



---

Universidade Federal de Viçosa

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA  
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE  
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA VEGETAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FISIOLOGIA VEGETAL**

**METABOLISMO ANTIOXIDATIVO E FOTOSSINTÉTICO DE *Pereskia aculeata*  
MILL. (CACTACEAE) SUBMETIDA AO ARSÊNIO**

**VIÇOSA – MG, BRASIL  
2024**



Universidade Federal de Viçosa

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA  
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE  
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA VEGETAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FISIOLOGIA VEGETAL**

**METABOLISMO ANTIOXIDATIVO E FOTOSSINTÉTICO DE *Pereskia aculeata*  
MILL. (CACTACEAE) SUBMETIDA AO ARSÊNIO**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Viçosa, conforme exigência do Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal, para obtenção do título de *Magister Science*.

Mestranda: Laís Manço Neves Frattini

Orientador: Juraci Alves de Oliveira

Coorientador: Paulo Henrique Pereira Peixoto

**VIÇOSA – MG, BRASIL  
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

F844m  
2024  
Frattoni, Laís Manço Neves, 1997-  
Metabolismo antioxidativo e fotossintético de *Pereskia aculeata* Mill. (Cactaceae) submetida ao arsênio / Laís Manço Neves Frattini. – Viçosa, MG, 2024.  
1 dissertação eletrônica (41 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Juraci Alves de Oliveira.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Biologia Vegetal, 2024.  
Referências bibliográficas: f. 30-41.  
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.578>  
Modo de acesso: World Wide Web.

1. *Pereskia aculeata* - Efeito do arsênio. 2. Plantas alimentícias não convencionais. 3. Segurança alimentar. 4. Minas e recursos minerais. I. Oliveira, Juraci Alves de, 1965-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Biologia Vegetal. Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal. III. Título.

CDD 22. ed. 583.5


**LAÍS MANÇO NEVES FRATTINI**

**METABOLISMO ANTIOXIDATIVO E FOTOSSINTÉTICO DE *Pereskia aculeata*  
MILL. (CACTACEAE) SUBMETIDA AO ARSÊNIO**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Viçosa, conforme exigência do Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal, para obtenção do título de *Magister Science*.


APROVADA: 28 de junho de 2024.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente  
 LAIS MANÇO NEVES FRATTINI  
Data: 19/09/2024 22:52:12-0300  
Verifique em <https://validar.itf.gov.br>

---

Laís Manço Neves Frattini  
Autora

Documento assinado digitalmente  
 JURACI ALVES DE OLIVEIRA  
Data: 19/09/2024 09:20:11-0300  
Verifique em <https://validar.itf.gov.br>

---

Juraci Alves de Oliveira  
Orientador

Dedico aos meus avós, Maria Aparecida e Antônio, aos meus pais, Cláudia e Leandro, e ao meu marido Pedro Henrique que estiveram presentes nesta conquista.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que contribuíram de alguma forma para a realização desta dissertação.

Primeiramente, agradeço à minha família, pelo amor incondicional, paciência e encorajamento ao longo de todos os anos de estudo. Em especial, agradeço aos meus avós, Maria Aparecida e Antônio, e aos meus pais, Cláudia e Leandro, por sempre acreditarem em mim e me apoiarem em todas as minhas decisões, abdicando de seus sonhos e desejos para que pudessem me auxiliar na busca dos meus.

Ao meu orientador, Juraci A. de Oliveira, e ao meu coorientador, Paulo Henrique Peixoto, pela orientação constante, paciência, e valiosas contribuições ao longo deste trabalho. A dedicação e expertise desses mestres foram fundamentais para a construção deste estudo.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós Graduação em Fisiologia Vegetal, por fornecer os recursos necessários e um ambiente propício para a realização da pesquisa. Agradeço também ao corpo docente, funcionários, e aos amigos do laboratório, pelo apoio técnico, intelectual e moral durante os momentos mais desafiadores, vocês foram essenciais nessa trajetória, a minha família Biofísica! Um agradecimento especial ao meu marido e amigo de laboratório, Pedro Henrique Santos Neves. Sua parceria, tanto profissional quanto pessoal, foi inestimável. Agradeço por seu apoio constante, compreensão nos momentos difíceis e por compartilhar essa jornada científica comigo. Sua presença tornou os desafios mais leves e os sucessos mais gratificantes.

Às Mis, à minha amiga de infância, Isabella Martins, e em especial, meus amigos da Biofamília, que me auxiliaram, contribuíram direta e indiretamente com palavras de incentivo e compreensão nos momentos desafiadores e de dificuldade. Vocês foram fundamentais nessa trajetória.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, mesmo que seus nomes não estejam aqui mencionados. A todos, meu sincero agradecimento.

