. em diferentes substratos e temperaturas. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, v. 31, n. 2, p. 159-164, 2009.
- GUZMÁN, U.; ARIAS, S.; DÁVILA, P. Catálogo de cactáceas mexicanas. **Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad**, México, 2003.
- GWOZDZ, E.A.; PRZYMUSINSKI, R.; RUCINSKA, R.; DECKERT, J. Plant cell responses to heavy metals: molecular and physiological aspects. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 19, p. 459–465, 1997.
- HAUSINGER, R.P. Nickel utilization by microorganisms. **Microbiological Reviews**, v. 51, p. 22 -42, 1987.
- HAWKES, S. J. What Is a “Heavy Metal”? **Journal of Chemical Education**, v. 74, n.11, p. 1374, 1997.
- HERAWATI, N.; SUZUKI, S.; HAYASHI, K.; RIVAI, I.F.; KOYOMA, H. Cadmium, copper and zinc levels in rice and soil of Japan, Indonesia and China by soil type. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 64, p. 33–39, 2000.
- HERNÁNDEZ, L.E.; COOKE, D.T. Modification of the root plasma membrane lipid composition of cadmium-treated *Pisum sativum*. **Journal of Experimental Botany**, v. 48, n. 7, p. 1375–1381, 1997.
- HUTCHINSON, T.C.; WHITBY, L.M. Heavy-metal Pollution in the Sudbury Mining and Smelting Region of Canada, I. Soil and Vegetation Contamination by Nickel, Copper, and Other Metals. **Environmental Conservation**, v. 1, n. 02, p. 123, 1974.
- KALITA, D.; SAIKIA, J.; MUKHERJEE, A.K.; DOLEY, R. An ethnomedicinal survey of traditionally used medicinal plants for the treatment of snakebite in Morigaon district of Assam, India. **International Journal of Medicinal and Aromatic Plants**, v. 4, n. 2, p. 97-106, 2014.
- KOVACEVIĆ, G., KASTORI, R., MERKULOV, L.J. Dry matter and leaf structure in young wheat plants as affected by cadmium, lead, and nickel. **Biologia Plantarum**, v. 42, p. 119–123, 1999.

- KOZLOW, M.V. Pollution resistance of mountain birch, *Betula pubescens* subsp. *czerepanovii*, near the copper-nickel smelter: natural selection or phenotypic acclimation? **Chemosphere**, v. 59, p. 189–197, 2005.
- KUPPER, H., LOMBI, E., ZHAO, F.J., WIESHAMMER, G., MCGRATH, S.P. Cellular compartmentation of nickel in the hyperaccumulators *Alyssum lesbiacum*, *Alyssum bertolonii* and *Thlaspi goesingense*. **Journal of Experimental Botany**, v. 52, p. 2291–3000, 2001.
- LACERDA, L.D. Global mercury emissions from gold and silver mining. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 97, p. 209–221, 1997.
- LEAL, I.R.; MACHADO, I.C.; LOPES, A.V.; TABARELLI, M. Plant-animal interactions in the Caatinga: Overview and perspectives. In: SILVA, J.M.C.; LEAL, I.R.; TABARELLI, M. (Eds.). Caatinga: The Largest Tropical Dry Forest region in South America. **Springer Verlag**, p. 255–278, 2017.
- Lenntech: Water Treatment and Air Purification. Heavy Metals. (2004). Disponível em <<https://www.lenntech.com/processes/heavy/heavy-metals/heavy-metals.htm>>. Acesso em: 18 mar. 2019.
- LUCENA, C.M.; CARVALHO, T.K.N.; MARÍN, E.A.; NUNES, E.N.N.; OLIVEIRA, R.S.; MELO, J.G.; CASAS, A.; LUCENA, R.F.P. Potencial medicinal de cactáceas en la región semiárida del Nordeste de Brasil. **Gaia Scientia** Ed. Esp. Populações Tradicionais, p. 36-50, 2014.
- LUCENA, C.M.; CARVALHO, T.K.N.; RIBEIRO, J.E.S.; QUIRINO, Z.G.M.; CASAS, A.; LUCENA, R.F.P. Conhecimento botânico tradicional sobre cactáceas no semiárido do Brasil. **Gaia Scientia** Ed. Esp. Cactaceae, v. 9, n. 2, p. 77-90, 2015.
- LUCENA, C.M.; COSTA, G.G.S.; CARVALHO, T.K.N.; GUERRA, N.M.; QUIRINO, Z.G.M.; LUCENA, R.F.P. Uso e conhecimento de cactáceas no município de São Mamede. **Revista de Biologia e Farmácia**, p. 1983-4209, 2012.
- LUCENA, C.M.; LUCENA, R.F.; COSTA, G.M.; CARVALHO, T.K.; COSTA, G.G.; ALVES, R.R.; PEREIRA, D.D.; RIBEIRO, J.E.S.; ALVES, C.A.B.; QUIRINO, Z.G.M.; NUNES, E.N. Use and knowledge of Cactaceae in Northeastern Brazil. **Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine**, v. 9, n. 1, p. 62, 2013.
- LUNA-MORALE, C.C.; AGUIRRE, J.R.R. Clasificación tradicional, aprovechamiento y distribución ecológica de la pitaya mixteca em México. **Interciencia**, v. 26, n.1, p. 18–24, 2001.

- MAFFEI, M.M.; MEREGALLI, M.; SCANNERINI, S. Chemotaxonomic significance of surface wax n-alkanes in the Cactaceae. **Biochemical Systematics and Ecology**, v. 25, p. 241-253, 1997.
- MAUSETH, J.D. Ontogenetic mechanisms and the evolution of Cactaceae. **Giornale Botanico Italiano**, v. 129, n. 1, p. 429–435, 1995.
- MEDEIROS, I.U.; MEDEIROS, R.A.; BORTOLIN, R.H.; QUEIROZ, F.M.; SILBIGER, V.N.; PFLUGMACHER, S.; SCHWARZ, A. Genotoxicity and pharmacokinetic characterization of *Cereus jamacaru* ethanolic extract in rats. **Bioscience Reports**, v. 39, n. 1, 2018.
- MEDEIROS, M.F.; ALBUQUERQUE, U. Food flora in 17th century northeast region of Brazil in Historia Naturalis Brasiliae. **Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine**, v. 10, n. 1, p. 50, 2014.
- MEIADO, M.V.; DE ALBUQUERQUE, L.S.C.; ROCHA, E.A.; ROJAS-ARÉCHIGA, M.; LEAL, I.R. Seed germination responses of *Cereus jamacaru* DC. ssp. *jamacaru* (Cactaceae) to environmental factors. **Plant Species Biology**, v. 25, n. 2, p. 120–128, 2010.
- MESSIAS, J.B.; CARACIOLO, M.C.M.; OLIVEIRA, I.M.; MONTARROYOS, U.R.; BASTOS, I.V.G.A.; GUERRA, M.O.G; SOUZA, I.A. Avaliação dos parâmetros hematológicos e bioquímicos de ratas no segundo terço da gestação submetidas à ação do extrato metanólico de *Cereus jamacaru* DC., Cactaceae. **Brazilian Journal of Pharmacognosy**, v. 20, n. 4, p. 478-483, 2010.
- MICHELON, W., JUNIOR, P.R., KNOBLAUCH, P.M., ROSA, G.A., MASS, A.P., VERONA, L., REIMERS, M.A., ENGEL, F., FONGARO, G., VIANCELLI, A. Cladodes applied as decentralized ecotechnology to improve water quality and health in remote communities that lack sanitation. **SN Applied Science**, v. 2, p. 149, 2020.
- MILDVAN, A.S. Metal in enzymes catalysis. In: BOYER, D.D. (ed) The enzymes. **Academic Press**, London, Vol. 11, p. 445–536, 1970.
- MITHOFER, A.; SCHULZE, B.; BOLAND, W. Biotic and heavy metal stress response in plants: evidence for common signals. **FEBS Letters**, v. 566, p. 1–5, 2004.
- MOLAS, J. Changes in morphological and anatomical structure of cabbage (*Brassica oleracea* L.) outer leaves and in ultrastructure of their chloroplasts caused by an in vitro excess of nickel. **Photosynthetica**, v. 34, p. 513–522, 1997.
- NAGAJYOTI, P.C.; LEE, K.D.; SREEKANTH, T.V.M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 8, p. 199–216, 2010.

- NASCIMENTO, V.T.; LUCENA, R.F.P.; MACIEL, M.I.S.; ALBUQUERQUE, U.P. Knowledge and Use of Wild Food Plants in Areas of Dry Seasonal Forests in Brazil. **Ecology of Food and Nutrition**, v. 52, n. 4, p. 317–343, 2013.
- NASCIMENTO, V.T.; MOURA, N.P.; SILVA VASCONCELOS, M.A.; MACIEL, M.I.S.; ALBUQUERQUE, U.P. Chemical characterization of native wild plants of dry seasonal forests of the semi-arid region of northeastern Brazil. **Food Research International**, v. 44, n. 7, p. 2112–2119, 2011.
- NAZIR, H., ASGHAR, H.N., ZAHIR, Z.A., AKHTAR, M.J., SALEEM, M. Judicious use of kinetin to improve growth and yield of rice in nickel contaminated soil. **International Journal of Phytoremediation**, v. 18, n. 7, p. 651–655, 2015.
- NAZIR, R., KHAN, M., MASAB, M., REHMAN, H., RAUF, N., SHAHAB, S., AMEER, N., SAJED, M., ULLAH, M., RAFEEQ, M., SHAHEEN, Z. Accumulation of heavy metals (Ni, Cu, Cd, Cr, Pb, Zn, Fe) in the soil, water and plants and analysis of physico-chemical parameters of soil and water collected from Tanda Dam kohat. **Journal of Pharmaceutical Sciences and Researched**, v. 7, p. 89-97, 2015.
- NICKEL INSTITUTE. End use of nickel. 2018. Disponível em <https://www.nickelinstitute.org/> . Acesso em 26 de janeiro de 2020.
- NOBEL, P. S. Cacti: Biology and Uses. **University of California: Berkeley**, California, 2002.
- OLDFIELD, S. (COMP.). Cactus and Succulent Plants. **IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK**, 1997.
- OUZOUNIDOU, G. Cu-ions mediated changes in growth, chlorophyll and other ion contents in a Cu-tolerant *Koeleria splendens*. **Biologia Plantarum**, v. 37, n. 1, p. 71–78, 1995.
- OYUELA LEGUIZAMO, M.A., FERNÁNDEZ GÓMEZ, W.D., SARMIENTO, M.C.G. Native herbaceous plant species with potential use in phytoremediation of heavy metals, spotlight on wetlands — A review. **Chemosphere**, v. 168, p. 1230–1247, 2017.
- PANDEY, N.; SHARMA, C.P. Effect of heavy metals Co^{2+} , Ni^{2+} and Cd^{2+} on growth and metabolism of cabbage. **Plant Science**, v. 163, n. 4, p. 753–758, 2002.
- PARRA, F.; BLANCAS, J.J.; CASAS, A. Landscape management and domestication of *Stenocereus pruinosus* (Cactaceae) in the Tehuacán Valley: human guided selection and gene flow. **Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine**, v. 8, v. 32, p. 1-17, 2012.
- PERALTA, J.R.; GARDEA-TORRESDEY, J.L.; TIEMANN, K.J.; GOMEZ, E.; ARTEAGA, S.; RASCON, E.; PARSONS, J.G. Uptake and Effects of Five Heavy Metals on Seed