## RESUMO

FRATTINI, Lais Manço Neves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2024. **Metabolismo antioxidativo e fotossintético de *Pereskia aculeata* Mill. (cactaceae) submetida ao arsênio.** Orientador: Juraci Alves de Oliveira. Coorientador: Paulo Henrique Pereira Peixoto.

No estado de Minas Gerais está localizada uma das principais áreas de extração mineral do Brasil, o que garante a geração de bens de consumo, empregos e um grande impacto econômico e social. Porém, a mineração de ouro, especificamente, é uma das formas antrópicas de mobilização do arsênio (As), um metaloide altamente tóxico, que, ao ser liberado no ambiente, pode contaminar a cadeia alimentar e afetar diretamente os moradores de áreas contaminadas, como é o caso do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. Nessa região é comum o consumo de plantas da espécie *Pereskia aculeata*, uma cactácea rica em nutrientes e minerais, classificada como planta alimentícia não convencional (PANC). Embora tenha muitos estudos no que tange à sua composição nutricional, não há pesquisas quanto à fisiologia e tolerância dessas plantas ao As. Para tanto, plantas de *P. aculeata* Mill. foram cultivadas em substrato e expostas por 5 dias a concentrações de 1, 2 e 4  $\mu\text{g g}^{-1}$  de arsenato ( $\text{As}^{\text{V}}$ ), em casa de vegetação, visando avaliar as alterações no metabolismo oxidativo e na fotossíntese. Plantas expostas ao As apresentaram alteração na concentração dos pigmentos cloroplastídicos, alteração da atividade de enzimas do sistema antioxidante enzimático, tais como dismutase do superóxido (SOD) e catalase (CAT), aumento nos danos oxidativos em membranas, evidenciado pelo incremento nos teores de malondialdeído, além de danos no aparato fotossintético, confirmando o potencial tóxico deste metaloide.

**Palavras-chave:** mineração; segurança alimentar; ora-pro-nóbis; PANC (Plantas alimentícias não convencionais); poluição.

## ABSTRACT

FRATTINI, Lais Manço Neves, M.Sc., Federal University of Viçosa, June 2024. **Alterations in the antioxidant and photosynthetic metabolism of *Pereskia aculeata* Mill. (cactaceae) subjected to arsenic.** Advisor: Juraci Alves de Oliveira. Coadvisor: Paulo Henrique Pereira Peixoto.

One of the main mineral extraction areas in Brazil is located in the state of Minas Gerais, which guarantees the generation of consumer goods, jobs and a great economic and social impact. However, mining is one of the anthropogenic ways of mobilizing arsenic (As), a highly toxic metalloid, which, when released into the environment, can contaminate the food chain and directly affect residents of contaminated areas, such as the Quadrilátero Ferrífero. In these municipalities, it is common to consume plants of the *Pereskia aculeata* species, a cactus rich in nutrients and minerals, classified as an unconventional food plant (PANC). Although there are many studies regarding their nutritional composition, there is no research into the physiology and tolerance of these plants to As. To this end, *P. aculeata* Mill plants were grown in substrate and exposed for 5 days to concentrations of 1, 2 and 4  $\mu\text{g g}^{-1}$  of As<sup>v</sup> arsenate in a greenhouse, aiming to evaluate changes in oxidative metabolism and photosynthesis. Plants exposed to As showed visual damage such as chlorosis, necrosis, wilting, senescence, in addition to changes in the concentration of chloroplast pigments, greater activity of enzymes of the enzymatic antioxidant system, such as: superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT), increased oxidative damage to membranes, evidenced by increase in malondialdehyde levels, in addition to damage to the photosynthetic apparatus, confirming the toxic potential of this metalloid.

**Keywords:** mining, food security; ora-pro-nóbis; PANC (Plants with Potential as Food); pollution.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. JUSTIFICATIVA	10
3. HIPÓTESE	11
4. OBJETIVOS	11
4.1. Objetivo geral:	11
4.2. Objetivos específicos:	12
5. METODOLOGIA	12
7. DISCUSSÃO	23
8. CONCLUSÃO	29
9. REFERÊNCIAS	30

## 1. INTRODUÇÃO

O arsênio (As) é um metaloide encontrado naturalmente associado aos solos e rochas, na forma de arsenopiritas (FeAsS), realgar (As<sub>4</sub>S<sub>4</sub>) ou trissulfeto de arsênio (As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>), e sua mobilização ocorre por meio de processos geológicos e por ações antrópicas, como a mineração (Zhao et al., 2010; Kumar et al., 2015).