- Germination and Plant Growth in Alfalfa (*Medicago sativa* L.). **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 66, n. 6, p. 727–734, 2001.
- PÉREZ-NEGRÓN, E.; DÁVILA, P.; CASAS A. Use of columnar cacti in the Tehuacan Valley, Mexico: perspectives for sustainable management of nontimber forest products. **Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine**, v. 10, n. 79, p. 1-16, 2014.
- POLLARD, A.J., POWELL, K.D., HARPER, H.A., SMITH, J.A.C. The genetic basis of metal hyperaccumulation in plants. **Critical Reviews in Plant Science**, v. 21, p. 539–566, 2002.
- POURRET, O., HURSTHOUSE, A. It's Time to Replace the Term "Heavy Metals" with "Potentially Toxic Elements" When Reporting Environmental Research. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 22, p. 4446, 2019.
- QAISAR, M., PING, Z., REHAN, S.M., EJAZ, I., RASHID, A.M., YOUSAF, H. Anatomical studies on water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) under the influence of textile wastewater. **Journal of Zhejiang University Science**, v. 6, p. 991–998, 2005.
- RABIER, J., LAFFONT-SCHWOB, I., NOTONIER, R., FOGLIANI, B., BOURAIMA-MADJEBI, S. Anatomical element localization by EDXS in *Grevillea exul* var. *exul* under nickel stress. **Environmental Pollution**, v. 156, p. 1156–1163, 2008.
- RAHMAN, H.; SABREEN, S.; ALAM, S. KAWAI, S. Effects of nickel on growth and composition of metal micronutrients in barley plants grown in nutrient solution. **Journal of Plant Nutrition** v. 28, p. 393–404, 2005.
- RAMANA, S., BISWAS, A.K., SINGH, A.B., AHIRWAR, N.K., SUBBA RAO, A. Tolerance of Ornamental Succulent Plant Crown of Thorns (*Euphorbia milli*) to Chromium and its Remediation. **International Journal of Phytoremediation**, v. 17, n. 4, p. 363–368, 2014.
- RASETHE, M.T.; SEMENYA, S.S.; POTGIETER, M.J.; MAROYI, A. The utilization and management of plant resources in rural areas of the Limpopo Province, South Africa. **Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine**, v. 9, n. 27, p. 1- 8, 2013.
- REEVES, R.D.; BAKER, A.J.M. Metal-accumulating plants. In: RASKIN, I.; ENSLEY, B.D. (eds) Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment. **Wiley**, New York, p. 193–229, 2000.
- ROQUE, A.A.; LOIOLA, M.I.B. Potencial de uso dos recursos vegetais em uma comunidade rural no semiárido potiguar. **Revista Caatinga**, v. 26, p. 88-98, 2013.
- ROWLEY, G.; KIMNACH, M. The New Cactus Lexicon. **Cactus and Succulent Journal**, v. 78, n. 6, p. 318–319, 2006.

- SANTOS, G.M.M.; CRUZ, J.D.; BICHARA FILHO, C.C.; MARQUES, O.M.; AGUIAR, C.M.L. Utilização de frutos de cactos (Cactaceae) como recurso alimentar por vespas sociais (Hymenoptera, Vespidae, Polistinae) em uma área de caatinga (Ipirá, Bahia, Brasil). **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 24, p. 1052-1056, 2007.
- SARWAR, N., IMRAN, M., SHAHEEN, M.R., ISHAQUE, W., KAMRAN, M.A., MATLOOB, A., REHIM, A., HUSSAIN, S. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. **Chemosphere**, v. 171, p. 710–721, 2017.
- SEAWARD, M.R.D.; RICHARDSON, D.H.S. Atmospheric sources of metal pollution and effects on vegetation. In: SHAW, A.J. (ed) Heavy metal tolerance in plants evolutionary aspects. **CRC Press**, Boca Raton, p. 75–94, 1990.
- SETIA, R.C., BALA, R. Anatomical changes in root and stem of wheat (*Triticum aestivum* L.) in response to different heavy metals. **Phytomorphology**, v. 44, p. 95–104, 1994.
- SHAHID, M., DUMAT, C., KHALID, S., SCHRECK, E., XIONG, T., NIAZI, N.K. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. **Journal of Hazardous Materials**, v. 325, p. 36–58, 2017.
- SHAHZAD, B., TANVEER, M., REHMAN, A., CHEEMA, S.A., FAHAD, S., REHMAN, S., SHARMA, A. Nickel; whether toxic or essential for plants and environment - A review. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 132, p. 641-651, 2018.
- SHALLARI, S.; SCHWARTZ, C.; HASKO, A.; MOREL, J.L. Heavy metals in soils and plants of serpentine and industrial sites of Albania. **Science of the Total Environment**, v. 19, n. 209, p. 133–142, 1998.
- SHEETAL, K.R., SINGH, S.D., ANAND, A., PRASAD, S. Heavy metal accumulation and effects on growth, biomass and physiological processes in mustard. **Indian Journal of Plant Physiology**, v. 21, n. 2, p. 219–223, 2016.
- SILVA, D.M.; CARVALHO, F.R.S.; MOURA, A.G.; MARTINS, L.; FERREIRA, P.M.T.; PERON, A.P. Cytotoxic action of the stem aqueous extract of the stem of *Cereus jamacaru* DC. (mandacaru). **Revista Cubana de Plantas Medicinales**, v. 19, n. 2, p. 226-234, 2015.
- SILVA, L.F.C.R.; VALLE, L.S.; NASCIMENTO, A.R.C.; MEDEIROS, M.F.T. *Cereus jamacaru* DC. (Cactaceae): From 17th century naturalists to modern day scientific and technological prospecting. **Acta Botanica Brasilica**, 2019.
- SOBARIU, D.L., FERTU, D.I.T., DIACONU, M., PAVEL, L.V., HLIHOR, R.-M., DRĂGOI, E.N., CURTEANU, S., LENZ, M., CORVINI, P.F.-X., GAVRILESCU, M.

Rhizobacteria and plant symbiosis in heavy metal uptake and its implications for soil bioremediation. **New Biotechnology**, v. 39, p. 125–134, 2017.

SOUZA, I.; LIMA, M.C.A.; MELO, U.B.C.; HIGINO, J.S. Antitumour properties of *Cereus jamacaru* on an experimental model of cancer in vivo. In Fundamental & Clinical Pharmacology 15 (Suppl. 1), **Wiley Online Library**, v. 5, p. 148, 2001.

SRESTY, T.V.S., RAO, K.V.M. Ultrastructural alterations in response to zinc and nickel stress in the root cells of pigeon pea. **Environmental and Experimental Botany**, v. 41, p. 3–13, 1999.

SWATHI, M., SINGH, A.S., ARAVIND, S., SUDHAKAR, P.K., GOBINATH, R., DEVI, D.S. Experimental studies on tannery wastewater using cactus powder as an adsorbent. **International Journal of Applied Science and Engineering Research**, v. 3, n. 2, p. 436–446, 2014.

TAUQEER, H. M., ALI, S., RIZWAN, M., ALI, Q., SAEED, R., IFTIKHAR, U., AHMAD, R., FARID, M., ABBASI, G.H. Phytoremediation of heavy metals by *Alternanthera bettzickiana*: Growth and physiological response. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 126, p. 138–146, 2016.

THAO, N.P., KHAN, M.I.R., THU, N.B.A., HOANG, X.L.T., ASGHER, M., KHAN, N., TRAN, L.-S.P. Role of ethylene and its cross talk with other signaling molecules in plant responses to heavy metal stress. **Plant Physiology**, v. 169, p. 73–84, 2015.

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D. Soil Fertility and Fertilizers. **The Macmillan Company**, New York, p. 48-49, 1984.

TORRE, D. Cactus. **Reaktion Books LTD**. 2017.

VATTA, A.F.; KANDU-LELO, C.; ADEMOLA, I.O.; ELOFF, J.N. Direct anthelmintic effects of *Cereus jamacaru* (Cactaceae) on trichostrongylid nematodes of sheep: *In vivo* studies. **Veterinary Parasitology**, v. 180, n. 3-4, p. 279–286, 2011.

VEIGA-BARBOSA, L.; GONZÁLEZ-BENITO, M.E.; ASSIS, J.G.A.; PÉREZ-GARCÍA, F. Germination and cryopreservation of several cactus species from NE Brazil. **Seed Science and Technology**, v. 38, n. 1, p. 218–224, 2010.

VILLALOBOS, S.; VARGAS, O.; MELO, S. Uso, manejo y conservación de “yosú”, *Stenocereus griseus* (Cactaceae), en la Alta Guajira Colombiana. **Acta Biologica Colombiana**, v. 12, n. 1, p. 99-112, 2007.

WELSH, S.L. Utah flora: Cactaceae. In: WOOD, S.L. (Ed.) The Great Basin Naturalist. **Brigham Young University**, v. 44, p. 52–69, 1984.

- WOJTASZEK, P. Oxidative burst: an early plant response to pathogen infection. **Biochemical Journal**, v. 322, p. 681–692, 1997.
- WUANA, R.A.; OKIEIMEN, F.E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. **International Scholarly Research Notices: Ecology**, v. 2011, 2011.
- YUSUF, M., FARIDUDDIN, Q., HAYAT, S., AHMAD, A. Nickel: An Overview of Uptake, Essentiality and Toxicity in Plants. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 86, n. 1, p. 1–17, 2011.
- ZAMBLE, D.B., ROWINSKA-ZYREK, M., KOZŁOWSKI, H. The Biological Chemistry of Nickel. **The Royal Society of Chemistry**, v. 10, 2017.
- ZANTHOPOLOUS, N.; ANTONIOU, V.; NIKOLAIDIS, E. Copper, zinc, cadmium and lead in sheep geazing in North Greece. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 62, p. 691–699, 1999.
- ZEITOUN, M.M., MEHANA, E.E. Impact of water pollution with heavy metals on fish health: overview and updates. **Global Veterinaria**, v. 12, n. 2, p. 219–231, 2014.
- ZHANG, F.Q.; WANG, Y.S.; LOU, Z.P.; DONG, J.D. Effect of heavy metal stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of two mangrove plant seedlings (*Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorhiza*). **Chemosphere**, v. 67, n. 1, p. 44–50, 2007.
- ZORNOZA, P.; ROBLES, S.; MARTIN, N. Alleviation of nickel toxicity by ammonium supply to sunflower plants. **Plant and Soil**, v. 208, n. 2, p. 221–226, 1999.

4- ARTIGO CIENTÍFICO

Artigo científico a ser encaminhado a Revista **Chemosphere**.

Todas as normas de redação e citação, doravante, atendem as estabelecidas pela referida revista, exceto o idioma.

Alterações Morfológicas e Fisiológicas em Plântulas de *Cereus jamacaru* DC Devido ao Estresse Causado Por Níquel

Morphological and Physiological Changes in Seedlings of *Cereus jamacaru* DC Due to Nickel Stress

Patrícia Menezes Costa Maciel¹, Paulo Henrique Oliveira de Miranda², Robson Lourenço da Silva Santos¹, Nielson Dinivan da Silva Brito¹, Janaina Renata da Silva¹, André Luiz Alves de Lima¹, Rogério de Aquino Saraiva^{1*}

¹Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Av. Gregório Ferraz Nogueira S/N, Serra Talhada - PE, Brasil; ²Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife – PE, Brasil.

*Autor correspondente. E-mail: rogerioaqsaraiva@hotmail.com, tel. +55 87 39293017

HIGHLIGHTS

- **Sulfato de Níquel aplicado em sementes de mandacaru afetam o sistema fisiológico e bioquímico das plântulas.**
- **Os efeitos são concentração-dependente, podendo acarretar na morte do indivíduo.**
- ***Cereus jamacaru* pode ser considerada uma planta sensível à metais pesados.**

GRAPHICAL ABSTRACT

RESUMO

Diversas atividades antropogênicas tem acarretado no acúmulo de metais pesados. O níquel, micronutriente essencial para plantas, participa de diversos processos metabólicos. Contudo,

dependendo de sua concentração, este pode vir a causar efeitos deletérios. Neste sentido, este trabalho teve por objetivo testar a toxicidade do sulfato de níquel em plântulas de *Cereus jamacaru*, espécie endêmica do Brasil e com importante potencial ecológico e removedor de substâncias tóxicas. Este trabalho teve por cultivadas em microambientes. Para isso, foram cultivadas plântulas de *C. jamacaru* em placas de Petri, avaliando os parâmetros de germinação, comprimento radicular e parte aérea, índice de vigor (IV), índice de tolerância (IT), pigmentos fotossintéticos e análises histoquímicas, em diferentes concentrações (0,0; 0,1; 0,5; 1,0; 5,0 e 10 mM) de NiSO₄. Dentre os parâmetros avaliados, todas as concentrações causaram efeitos tóxicos. O percentual de germinação foi reduzido apenas na maior concentração (12,66%), o comprimento radicular foi diminuído em até 96,72% e do cladódio em 83,02%. O IV e IT teve diminuições de 85,39% e 62,07%, respectivamente. Além disso, o conteúdo de clorofilas e carotenóides foram afetados negativamente, bem como ocorreu alterações no metabolismo de carboidratos e lipídeos.

Palavras-Chave: Contaminação ambiental; Ecotoxicologia; Jamacaru; Níquel; Toxicidade

ABSTRACT

Several anthropogenic activities have acceleration in the volume of heavy metals. Nickel, an essential micronutrient for plants, participates in several metabolic processes. However, depending on its concentration, it may cause deleterious effects. *Cereus jamacaru* DC (Cactaceae), popularly known as mandacaru, is native and endemic to Brazil with an important ecological role. The objective of this work was to analyze the toxicity of nickel sulfate in *C. jamacaru* seedlings grown in microenvironments. For this, *C. jamacaru* seedlings were cultivated in Petri dishes treated with different NiSO₄ concentrations (0.0, 0.1, 0.5, 1.0, 5.0 and 10 mM), evaluating the following parameters: germination, root and shoot length, vigor index (IV), tolerance index (IT), in addition to photosynthetic pigment content and anatomical and histochemical analyses. Among the evaluated parameters, all concentrations caused toxic effects, reducing the percentage of germination, root and cladode length, IV and IT, besides affecting the content of chlorophylls and carotenoids and causing changes in carbohydrate and lipid metabolism.

Keywords: Ecotoxicology; Environmental contamination; Jamacaru; Nickel; Toxicity

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a contaminação por elementos tóxicos atraiu a atenção global devido à sua toxicidade, abundância, persistência e o que suas consequências pode acarretar

tanto no ecossistema como na teia alimentar (Gopal et al., 2003; Yuan et al., 2011; Chen et al., 2015). Esta abordagem é fundamental, pois estes elementos tóxicos são importantes poluentes por razões ecológicas, nutricionais, ambientais e evolutivas (Lenntech Water Treatment and Air Purification, 2004). Naturalmente, estes metais (Cd, Cu, Zn, Hg, Pb, Ni, Cr, entre outros) podem ser encontrados em formações rochosas e distribuídos por toda crosta terrestre (Nagajyoti et al., 2010), entretanto com as ações antrópicas, como mineração e fundição de minérios, queima de combustíveis fósseis, pesticidas, pilhas e baterias (GAUR E ADHOLEYA, 2004) tem ocorrido acúmulo destes metais. Devido a todas essas fontes de contaminação, a parte mais preocupante e crítica é a migração desses contaminantes para áreas não contaminadas, elevando as concentrações ambientais de metais, através de poeira ou lixiviados pelo solo, contribuindo para a contaminação dos ecossistemas em geral (GAUR E ADHOLEYA, 2004; WUANA E OKIEIMEN, 2011).

O níquel é um micronutriente essencial para as plantas e desempenha papéis importantes em diversos processos metabólicos (Brown et al., 1987; Cakmak e Marschner, 1993). Contudo, em altas concentrações é capaz de apresentar toxicidade em plantas, causando diversos efeitos negativos em seu crescimento e desenvolvimento, através de alterações anatômicas e em processos bioquímicos e fisiológicos (Cakmak e Marschner, 1993; Zornoza et al., 1999; Benaková et al., 2017). Alguns exemplos destes efeitos são a redução na biomassa, no comprimento da raiz e na taxa de biossíntese de clorofila, bem como a redução da captação de Fe e seu translocamento para as folhas, do potencial hídrico e da taxa de transpiração, além disso são capazes de aumentar o tamanho do mesófilo, das células do periciclo nas pontas das raízes, da medula e diminuir os vasos condutores (Ouzounidou, 1995; Pandey e Sharma, 2002; Seregin e Kozhevnikova, 2006; Ahsan et al., 2019).

Por outro lado, as plantas possuem uma resposta primária quando expostas a altos níveis de elementos tóxicos. A primeira linha de defesa, são as barreiras físicas como cutícula espessa, tricomas e paredes celulares (Emamverdian et al., 2015). Para tolerar ou neutralizar a toxicidade, a principal maneira é a biossíntese de biomoléculas celulares, como glutatona, fitoquelatinas, citrato, flavanoides (Viehweger, 2014), carboidratos, grupos histidil e hormônios (Dalvi e Bhalerao, 2013). Algumas plantas são capazes de acumular e assim remover do substrato os elementos tóxicos (Muthusaravanan et al., 2018). No trabalho de Adki et al. (2012a), culturas celulares e plantas intactas de *Nopalea cochenillifera* (Cactaceae) transformaram vários corantes têxteis tóxicos, incluindo o vermelho HE7B, em metabólitos menos tóxicos e não perigosos. Ainda no mesmo ano, Adki et al. (2012b) colocaram *N.*

cochenillifera na lista de possíveis espécies fitorremediadoras, por ser uma hiperacumuladora de cromo (VI).

Cactáceas vivem em ambientes de condições extremamente xéricas sofrendo pressões seletivas e que adotaram várias estratégias fisiológicas e morfofisiológicas (Maffei et al., 1997). É uma planta com diversas utilidades para o homem, como combustível, para fins medicinais, alimentícios, artesanais (Luna-Morale e Aguirre, 2001) e ornamentais (Cruz e Casas, 2002). Além disso, possuem papéis importantes na manutenção das interações ecológicas (Carmona e Casas, 2005; Silva et al., 2019).

Cereus jamacaru DC é um cacto colunar, nativo e endêmico da Caatinga (Abud et al., 2013; Flora Do Brasil 2020). É uma das espécies mais representativas da vegetação da Caatinga no Brasil e amplamente distribuído nessa região, além disso é de grande importância para o desenvolvimento sustentável e a conservação da biodiversidade desse domínio (Alencar et al., 2012). É utilizada como planta ornamental, para forragem, infusões e extratos para tratamento de doenças respiratórias, digestivas e renais (Cavalcanti E Resende, 2004; Agra et al., 2007; Davet et al., 2009; Alencar et al., 2012). Além disso, alguns trabalhos revelam que espécies de cactáceas, incluindo *C. jamacaru* tiveram resultados significativos na remoção de algumas substâncias, como ferro, sulfato, nitrito, nitrato (Swathi et al., 2014; Michelin et al., 2020; Georgin et al., 2020) e de alguns elementos tóxicos, como cádmio, cromo, ferro, cobre, entre outros (Amari et al., 2020).

Embora as espécies de cactos sejam bem estudadas, existe algumas que são mais comumente pesquisadas e analisadas e algumas outras que não são tão encontradas na literatura, como é o caso de *C. jamacaru*, apesar de sua ampla utilização e que vem sendo apenas recentemente abordadas (Michelin et al., 2020). Portanto, o objetivo deste trabalho foi analisar os efeitos da toxicidade do sulfato de níquel (NiSO_4) no crescimento e desenvolvimento inicial de plântulas de *C. jamacaru*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material vegetal

As sementes de *Cereus jamacaru* utilizadas no experimento foram identificadas e fornecidas pelo Núcleo de Ecologia e Monitoramento Ambiental (NEMA) da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF) e pelo Projeto de Integração do São Francisco (PISF), Pernambuco, Brasil.

2.2 Reagentes e soluções

A acetona foi adquirida da VETEC (Brasil), o sulfato de níquel (NiSO_4) da Proquímios (Brasil) e a dimetilglioxima foi adquirida da Neon Comercial.

Foi preparado uma solução-mãe de sulfato de níquel em água destilada esterilizada. Desta solução-mãe (10 mM) foram realizadas diluições seriadas, cujas concentrações finais foram de 5 mM, 1 mM, 0,5 mM e 0,1 mM.

A solução de dimetilglioxima 1% (pH 8.4) foi preparada com etanol P.A, de acordo com o trabalho de Gramlich et al. (2011).

2.3 Germinação de plântulas de *Cereus jamacaru* expostas a diferentes concentrações de NiSO_4

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, com seis tratamentos e cada tratamento com quatro réplicas. Para isto, dentro de uma câmara de fluxo laminar, as sementes foram higienizadas com hipoclorito de sódio 1,25% por 5 min e, posteriormente, lavadas com água destilada esterilizada. A semeadura foi realizada em placas de Petri contendo duas folhas de papel filtro qualitativo como substrato, ambos previamente esterilizados em autoclave. Em cada placa, foi semeada 20 sementes e adicionados 3 mL de água destilada esterilizada, para o tratamento controle e 3 mL de solução de NiSO_4 nas concentrações 10 mM, 5 mM, 1 mM, 0,5 mM e 0,1 mM para os demais tratamentos. A germinação ocorreu em câmara de germinação do tipo B.O.D. (*Biochemical Oxygen Demand*) com fotoperíodo controlado de 12 h e temperatura de 25 ± 2 °C durante 20 dias.

2.4 Parâmetros físico-químicos das soluções usadas na germinação

Os valores de pH e condutividade elétrica (CE) foram mensurados a partir das soluções preparadas de NiSO_4 e da água destilada esterilizada, utilizada para o tratamento testemunha. A partir da condutividade elétrica foi determinado o potencial osmótico (Ψ_o), de acordo com Gonçalves et al. (2016), pela fórmula a seguir:

$$\Psi_o = - 0,36 * (CE/1000) * 0,1$$

A condutividade elétrica foi dada em dS/m e os resultados do potencial osmótico foram expressos em MPa.

2.5 Avaliação de indicadores biométricos de desenvolvimento das plântulas e de toxicidade

2.5.1. Germinação e índice de velocidade de germinação (IVG)

Diariamente, o número de sementes germinadas foi avaliado, adotando-se como critério de germinação a emergência da radícula e seu comprimento ≥ 1 mm (Vu et al., 2003). Também foi avaliado o índice de velocidade de germinação (MAGUIRE, 1962), determinado a partir da fórmula:

$$IVG = \sum_{i=1}^n \frac{ng_i}{i}$$

Onde, ng_i = número de sementes germinadas no dia “i” e i = dia observado.

2.5.2 Comprimento da radícula e do cladódio

Ao final do vigésimo dia, seis plântulas de cada réplica foram selecionadas para análise da morfometria linear, as quais foram fotografadas e mensuradas com auxílio do *software Image-Pro Plus*. Os dados foram expressos em cm.

2.5.3 Índice de tolerância ao níquel (IT)

A partir dos dados de germinação e do comprimento radicular e do cladódio, o índice de tolerância (IT) ao estressor foi calculado, de acordo com a fórmula de Turner e Marshall (1972):

$$IT_R = 1 + \log (Co/Ce)$$

$$IT_{Cd} = 1 + \log (Co/Ce)$$

Onde, IT_R = índice de tolerância radicular; IT_{Cd} = índice de tolerância do cladódio; Co = Comprimento observado (comprimento do grupo observado); Ce = Comprimento esperado (comprimento do grupo controle).

2.5.4 Índice de Vigor (IV)

A avaliação do índice de vigor (IV) foi realizado de acordo com a metodologia de Abdul-Baki e Anderson (1973), usando a seguinte fórmula:

$$IV = C_{cd} \times \% SG$$

Onde, IV = Índice de Vigor; C_{cd} = Comprimento do cladódio; % SG = percentual de germinação. Os resultados foram expressos em cm.

2.6 Determinação dos níveis de pigmentos fotossintetizantes (clorofila a, b, totais e carotenoides)

Para este ensaio, realizado de acordo com Lichtenhaler et al. (1987), dez plântulas de cada placa foram colocadas, dentro de tubos de ensaio, em contato com 5 mL de acetona 80%. Durante sete dias, os tubos foram mantidos em geladeira e protegidos da luz. Após o tempo de extração, alíquotas do extrato foram coletadas e lidas em espectrofotômetro nos comprimentos de onda de 470, 646,8 e 663,2 nm. As concentrações de clorofilas e de carotenoides (em $\mu\text{g.mL}^{-1}$) foram, então, calculadas por meio das seguintes fórmulas:

$$\text{Clorofila } a = C_a = 12,25 \cdot A_{663,2} - 2,79 \cdot A_{646,8}$$

$$\text{Clorofila } b = C_b = 21,50 \cdot A_{646,8} - 5,10 \cdot A_{663,2}$$

$$\text{Clorofilas totais} = C_{(a+b)} = 7,15 \cdot A_{663,2} + 18,71 \cdot A_{646,8}$$

$$\text{Carotenoides (xantofilas + carotenos)} = (1000 \cdot A_{470} - 1,82 \cdot C_a - 85,02 \cdot C_b) / 198$$

Os resultados são expressos na quantidade em µg de clorofilas ou carotenoides por plântulas analisadas em cada tratamento.