O Ministério da Saúde (2021) e a Organização Mundial de Saúde (2022) definem, como aceitável, a concentração máxima de 10 µg L<sup>-1</sup> em água potável, e alerta para o efeito da toxicidade da exposição ao metal, que pode causar câncer, dermatites, problemas cardiovasculares, gastrointestinais, neurológicos, endocrinológicos e reprodutivos. No Brasil não há legislação sobre os valores limite de As no solo mas, em termos mundiais, há estabelecimento de limites no Japão (15 mg kg<sup>-1</sup>) e nos EUA variam nos estados (entre 2, 1 e 20 mg kg<sup>-1</sup>) (Punshon et al., 2017). A concentração média mundial de As no solo é de 10 mg kg<sup>-1</sup> (Piršelová et al., 2022). As principais vias de contaminação ocorrem por meio de água e alimentos contaminados, normalmente correntes em áreas com concentrações tóxicas de As (Mawia et al., 2021; USEPA, 2000). Ademais, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa, 2022) estabeleceu o limite máximo permitido de arsênio em hortaliças, como alface e rúcula, fixado em 0,30 mg/kg, estabelecendo valores seguros para o consumo humano.

Devida à presença histórica e ativa de processos de mineração, especialmente de ouro, na economia do estado de Minas Gerais, elevadas concentrações de As são encontradas na área do Quadrilátero Ferrífero, formada pelas cidades de Sabará, Congonhas, Nova Lima, Santa Bárbara, Mariana, Ouro Preto, entre outras, onde foram encontradas concentrações, nos cursos d'água, variando de 260 a 1.710 µg L<sup>-1</sup>, podendo atingir até 7.000 µg L<sup>-1</sup> em outros aquíferos, cujos valores se encontram muito acima dos limites permitidos para consumo humano (Borba et al., 2004; ANA, 2012; Bundschuh et al., 2012).

O As é componente natural e, apenas se torna poluente, quando as concentrações extrapolam o limite permitido pela legislação, cujas formas químicas principais são os estados de oxidação +3 e +5, denominados de arsenito e arsenato, respectivamente, que coexistem dependendo das condições de oxidação do meio (Finnegan e Chen, 2012; Rosas-Castor et al., 2014). Arsenito prevalece em condições

anaeróbicas e o  $\text{As}^{\text{V}}$  é predominantemente encontrada em ambientes aeróbicos (Finnegan e Chen, 2012).

Arsenato e fosfato são quimicamente análogos, o que possibilita a absorção pelas plantas utilizando o mesmo transportador, enquanto o  $\text{As}^{\text{III}}$  é absorvido por meio de canais de aquaporina intrínsecos, do tipo nodulina 26 (NIP) (Isayenkov & Maathuis, 2008; Ma et al., 2008). Internamente, os mecanismos de toxicidade também diferem entre as duas formas químicas, em que o  $\text{As}^{\text{V}}$  limita o funcionamento da fosforilação oxidativa, reduzindo a produção de ATP, e o  $\text{As}^{\text{III}}$ , devido à elevada afinidade por grupamentos sulfídricos de proteínas, afeta a estrutura e funções catalíticas, resultando em disfunção celular (Sharma, 2012). Adicionalmente, o  $\text{As}^{\text{V}}$ , no meio celular, é reduzido a  $\text{As}^{\text{III}}$ , o que resulta na geração de espécies reativas de oxigênio, causando o estresse oxidativo e acionando respostas antioxidantes (Khalid et al., 2017; Khan et al., 2021).

O acúmulo de As pelas plantas varia de acordo com a absorção e a capacidade de translocação das raízes para a parte aérea. Plantas excludentes de As possuem limitações nos processos de absorção e translocação para a parte aérea. Por sua vez, plantas hiperacumuladoras são capazes de acumular nas raízes e na parte aérea. Entre as duas classificações, ainda se encontram plantas intermediárias no que tange ao acúmulo de As (Rascio e Navari-Izzo, 2011).

Segundo Felipe et al. (2009), o acúmulo de As nas raízes é uma resposta comum em plantas submetidas a níveis tóxicos desse elemento, porém, essa resposta varia com a espécie e com as concentrações. Em plantas de alface cultivadas em concentrações tóxicas de arsenato e arsenito observou-se que, embora a maior concentração de As tenha sido encontrada nas raízes, uma quantidade significativa foi transportada para as folhas, principalmente quando as plantas foram expostas ao  $\text{As}^{\text{III}}$  (Gusman et al., 2013).