2.7 Análise Histoquímica

As plântulas foram fixadas em FAA 50 % (Formaldeído 37%, Álcool etílico 50 % e Ácido acético glacial) por 72h e estocadas em álcool 70 % (Johansen, 1940). Posteriormente, estas foram divididas em radícula e cladódio e emblocadas em resina sintética (kit Historesina - hidroxietilmetacrilato, Leica, Heidelberg). Os blocos foram colados em um suporte de madeira e, em seguida, foram seccionados com micrótomo semiautomático, com cortes de espessura de 5 µm. As amostras foram coradas com azul de toluidina, lugol e sudan III (Johansen, 1940).

Para detectar a presença do Ni nas plântulas de *C. jamaru*, secções transversais foram feitas à mão, com auxílio de uma lâmina de barbear, de raízes e cladódios de plântulas frescas. A solução de dimetilglioxima (DMG), reagente produtor de complexo Níquel-dimetilglioxima, foi adicionada aos cortes, os quais foram analisados e fotografados rapidamente. O tempo entre o preparo da lâmina e a fotografia foi mantido em no máximo 2 min, afim de evitar possível desidratação (Gramlich et al., 2011).

Todas as amostras foram analisadas quanto a presença ou ausência de amido, lipídeos e Ni pela microscopia óptica e fotografadas com câmera CMOS digital acoplada.

2.8 Análise estatística

Os dados foram expressos em média ± desvio padrão, quando apropriado e submetidos à análise de variância (ANOVA) de uma via seguidos do teste de Tukey. Em todas as análises, a diferença entre as médias foram consideradas significativas para $p < 0,05$.

3. RESULTADOS

3.1. Efeito da toxicidade de NiSO₄ nos diferentes avaliadores de desenvolvimento das plântulas de mandacaru

O número de sementes germinadas não foi afetado em nenhuma das concentrações testadas, exceto na concentração de 10 mM, a qual reduziu em 12,66% (Tabela 1). O número máximo de germinação ocorreu no 11º dia (após a semeadura) e o IVG não diferiu entre nenhum dos tratamentos (Tabela 1). O índice de tolerância para o cladódio diferiu significativamente apenas na concentração de 10 mM, com a tolerância reduzida em 62,07% (Tabela 1). Diferente do observado no cladódio, a radícula apresentou diferença significativa

entre todos os tratamentos (exceto entre 0,0 mM e 0,1 mM), cujas concentrações 0,5 mM, 1,0 mM, 5 mM e 10 mM ocasionaram uma redução da tolerância em 19,71%, 40,52%, 66,18% e 86,92%, respectivamente (fig. 1a). Para o índice de vigor, todos os tratamentos apresentaram diferenças significativas quando comparado ao controle, com reduções percentuais de 12,44; 29,14; 36,99; 63,69 e 85,39 nas concentrações 0,1 mM, 0,5 mM, 1,0 mM, 5 mM e 10 mM, respectivamente (fig. 1b).

Quanto a análise da morfometria linear em plântulas de *C. jamacaru* após 20 dias de germinação, o crescimento radicular não foi alterado na concentração de 0,1 mM. Por outro lado, as demais concentrações (0,5 mM, 1,0 mM, 5 mM e 10 mM) ocasionaram redução de 51,16%, 77,15%, 93,19% e 96,72%, respectivamente (fig. 2a). Nas análises do cladódio, todos os tratamentos apresentaram diferenças significativas, reduzindo o crescimento em 12,55%, 27,37%, 36,19%, 62,36% e 83,02%, nas concentrações 0,1 mM, 0,5 mM, 1,0 mM, 5,0 mM e 10 mM, respectivamente (fig. 2b). Na figura 3, é possível notar a diferença no comprimento das plântulas entre as concentrações testadas, principalmente, na maior concentração.

3.2. Características Físico-Químicas: pH, condutividade elétrica e potencial osmótico da solução de NiSO₄

O pH das soluções não diferiu significativamente. Por outro lado, a condutividade elétrica e o potencial osmótico apresentaram diferença significativa entre todas as soluções analisadas. Na figura 4a, é possível observar que a medida que as concentrações aumentam, a condutividade elétrica também cresce e o oposto ocorre com o potencial osmótico (fig. 4b), decaindo conforme aumenta a concentração de NiSO₄.

3.3. Efeito da toxicidade de NiSO₄ nos pigmentos fotossintetizantes em plântulas de mandacaru

O teores de clorofila a e b das plântulas tratadas com NiSO₄ a 5 mM foram reduzidos para 0,0550 µg/plântula e 0,0575 µg/plântula, respectivamente (Tabela 2), em comparação ao controle (3,703 µg/plântula e 2,130 µg/plântula, respectivamente), com redução das taxas percentuais de 98,51 e 97,30. O teor de clorofila total foi reduzido em 98,07% na concentração de 5 mM, quando comparado ao controle (5,833 µg/plântula) (Tabela 2).

Quanto ao conteúdo de carotenóides totais, as plântulas do controle exibiram 0,8550 µg/plântula. No entanto, quando NiSO₄ a 5 mM foi fornecido, a diminuição no teor de carotenóides foi de 91,81% (Tabela 2).

3.4. Características anatômicas e histoquímicas de plântulas de mandacaru tratadas com NiSO₄

As estruturas anatômicas observadas nas plântulas de mandacaru não tratadas e tratadas com NiSO_4 foram semelhantes entre si, constituído de três sistemas de tecidos: dérmico, fundamental e vascular. No corte transversal do cladódio, foi possível identificar a epiderme (com estômato), células do parênquima aquífero e os vasos condutores, xilema e floema (fig. 6b). Ao analisar o corte transversal da radícula, observou-se a epiderme, o córtex, periciclo e os vasos condutores (figura 6a). Analisando o cilindro vascular de cada um dos tratamentos, foi possível observar que este tendeu a aumentar conforme a concentração de NiSO_4 também aumenta, principalmente, na concentração de 5 mM (fig. 6c). Além disso, foi possível observar que, nesta mesma concentração, o diâmetro das células do parênquima diminuíram (fig. 6d).

Em relação a atividade do lugol e de sudan III nos tecidos vegetais, as amostras controle não apresentaram acúmulo de amido ou lipídeos, respectivamente, em suas células (fig. 6a e 7a). Entretanto, a medida em que os níveis de concentração de Ni foram sendo intensificados, manifestou-se um acúmulo de amido nas células vegetais (fig. 6b,c,d). Já o acúmulo de lipídeos foi observado apenas na maior concentração de NiSO_4 (5 mM), sendo observado presente nas paredes celulares (fig. 7b).

Nas plântulas do controle, o teste com dimetilglioxima para Ni foi negativo, ou seja, confirmando que essas não foram contaminadas pelo metal (fig. 8a e 9a). As amostras tratadas com 10 mM de NiSO_4 apresentaram coloração vermelha intensa tanto no cladódio quanto na radícula, demonstrando que há acúmulo de metal em ambos os órgãos (fig. 8b e 9b). No cladódio, o Ni é observado em todo corte, estando presente nos vasos condutores (xilema e floema) e na epiderme (fig. 8b). Quanto na radícula, observa-se presente na epiderme, no córtex e nos vasos condutores (fig 9b), revelando que o Ni estava presente, principalmente, no apoplasto e pouco no simplasto de vários tecidos radiculares.

4. DISCUSSÃO

O estudo apresentado aqui, mostra uma redução significativa no percentual de germinação das plântulas de mandacaru tratadas com NiSO_4 apenas na concentração de 10 mM. O trabalho de Léon et al. (2005) demonstra que o sulfato de níquel é o sal menos tóxico (entre cloreto de níquel e acetato de níquel) em relação a taxa de germinação, mas que ao analisar os mapas de distribuição de Ni na planta, observa-se que este encontra-se em maior quantidade no revestimento das sementes e em pouca no endosperma, mas que mesmo assim, interfere na distribuição parcial de minerais, o qual afeta a germinação e, conseqüentemente, o crescimento radicular. Ainda, existe a ideia de que as sementes possuem tecidos capazes de

selecionar a entrada de diferentes metais, o que explicaria a sua germinação mesmo em altas concentrações de NiSO_4 , mas os efeitos prejudiciais subsequente ao seu crescimento (Li et al., 2005).

Segundo Heydecker (1972), vigor é uma propriedade que desempenha um papel satisfatório com capacidade, após a germinação, de permitir que as plântulas cresçam rapidamente e bem. Em nosso estudo foi possível observar que o vigor foi reduzido em todos os tratamentos, principalmente, na maior concentração, a qual diminuiu o vigor das plântulas em mais de 80%. Parlak (2016) relata que este menor vigor observado nas plântulas ocasionado pelo Ni, é devido a sua capacidade de interferir nos processos metabólicos e bioquímicos, como a síntese de clorofilas e proteínas.

De acordo com Rout et al. (2000), a toxicidade exercida pelos metais pesados podem possuir diferentes níveis que afetam ou não a germinação e o crescimento e, ainda, diferentes órgãos. Como vimos neste trabalho, a tolerância, principalmente, da radícula foi diminuindo conforme as concentrações de Ni foram aumentando, isto também foi observado no trabalho de Madhaiyan et al. (2007) com plântulas de tomate. Estes resultados validam a afirmação de Archambault e Winterhalder (1995), que sugerem como parâmetro utilizar o crescimento radicular como um indicador de tolerância a metais. Além disso, trabalhos como o de Dalla Vecchia et al. (2005), demonstram que os metais são capazes de alterar a morfogenética de *Elodea canadensis*, através da inibição da divisão celular, aumentando o tamanho das células e alterando suas proporções, o que é uma característica estrutural, mas também funcional. Sendo assim, chegamos a conclusão que plântulas de mandacaru são sensíveis ao Ni, a partir da concentração 0,5 mM.

Corroborando a afirmação supracitada de Heydecker (1972), é possível observar uma correlação positiva entre o vigor e o crescimento do cladódio, ocorrendo uma depleção de ambos os índices com o aumento das concentrações de NiSO_4 . O mesmo foi visto por Ros et al. (2003) em plântulas de arroz sob estresse hídrico, cujo o baixo vigor e teor de nutrientes resultou em uma diminuição do crescimento da parte aérea. No trabalho de Parlak (2016), as concentrações de Ni (0 a $50 \mu\text{g.L}^{-1}$) inibiram o crescimento de plântulas de trigo, além do autor observar maior acúmulo de Ni nas raízes. Além disso, Cataldo et al. (1978) retratam que a raiz é capaz de regular a transferência do metal para a parte aérea, transferindo apenas de 3 a 9%, sendo assim, a maior parte do metal absorvido concentra-se neste órgão. Estes dados corroboram o observado em nosso trabalho, já que foi possível observar que as raízes tiveram uma diminuição considerável no crescimento. Assim, podemos sugerir que o sistema radicular

é o principal agente indicador de toxicidade de sulfato de níquel, já que se apresentou como o órgão mais afetado negativamente.

Os parâmetros físico-químicos possuem grande importância por fazerem parte do ambiente e serem necessários para a condução dos processos metabólicos, fisiológicos e bioquímicos. A condutividade elétrica, por exemplo, nos dá uma ideia sobre a concentração de eletrólitos e está relacionada à quantidade de minerais dissolvidos na água (Nazir et al., 2015). Segundo Van Ieperen (1996), quando a condutividade elétrica está alta e/ou o potencial osmótico está baixo, a disponibilidade de água nas raízes diminui. Nossos resultados demonstram justamente esse aumento e declínio em ambos os parâmetros e, como já citado, as raízes das plântulas de mandacaru diminuíram significativamente de tamanho, corroborando com nossos dados, esse mesmo autor (Van Ieperen, 1996) relata que alterações no déficit hídrico pode ocasionar inibição do crescimento vegetal.

Geralmente, as concentrações de pigmentos foliares diminuem nas plantas tratadas com metais pesados. Segundo Kupper et al. (1996), esses declínios nos pigmentos de clorofila acontece devido a substituição de Mg (magnésio) central da clorofila pelo metal pesado. Em nosso estudo, significativamente, apenas a maior concentração afetou o teor de clorofilas e carotenóides, indicando que as plântulas eram mais capazes de evitar a degradação da clorofila ou a regulação negativa da síntese de clorofila. Além disso, a degradação dos pigmentos fotossintéticos podem estar ligada a síntese de espécies reativas de oxigênio (EROs), ocasionadas pela presença do metal. Contudo, os carotenóides são potenciais antioxidantes, com importante papel na desintoxicação de EROs e na proteção dos fotossistemas contra danos (Palm et al., 2017).

De acordo com Mauseth (2006), a anatomia de cactos suculentos durante seu desenvolvimento é considerada relativamente simples, consistindo em feixes vasculares sitiado por grandes regiões de parênquima e camadas epidérmicas. Shi et al. (2010) relatam em seu estudo que metais pesados quando em maior concentração no cilindro vascular possuem um transporte ativo maior pelas raízes, o que pode explicar o porque das raízes serem tão fortemente afetadas. Além disso, trabalhos como o de Arduini et al. (1995) e Ambrosini et al. (2015) demonstram que o aumento do cilindro vascular de plantas tratadas com metal pesado ocorre comumente e que pode acarretar no aumento do diâmetro das raízes, o que as deixa em maior contato com o estressor e, conseqüentemente, afeta o tamanho do comprimento das mesmas.

Cactos adultos possuem parênquima com tecido de armazenamento de água especializado, em plântulas, como da espécie *Polaskia chichipe* e *Echinocactus*

platychantus, este também se apresenta (Rosas et al., 2012). Segundo Mauseth (1995), se algum estressor diminuir a taxa de ingestão de água, as paredes flexíveis do parênquima permitem que suas células liberem água, sendo assim, diminuem de diâmetro e passam o conteúdo de água diretamente para os tecidos fotossintéticos, não permitindo que este processo seja afetado negativamente (Mauseth, 1995). Em nosso estudo, observamos que apenas na concentração mais tóxica (5 mM), as plântulas tiveram seus teores de pigmentos fotossintéticos afetados.

Outro possível fator de toxicidade do Ni é a inibição do transporte de carboidratos. Segundo Greger et al. (1991), os metais pesados têm um efeito maior na redução do transporte de carboidratos do que na fotossíntese, causando um acúmulo de carboidratos nas folhas, como observado neste estudo. Já o trabalho de Sree et al. (2015) conta que este acúmulo se deve mais a inibição do crescimento das plantas em comprimento do que a inibição da fotossíntese, o que resulta em um excesso de carboidratos. Além disso, o acúmulo pode ser devido a inibição de enzimas que degradam o amido, ou seja, os metais são capazes de causar um desequilíbrio enzimático (Sree et al., 2015). A produção de lipídeos observada apenas em plântulas tratadas com metal pesado também foi observado por Schneider et al. (2013), que descrevem como um dos mecanismos das plantas de fitoproteção para maior tolerância ao estressor.

Assim como em nosso estudo, Seregin et al. (2003) observou em seu trabalho a presença de Ni nos protoplastos e nas paredes celulares de todas as células da endoderme, periciclo e cilindro vascular. De acordo com Redjala et al. (2010), a via apoplástica é mais importante em concentrações mais altas de Ni, enquanto que em baixas concentrações de Ni, as duas vias têm uma participação igual no transporte de Ni através da raiz. Neste estudo, as rotas utilizadas na radícula foram as vias simplásticas e apoplásticas, apresentando-se como uma melhor rota para absorção do Ni. Enquanto para o cladódio, a presença do Ni não indica preferência de rota para contaminação nos tecidos vegetais. Além disso, os autores supracitados ressaltam que o transporte de Ni não é restringido por barreiras fisiológicas, como a endoderme, nem tão pouco ao nível celular, como a membrana plasmática, cuja restringe a ingestão de metais pesados no cilindro vascular, transportados através do apoplasto. O que corrobora com nosso trabalho que observou a presença de níquel nos apoplastos e simplastos, além de ter afetado o tamanho do cilindro vascular.

Seregin et al. (2003) e Samantaray et al. (1997), trabalharam com milho e arroz, respectivamente, tratadas com níquel. Eles observaram que este metal inibe o crescimento de raízes laterais e relatam que isto é uma das características da toxicidade de Ni em comparação

a outros metais pesados. Em nosso estudo, observa-se que à medida em que a concentração de níquel aumenta, nota-se que as raízes laterais não crescem, o que nos leva a acreditar que o Ni também causa inibição nas plântulas de mandacaru (fig 3). Isto ocorre devido a presença de altos teores de Ni presentes na epiderme e no periciclo, o que ocasiona interrupção na divisão celular, resultando na inibição do crescimento radicular lateral (Seregin et al., 2003).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o presente trabalho, pode-se constatar que o NiSO_4 é capaz de induzir efeitos tóxicos nas plântulas de mandacaru. A germinação não ser afetada na maioria das concentrações testadas revela que as sementes possuem algum tecido que impede a entrada do estressor, contudo nota-se que os demais parâmetros, os quais foram avaliados após a germinação, foram todos afetados negativamente, principalmente, com as concentrações acima de 0,5 mM. Além da análise biométrica, a relação da condutividade elétrica e do potencial osmótico nos mostra que a raiz é o órgão mais afetado e pode ser considerado como o principal indicador de toxicidade do sulfato de níquel.

Ainda, podemos relatar que as plântulas de mandacaru são capazes de evitar degradação dos pigmentos fotossintéticos, mesmo em concentrações que afetaram significativamente outros parâmetros já vistos neste estudo, isso se dá também pela ação antioxidante que os carotenóides possuem e de proteção contra possíveis espécies reativas de oxigênio que são sintetizadas diante algum estressor. Além disso, a maior produção de lipídeos que ocorreu nas plântulas tratadas com o metal é capaz de agir como fitoprotetor.

Através de observações notou-se diminuições na quantidade de raízes laterais das plântulas, alguns estudos demonstram que este efeito é comum e característico do Ni. Outro ponto que podemos levantar é o possível efeito que o Ni acarreta nos processos enzimáticos. Aqui podemos notar apenas o acúmulo de amido e que isto pode significar um desequilíbrio enzimático, mas se faz necessário mais estudos para validar esta afirmação.

Neste estudo, ao avaliarmos os efeitos que o Ni causa em plântulas de mandacaru e que este pode vir causar a morte destas, só demonstra o quanto é preocupante a contaminação que o homem tem causado e que, infelizmente, tem um potencial muito alto de se propagar e atingir regiões mais interioranas através de sua dispersão pela atmosfera. Plantas com tamanha importância, como o mandacaru é para o próprio ser humano e para o ambiente podem estar condenadas devido as ações antropogênicas.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Pernambuco (FACEPE), e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão das bolsas aos pesquisadores envolvidos nesta pesquisa. Ao Núcleo de Ecologia e Monitoramento Ambiental (NEMA) da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF) pelo fornecimento das sementes de *C. jamacaru*. À UFRPE pelo Edital PRPPG 015/2018 (Apoio à pesquisa institucional da UFRPE). Ao Grupo de Instrumentação e Análise Química (GIAQ - UAST/UFRPE) e aos Programas de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação (PGBC - UAST/UFRPE) e de Produção Vegetal (PGPV – UAST/UFRPE).

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

7. CONFLITO DE INTERESSE

Os autores declaram não haver nenhum conflito de interesse.

8. REFERÊNCIAS

- Abdul-Baki, A.A., Anderson, J.D., 1973. Relationship Between Decarboxylation of Glutamic Acid and Vigor in Soybean Seed. *Crop Science*, 13, 2, 227.
- Adki, V.S., Jadhav, J.P., Bapat, V.A. 2012a. Exploring the phytoremediation potential of cactus (*Nopalea cochenillifera* salm Dyck.) cell cultures for textile dye degradation. *International Journal of Phytoremediation*, v. 14, n. 6, p. 554–569.
- Adki, V.S., Jadhav, J.P., Bapat, V.A. 2012b. *Nopalea cochenillifera*, a potential chromium (VI) hyperaccumulator plant. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 20, n. 2, p. 1173–1180.
- Ahsan, M., Younis, A., Jaskani, M.J., Tariq, U., Shaheen, M.R., Tufail, A., Sherani, J., Nawaz, F. 2019. Anatomical Changes in Stem of Scented *Rosa* spp. in Response to Heavy Metal Accumulation under Wastewater Treatment. *International Journal of Agriculture e Biology*, v. 21, p. 1159–1165.
- Alencar, N.L.M., Gomes-Filho, E., Innecco, R., 2012. *Cereus jamacaru* seed germination and initial seedling establishment as a function of light and temperature conditions. *Scientia Agricola*, 69, 1, 70-74.
- Ambrosini, V.G., Rosa, D.J., Corredor Prado, J.P., Borghezan, M., Bastos de Melo, G. W., Fonsêca de Sousa Soares, C.R., Comin, J.J., Simão, D.G., Brunetto, G. 2015. Reduction of

copper phytotoxicity by liming: A study of the root anatomy of young vines (*Vitis labrusca* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 96, 270–280.

Apel, K., Hirt, H., 2004. Reactive Oxygen Species: Metabolism, Oxidative Stress, and Signal Transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 55, 1, 373–399.

Archambault, D.J., Winterhalder, K. 1995. Metal tolerance in *Agrostis scabra* from the Sudbury, Ontario, area. *Canadian Journal of Botany*, 73, 5, 766–775.

Arduini, I., Godbold, D.L., Onnis, A. 1995. Influence of copper on root growth and morphology of *Pinus pinea* L. and *Pinus pinaster* Ait. seedlings. *Tree Physiology*, 15, 6, 411–415.

Benaková, M., Ahmadi, H., Ducaiová, Z., Tylová, E., Clemens, S., Tuma, J. 2017. Effects of Cd and Zn on physiological and anatomical properties of hydroponically grown *Brassica napus* plants. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 25, p. 20705–20716.

Britton, N.L., Rose, J.N., 1920. The Cactaceae: Descriptions and illustrations of plants of the cactus family. The Carnegie Institution of Washington, 2, 248, 8-9.

Brown, P.H., Welch, R.M., Cary, E.E., 1987. Nickel: A Micronutrient Essential for Higher Plants. *Plant Physiology*, 85, 3, 801–803.

Cakmak, I., Marschner, H., 1993. Effect of zinc nutritional status on activities of superoxide radical and hydrogen peroxide scavenging enzymes in bean leaves. *Plant and Soil*, 155-156, 1, 127–130.

Carmona, A., Casas, A., 2005. Management, phenotypic patterns and domestication of *Polaskia chichipe* (Cactaceae) in the Tehuacán Valley, Central Mexico. *Journal of Arid Environments*, 60, 1, 115–132.

Cataldo, D.A., Garland, T.R., Wildung, R.E., 1978. Nickel in Plants. *Plant Physiology*, 62, 566–570.

Cavalcanti, N.B., Resende, G.M., 2007. Efeito de Diferentes Substratos no Desenvolvimento de Mandacaru (*Cereus jamacaru* DC.), Facheiro (*Pilosocereus pachycladus* Ritter), Xiquexique (*Pilosocereus gounellei* (A. Webwr Ex K. Schum.) Bly. Ex Rowl.) e Coroa-de-Frade (*Melocactus bahiensis* Britton & Rose). *Revista Caatinga*, 20, 1, 28–35.

Chen, M., Xu, P., Zeng, G., Yang, C., Huang, D., Zhang, J. 2015. Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavy metals by composting: Applications, microbes and future research needs. *Biotechnology Advances*, v. 33, p. 745–755.

- Costa Moreira, J., 1996. Threats by heavy metals: human and environmental contamination in Brazil. *Science of The Total Environment*, 188, 61–71.
- Cruz, M., Casas, A., 2002. Morphological variation and reproductive biology of *Polaskia chende* (Cactaceae) under domestication in Central Mexico. *Journal of Arid Environments*, v. 51, n. 4, p. 561–576.
- Dalla Vecchia, F., Rocca, N.L., Moro, I., De Faveri, S., Andreoli, C., Rascio, N. 2005. Morphogenetic, ultrastructural and physiological damages suffered by submerged leaves of *Elodea canadensis* exposed to cadmium. *Plant Science*, v. 168, n. 2, p. 329–338.
- Dalvi, A.A., Bhalerao, S.A. 2013. Response of plants towards heavy metal toxicity: an overview of avoidance, tolerance and uptake mechanism. *Annals of Plant Sciences*, v. 2, n. 9, p. 362–368.
- Fatima, R.A., Ahmad, M., 2005. Certain antioxidant enzymes of *Allium cepa* as biomarkers for the detection of toxic heavy metals in wastewater. *Science of The Total Environment*, 346, 1-3, 256–273.
- Gallego, S.M., Benavídes, M.P., Tomaro, M.L., 1996. Effect of heavy metal ion excess on sunflower leaves: evidence for involvement of oxidative stress. *Plant Science*, 121, 2, 151–159.
- Georgin, J., Franco, D., Drumm, F.C., Grassi, P., Netto, M.S., Allasia, D., Dotto, G.L. 2020. Powdered biosorbent from the mandacaru cactus (*cereus jamacaru*) for discontinuous and continuous removal of Basic Fuchsin from aqueous solutions. *Powder Technology*.
- Gomes, V.G.N., Quirino, Z.G.M., Araujo, H.F.P., 2014. Frugivory and seed dispersal by birds in *Cereus jamacaru* DC. ssp. *jamacaru* (Cactaceae) in the Caatinga of Northeastern Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 74, 1, 32-40.
- Gonçalves, V.D., Coelho, M.F.B., Camili, E.C., Valentini, C.M.A. 2016. Allelopathic potential of *Inga laurina* leaf extract on lettuce seed germination. *Científica*, v. 44, n. 3, p. 333-337.
- Gopal, R., Dube, B.K., Sinha, P., Chatterjee, C., 2003. Cobalt toxicity effects on growth and metabolism of tomato. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 34, 619–628.
- Gramlich, A., Moradi, A.B., Robinson, B.H., Kaestner, A., Schulin, R. 2011. Dimethylglyoxime (DMG) staining for semi-quantitative mapping of Ni in plant tissue. *Environmental and Experimental Botany*, 71, 2, 232–240.
- Greger, M., Brammer, E., Lindberg, S., Larsson, G., Idestam-Almquist, J. 1991. Uptake and Physiological Effects of Cadmium in Sugar Beet (*Beta vulgaris*) Related to Mineral Provision. *Journal of Experimental Botany*, 42, 6, 729–737.

- Guedes, R.S., Alves, E.U., Gonçalves, E.P., Bruno, R.D.L.A., Braga Júnior, J.M., Medeiros, M.S.D., 2009. Germinação de sementes de *Cereus jamacaru* DC. em diferentes substratos e temperaturas. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 31, 2, 159-164.
- Herawati, N., Suzuki, S., Hayashi, K., Rivai, I.F., Koyoma, H., 2000. Cadmium, copper and zinc levels in rice and soil of Japan, Indonesia and China by soil type. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 64, 33–39.
- Heydecker, W. 1972. Vigour. In: EH Roberts, ed, *Viability of Seeds*, Chapman and Hall Ltd., London, 209-251.
- Johansen, D.A. *Plant microtechnique*. Bombay: Tata McGraw-Hill Book Company, p. 523. 1940.
- Küpper, H., Küpper, F., Spiller, M. 1996. Environmental relevance of heavy metal-substituted chlorophylls using the example of water plants. *Journal of Experimental Botany*, 47, 2, 259–266.
- Lenntech: Water Treatment and Air Purification. Heavy Metals. 2004. Disponível em <<https://www.lenntech.com/processes/heavy/heavy-metals/heavy-metals.htm>>. Acesso em: 18 mar. 2019.
- Léon, V., Rabier, J., Notonier, R., Barthelémy, R., Moreau, X., Bouraïma-Madjèbi, S., Viano, J., Pineau, R. 2005. Effects of Three Nickel Salts on Germinating Seeds of *Grevillea exul* var. *rubiginosa*, an Endemic Serpentine Proteaceae. *Annals of Botany*, 95, 4, 609–618.
- Li, W., Khan, M. A., Yamaguchi, S., Kamiya, Y., 2005. Effects of heavy metals on seed germination and early seedling growth of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Growth Regulation*, 46, 1, 45–50.
- Luna-Morale, C.C., Aguirre, J.R.R., 2001. Clasificación tradicional, aprovechamiento y distribución ecológica de la pitaya mixteca em México. *Interciencia*, 26, 1, 18–24.
- Madhaiyan, M., Poonguzhali, S., Sa, T. 2007. Metal tolerating methylotrophic bacteria reduces nickel and cadmium toxicity and promotes plant growth of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *Chemosphere*, 69, 2, 220–228.
- Maffei, M.M., Meregalli, M., Scannerini, S., 1997. Chemotaxonomic significance of surface wax n-alkanes in the Cactaceae. *Biochemical Systematics and Ecology*, 25, 241-253.
- Maguire, J.D., 1962. Speed of germination - aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop science*, 2, 176–177.
- Mauseth, J. D. 1995. Collapsible Water-Storage Cells in Cacti. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 122, 2, 145.

- Mauseth, J.D. 2006. Structure-Function Relationships in Highly Modified Shoots of Cactaceae. *Annals of Botany*, 98, 5, 901–926.
- Meiado, M.V., De Albuquerque, L.S.C., Rocha, E.A., Rojas-Aréchiga, M., Leal, I.R., 2010. Seed germination responses of *Cereus jamacaru* DC. ssp. *jamacaru* (Cactaceae) to environmental factors. *Plant Species Biology*, 25, 2, 120–128.
- Muthusaravanan, S., Sivarajasekar, N., Vivek, J.S., Paramasivan, T., Naushad, M., Prakashmaran, J., Gayathri, V., Al-Duaij, O.K. 2018. Phytoremediation of heavy metals: mechanisms, methods and enhancements. *Environmental Chemistry Letters*, v. 16, n. 4, p. 1339-1359.
- Nagajyoti, P.C., Lee, K.D., Sreekanth, T.V.M., 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 8, 199–216.
- Nazir, R., Khan, M., Masab, M., Rehman, H., Rauf, N., Shahab, S., Ameer, N., Sajed, M., Ullah, M., Rafeeq, M., Shaheen, Z. 2015. Accumulation of heavy metals (Ni, Cu, Cd, Cr, Pb, Zn, Fe) in the soil, water and plants and analysis of physico-chemical parameters of soil and water collected from Tanda Dam kohat. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Researched*, 7, 89-97.
- Ouzounidou, G., 1995. Cu-ions mediated changes in growth, chlorophyll and other ion contents in a Cu-tolerant *Koeleria splendens*. *Biologia Plantarum*, 37, 1, 71–78.
- Palm, E., Guidi Nissim, W., Giordano, C., Mancuso, S., Azzarello, E. 2017. Root potassium and hydrogen flux rates as potential indicators of plant response to zinc, copper and nickel stress. *Environmental and Experimental Botany*, 143, 38–50.
- Pandey, N., Sharma, C.P., 2002. Effect of heavy metals Co^{2+} , Ni^{2+} and Cd^{2+} on growth and metabolism of cabbage. *Plant Science*, 163, 4, 753–758.
- Parlak, U.K. 2016. Effect of nickel on growth and biochemical characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 76, 1–5.
- Ros, C., Bell, R.W., White, P.F. 2003. Seedling vigour and the early growth of transplanted rice (*Oryza sativa*). *Plant and Soil*, 252, 2, 325–337.
- Rosas, U., Zhou, R. W., Castillo, G., Collazo-Ortega, M. 2012. Developmental Reaction Norms for Water Stressed Seedlings of Succulent Cacti. *PLOS ONE*, 7, 3.
- Rout, G.R., Samantaray, S., Das, P. 2000. Effects of chromium and nickel on germination and growth in tolerant and non-tolerant populations of *Echinochloa colona* (L.) Link. *Chemosphere*, 40, 8, 855–859.
- Samantaray, S., Rout, G.R., Das, P. 1997. Tolerance of rice to nickel in nutrient solution. *Biologia Plantarum*, 40, 2, 295–298.

- Schneider, J., Labory, C.R.G., Rangel, W.M., Alves, E., Guilherme, L.R.G. 2013. Anatomy and ultrastructure alterations of *Leucaena leucocephala* (Lam.) inoculated with mycorrhizal fungi in response to arsenic-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 262, 1245–1258.
- Seregin, I.V., Kozhevnikova, A.D. 2006. Physiological role of nickel and its toxic effects on higher plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, v. 53, n. 2, p. 257–277.
- Seregin, I.V., Kozhevnikova, A.D., Kazyumina, E.M., Ivanov, V.B. 2003. Nickel Toxicity and Distribution in Maize Roots. *Russian Journal of Plant Physiology*, 50(5), 711–717.
- Shallari, S., Schwartz, C., Hasko, A., Morel, J.L., 1998. Heavy metals in soils and plants of serpentine and industrial sites of Albania. *Science of the Total Environment*, 19, 209, 133–142.
- Shi, J., Yuan, X., Chen, X., Wu, B., Huang, Y., Chen, Y. 2010. Copper Uptake and Its Effect on Metal Distribution in Root Growth Zones of *Commelina communis* Revealed by SRXRF. *Biological Trace Element Research*, 141, 1-3, 294–304.
- Silva, L.F.C.R., Valle, L.S., Nascimento, A.R.C., Medeiros, M.F.T., 2019. *Cereus jamacaru* DC. (Cactaceae): From 17th century naturalists to modern day scientific and technological prospecting. *Acta Botanica Brasilica*.
- Sree, K.S., Keresztes, Á., Mueller-Roeber, B., Brandt, R., Eberius, M., Fischer, W., Appenroth, K.J. 2015. Phytotoxicity of cobalt ions on the duckweed *Lemna minor* – Morphology, ion uptake, and starch accumulation. *Chemosphere*, 131, 149–156.
- Turner, R.C., Marshal, C., 1972. Accumulation of Zinc by sub-cellular fraction of root of *Agrotis tennis* Sibith in relation to Zinc tolerance. *New Phytologist*, 71, 671-676.
- Van Ieperen, W. 1996. Dynamic effects of changes in electric conductivity on transpiration and growth of greenhouse-grown tomato plants. *Journal of Horticultural Science*, 71, 3, 481–496.
- Veiga-Barbosa, L., González-Benito, M.E., Assis, J.G.A., Pérez-García, F., 2010. Germination and cryopreservation of several cactus species from NE Brazil. *Seed Science and Technology*, 38, 1, 218–224.
- Viehweger, K. 2014. How plants cope with heavy metals. *Botanical Studies*, v. 55, n. 35, p. 1–12.
- Vu, B.L., Satour, P., Leprince, O. 2003. The re-establishment of desiccation tolerance in germinated radicles of *Medicago truncatula* Gaertn. seeds. *Seed Science Research*, 13(4), 273–286.

- Yuan, G.L., Liu, C., Chen, L., Yang, Z. 2011. Inputting history of heavy metals into the inland lake recorded in sediment profiles: Poyang Lake in China. *Journal of Hazardous Materials*, v. 185, p. 336-345.
- Zanthopolous, N., Antoniou, V., Nikolaidis, E., 1999. Copper, zinc, cadmium and lead in sheep geazing in North Greece. *Bulletin Environmental Contamination Toxicology*, 62, 691–699.
- Zhang, F.Q., Wang, Y.S., Lou, Z.P., Dong, J.D., 2007. Effect of heavy metal stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of two mangrove plant seedlings (*Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorhiza*). *Chemosphere*, 67, 1, 44–50.
- Zornoza, P., Robles, S., Martin, N., 1999. Alleviation of nickel toxicity by ammonium supply to sunflower plants. *Plant and Soil*, 208, 2, 221–226.

TABELAS

Tabela 1. Percentual de sementes germinadas (%SG), índice de velocidade de germinação (IVG) e índice de tolerância do cladódio (IT_{Cd}) determinados durante a germinação e desenvolvimento inicial de plântulas de *Cereus jamacaru* DC expostas a diferentes concentrações de sulfato de níquel (NiSO₄) após 20 dias.

Tratamentos (NiSO ₄)	%SG (%)	IVG (dia ⁻¹)	IT _{Cd}
0 mM	98,75±2,5 ^a	3,826±0,3503 ^a	1,602±0,0066 ^a
0,1 mM	98,75±2,5 ^a	3,937±0,5333 ^a	1,542±0,0424 ^a
0,5 mM	96,25±2,5 ^a	3,563±0,2059 ^a	1,463±0,0130 ^a
1,0 mM	97,50±5,0 ^a	4,016±0,3406 ^a	1,406±0,0360 ^a
5,0 mM	95,0±7,07 ^a	4,022±0,35 ^a	1,172±0,0791 ^{ab}
10 mM	86,25±2,5 ^b	3,358±0,7667 ^a	0,6076±0,7019 ^b

Média ± - Desvio Padrão. Os números seguidos por letras iguais na mesma coluna não diferem significativamente (p < 0,05) pela ANOVA de uma via seguida pelo teste de Tukey.

Tabela 2. Teor de pigmentos fotossintéticos (clorofila a, clorofila b, clorofilas totais e carotenóides totais). em plântulas de *Cereus jamacaru* DC tratadas com diferentes concentrações de NiSO₄ após 20 dias.

Tratamentos (NiSO ₄)	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila Total	Carotenóides
0 mM	3,703±0,5173 ^a	2,130±0,3872 ^a	5,833±0,9003 ^a	0,8550±0,1634 ^a
0,1 mM	3,920±1,583 ^a	2,220±0,6981 ^a	6,140±2,274 ^a	0,8700±0,3498 ^a
0,5 mM	2,505±0,2887 ^a	1,418±0,1567 ^a	3,925±0,4397 ^a	0,5775±0,0573 ^a
1,0 mM	2,618±0,8196 ^a	1,415±0,5058 ^a	4,030±1,318 ^a	0,5675±0,1648 ^a
5,0 mM	0,0550±0,0568 ^b	0,0575±0,0250 ^b	0,1125±0,0801 ^b	0,0700±0,0081 ^b
10 mM*	-	-	-	-

Média ± Desvio Padrão. Os números seguidos por letras iguais na mesma coluna não diferem significativamente (p < 0,05) pela ANOVA de uma via seguida pelo teste de Tukey. *Dados indisponíveis.

FIGURAS

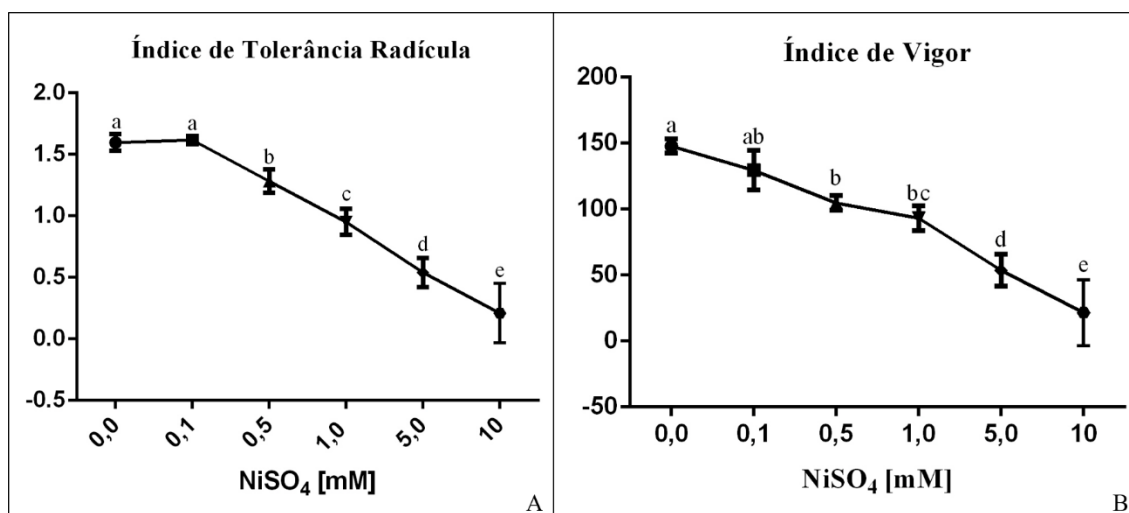


Figura 1. Índices de avaliação de crescimento e desenvolvimento de plântulas de *Cereus jamacaru* DC submetidas a diferentes concentrações de NiSO₄ durante 20 dias. (A) Índice de tolerância (IT) radicular e (B) índice de vigor (IV). Letras iguais não diferem significativamente ($p > 0,05$).

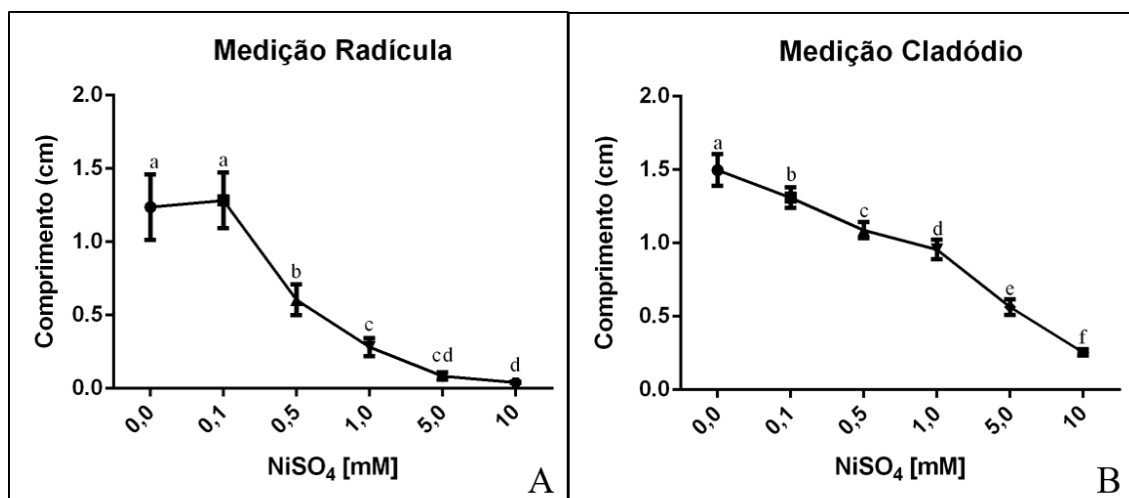


Figura 2. Morfometria linear (A) da radícula e (B) do cladódio de plântulas de *Cereus jamacaru* DC tratadas com diferentes concentrações de NiSO₄. Cada ponto da curva representa a média $\pm$ DP de seis plântulas de quatro réplicas. Letras iguais não diferem significativamente para $p > 0,05$ (ANOVA de uma via seguida do teste de Tukey).

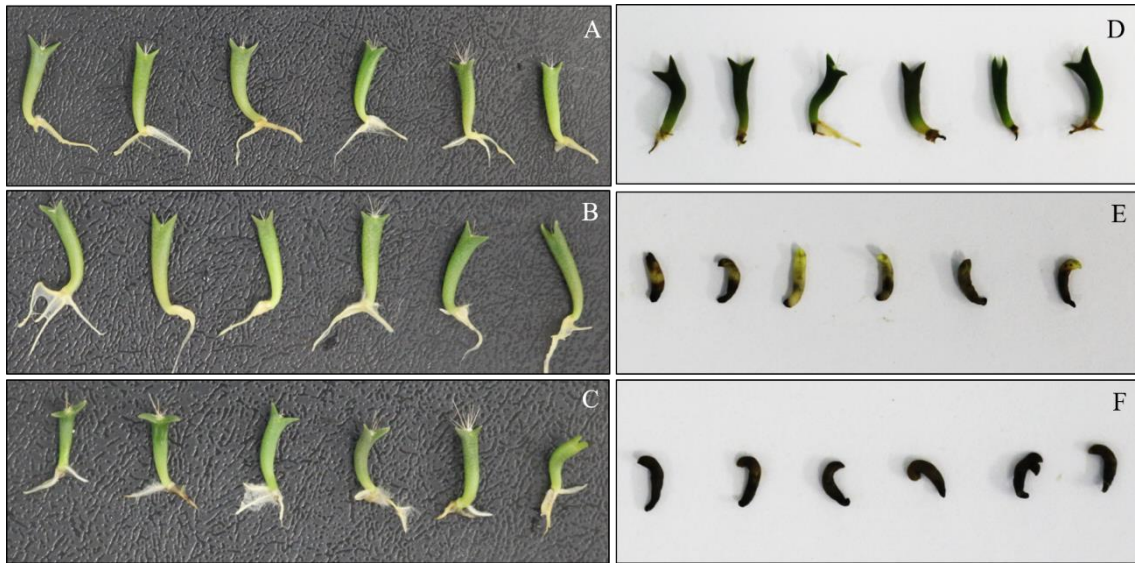


Figura 3. Plântulas de *Cereus jamacaru* DC tratadas nas concentrações de NiSO_4 (A) 0,0 mM; (B) 0,1 mM; (C) 0,5 mM; (D) 1,0 mM; (E) 5,0 mM e (F) 10 mM de NiSO_4 . As seis plântulas evidenciadas são representativas de 4 réplicas.

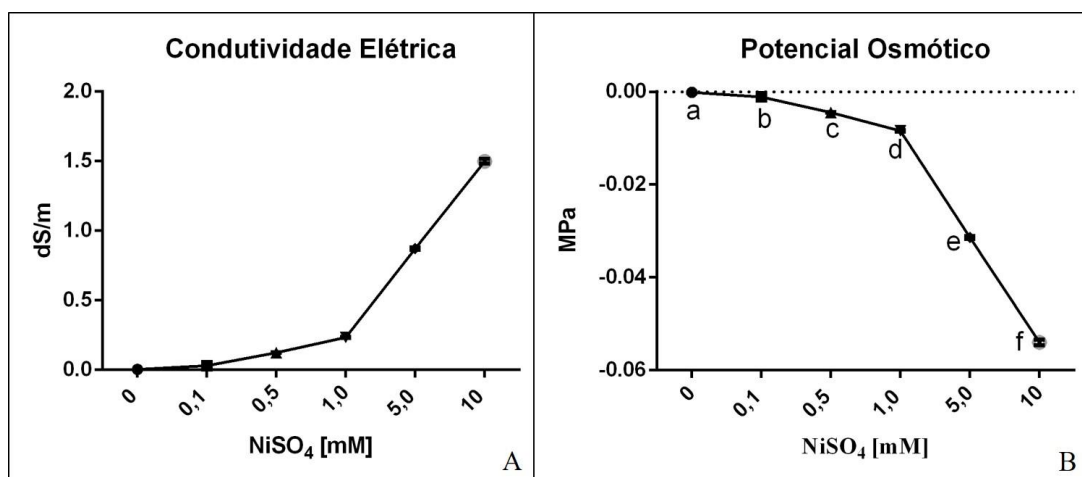


Figura 4. Características físico-químicas de soluções de NiSO_4 . (A) condutividade elétrica e (B) potencial osmótico. Letras iguais não diferem significativamente para $p > 0,05$ (ANOVA de uma via seguida do teste de Tukey).

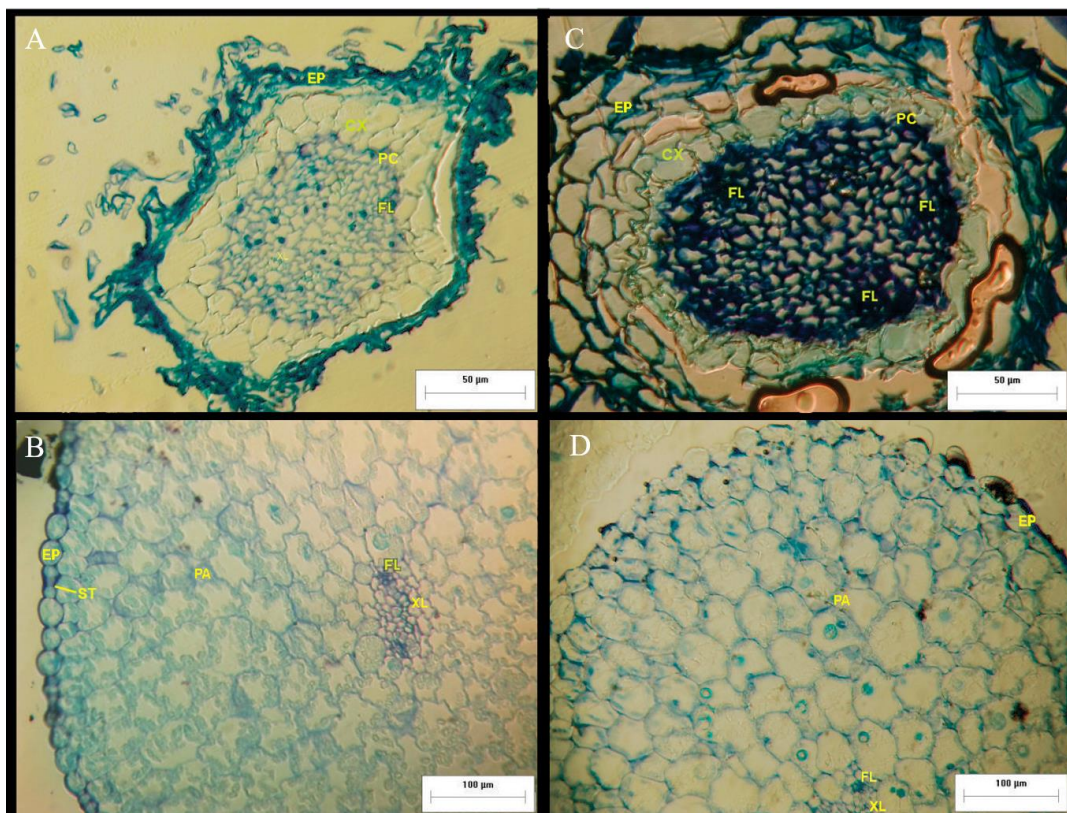


Figura 5. Cortes histológicos transversais da radícula e cladódio de plântulas de *Cereus jamacaru* DC cultivadas em microambiente após 20 dias expostas a água destilada (controle) ou NiSO_4 , corados com azul de toluidina (Aumento: 50x). As secções transversais dos cladódios e das raízes foram obtidas a 1,5 cm e 1 cm acima da base, respectivamente. (A) Radícula de plântula controle (tratada com água destilada); (B) Cladódio de plântula controle (tratada com água destilada); (C) Radícula de plântula tratada com NiSO_4 na concentração 5 mM; (D) Cladódio de plântula tratada com NiSO_4 na concentração de 5 mM. EP – epiderme; CX – córtex; PC – periciclo; XL – xilema; FL – Floema; ST – estômato; PA – parênquima Aquífero. Figuras representativas da amostra geral.

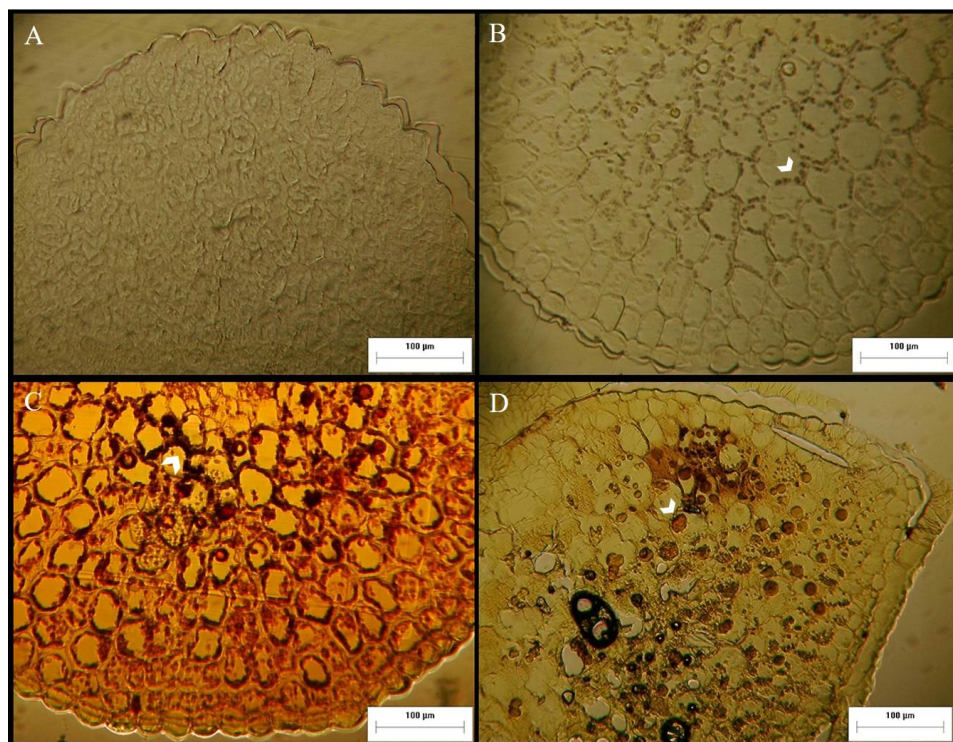


Figura 6. Cortes histológicos transversais do cladódio de plântulas de *Cereus jamacaru* DC cultivadas em microambiente após 20 dias expostas a água destilada (controle) ou NiSO_4 , corados com lugol (Aumento: 50x). As secções transversais dos cladódios foram obtidas a 1,5 cm. Cortes transversais dos cladódios de *C. jamacaru* da amostra controle 0,0 mM (A) e das amostras tratadas com NiSO_4 0,5 mM (B), 1,0 mM (C) e 5,0 mM (D). O corante utilizado, lugol, marca em preto os grãos de amido, demonstrados pela setinha branca (►).

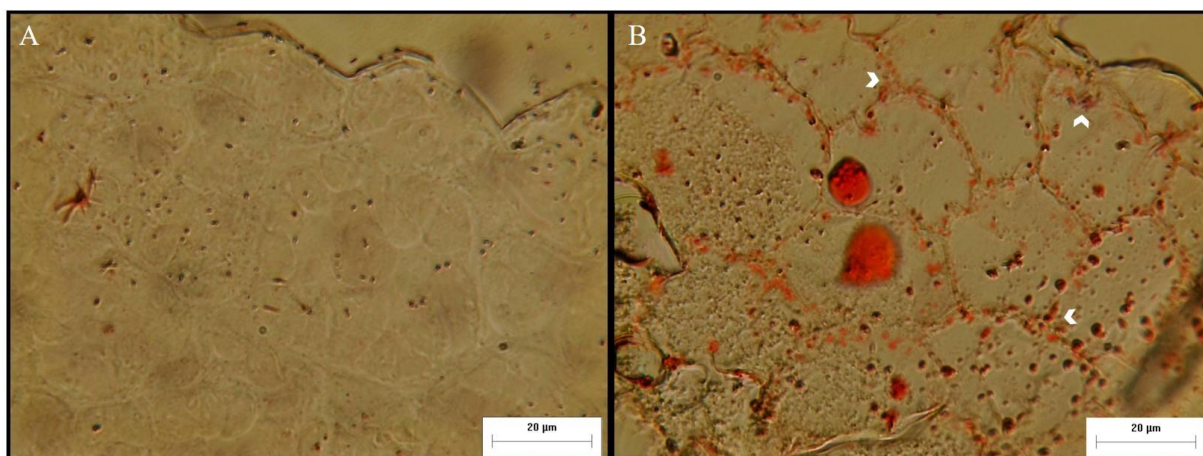


Figura 7. Cortes histológicos transversais do cladódio de plântulas de *Cereus jamacaru* DC cultivadas em microambiente após 20 dias expostas a água destilada (controle) ou NiSO_4 , corados com sudan III (Aumento: 50x). As secções transversais dos cladódios foram obtidas a 1,5 cm acima da base. Cortes transversais dos cladódios de *C. jamacaru* da amostra controle

0,0 mM (A) e da amostra tratada com 5,0 mM (B) de NiSO_4 . O corante utilizado, sudan III, marca em vermelho roseado gotículas de lipídeos, demonstrados pela setinha branca (►), presentes nas paredes das células vegetais.

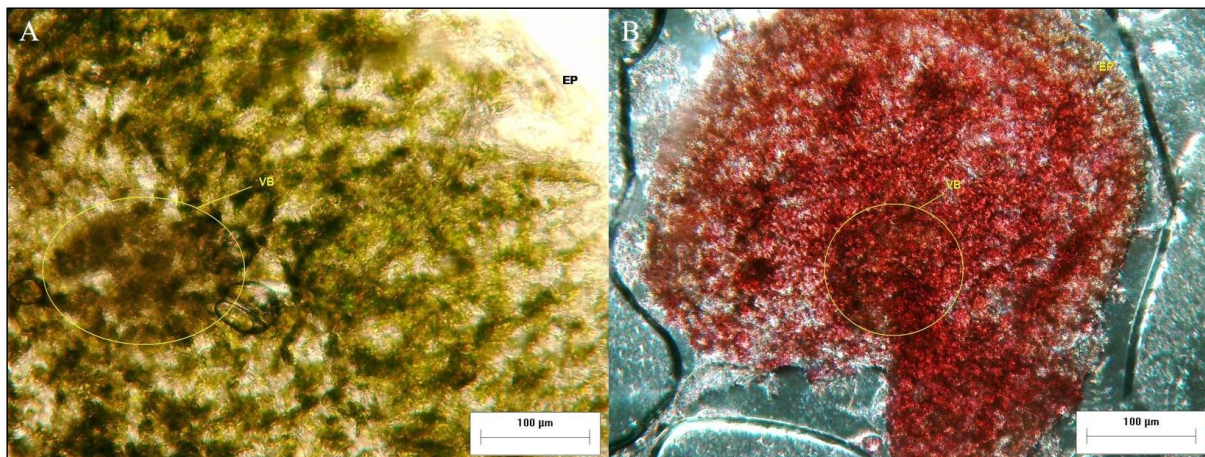


Figura 8. Cortes histológicos transversais à mão livre de cladódios de plântulas de *Cereus jamacaru* cultivadas em microambiente após 20 dias expostas a água destilada (controle) ou NiSO_4 , corados com dimetilglioxima (DMG) (Aumento: 50x). (A) amostra controle 0,0 mM e (B) amostra tratada com 10 mM de NiSO_4 . A solução dimetilglioxima (DMG) reage com o níquel formando um complexo DMG-Ni, corando em vermelho as estruturas celulares que foram expostas ao Ni. EP – epiderme; VB – feixes vasculares.

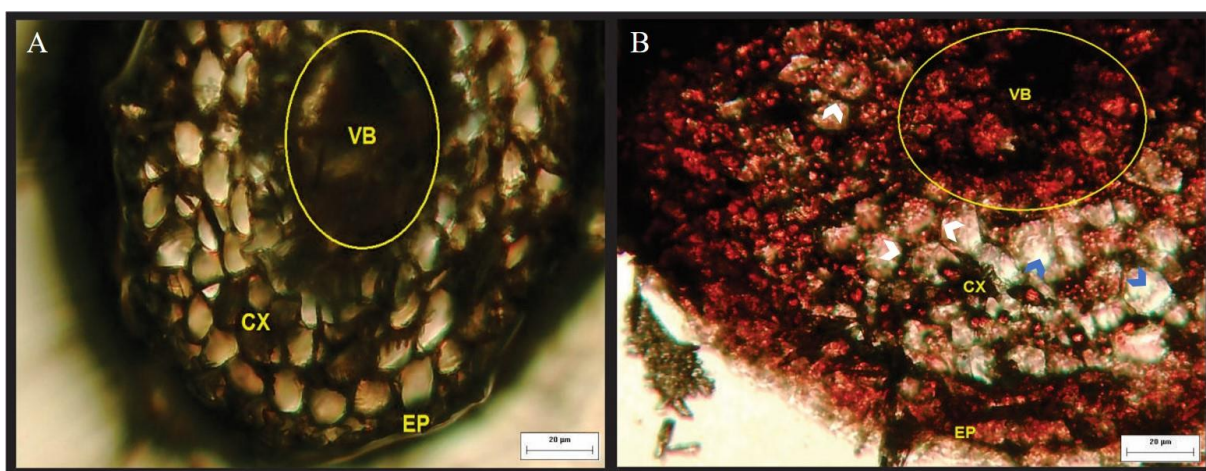


Figura 9. Cortes histológicos transversais à mão livre da radícula de plântulas de *Cereus jamacaru* cultivadas em microambiente após 20 dias expostas a água destilada (controle) ou NiSO_4 , corados com dimetilglioxima (DMG) (Aumento: 50x). (A) amostra controle 0,0 mM e (B) amostra tratada com 10 mM de NiSO_4 . A DMG reage com o níquel formando um

complexo DMG-Ni, corando de vermelho as células que foram expostas ao Ni. EP – epiderme; VB – feixes vasculares; CX - córtex. As setinhas (➡) destacam a presença do níquel no simplasto, já as setinhas brancas (⬜) demonstram a preferência do Ni pela via apoplástica.

Declaração Sobre Plágio

Eu, Patrícia Menezes Costa Maciel, autor(a) da dissertação intitulada “**EFEITO TÓXICO DO SULFATO DE NÍQUEL EM PLÂNTULAS DE *Cereus jamacaru* DC CACTACEAE**”, vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação da Unidade Acadêmica de Serra Talhada da Universidade Federal Rural de Pernambuco, declaro que:

- O trabalho de pesquisa apresentada nesta dissertação, exceto onde especificado, representa uma pesquisa original desenvolvida por mim;
- Esta dissertação não contém material escrito ou dados de terceiros, de qualquer fonte bibliográfica, a menos que devidamente citada e referenciada no item “Referências Bibliográficas”.

Serra Talhada, 17 de Janeiro de 2020

(assinatura)