A espécie *Pereskia aculeata* Mill., comumente denominada Ora-pro-nóbis, Azedinha, Lobrobó, é uma trepadeira arbustiva que ocorre principalmente em regiões áridas e semiáridas, mas com ampla distribuição nos mais diversos ecossistemas (Takeiti et al., 2009, Cruz et al., 2020). É uma espécie caracterizada como uma Planta Alimentícia Não Convencional (PANC), possuindo grande potencial nutricional, com excelente conteúdo proteico, teor de fibras e altos teores de minerais, como zinco

(26,71 mg 100 g<sup>-1</sup>), manganês (46,4 mg 100 g<sup>-1</sup>) e ferro (14,18 mg 100 g<sup>-1</sup>) (Takeiti et al., 2009, Cruz et al., 2020).

Estudos mostraram que a farinha de *P. aculeata* tem efeitos positivos no perfil metabólico e na motilidade intestinal de ratos, além de reduzir a gordura visceral e melhorar o perfil lipídico (Barbalho et al., 2016). Suas folhas carnosas também podem substituir o ovo em preparações alimentícias, sendo uma opção para pessoas com restrições alimentares (Alves et al., 2021). Na medicina popular, a planta é usada para cicatrização de feridas, redução de inflamações e tratamento de diversas doenças, incluindo diabetes e problemas respiratórios (Pinto et al., 2016; Sartor et al., 2010). Seu extrato contém compostos fenólicos e flavonoides com propriedades antioxidantes e antimicrobianas (Feitoza et al., 2021; Garcia et al., 2019; Kowalski et al., 2020).

Em determinadas regiões de Minas Gerais, como Ouro Preto e cidades vizinhas, o consumo de ora-pro-nóbis alcança parcela significativa da população, atingindo índice superior a 82% dos consumidores (Fonseca et al., 2022). Destaca-se, ainda, que essas plantas fazem parte, como ingrediente principal, de um festival gastronômico, que se encontra em sua 25<sup>o</sup> edição, no município de Sabará (Campos et al., 2017; Sabará, 2023).

A contaminação por arsenato (As<sup>V</sup>) pode promover diversos distúrbios no metabolismo vegetal, além de afetar diretamente a saúde humana e animal, especialmente em áreas do estado de Minas Gerais que possuem concentrações elevadas, resultantes de processos naturais e de atividades antrópicas. Assim, o consumo de plantas de ora-pro-nóbis pode se tornar um veiculador desse elemento na cadeia trófica, uma vez que, por apresentar elevados teores de fósforo, poderia, também, ser um indicativo do acúmulo de As, pois ambos utilizam o mesmo transportador na absorção pelas raízes. O presente estudo tem por objetivo compreender como a espécie *Pereskia aculeata* absorve e metaboliza o As e, assim, gerar informações que possibilitem o desenvolvimento de estratégias de mitigação contra uma possível contaminação generalizada na cadeia alimentar, devido à inserção deste metaloide.

## **2. JUSTIFICATIVA**

Plantas de *P. aculeata* destacam-se por apresentarem os maiores teores de fósforo, comparando-a com outras cactáceas, ou mesmo, com hortaliças comumente

consumidas. Dados de literatura indicam teores de fósforo variando de 1,89-3,20 mg g<sup>-1</sup> MS, enquanto em outra cactácea, palma forrageira, esses valores atingem 1,00 mg g<sup>-1</sup> MS (Almeida et al., 2014; Guimarães, 2018; Nascimento et al., 2018).

Dentre alguns valores de referência, quanto a concentração de fósforo de algumas hortaliças, presentes na tabela brasileira de composição de alimentos (NEPA/UNICAMP, 2011), o de brócolis crua foi de (78 mg 100 g<sup>-1</sup>), de chicória crua (13 mg 100 g<sup>-1</sup>) e em couve manteiga crua (49 mg 100 g<sup>-1</sup>).

Provavelmente, o maior número de transportadores envolvidos na absorção de fosfato pelas raízes está relacionado às maiores concentrações nas plantas de *P. aculeata*. Arsenato e fosfato são absorvidos e translocados pelo mesmo sistema de transporte, e possuem comportamentos semelhantes no solo, devido às suas propriedades químicas, podendo ocorrer uma competição pelos mesmos sítios de adsorção no solo e absorção pela planta (Melo et al., 2007). Em função disso, é possível que essas plantas possam acumular teores elevados de As, quando cultivadas em áreas contaminadas, tanto nas raízes como nas folhas, o que poderia trazer sérias implicações do ponto de vista fisiológico e de segurança alimentar. Acrescenta-se, ainda, de devido à particularidade de consumo dessa planta em áreas com elevado background de As, natural ou antrópico, como ocorre em regiões do estado de Minas Gerais, é possível considerar o risco de transferência na cadeia trófica.

### **3. HIPÓTESE**

Quando cultivadas em meio com arsênio, plantas de *Pereskia aculeata* acumulam e translocam este metaloide para as folhas, causando alterações fisiológicas e comprometimento da cadeia alimentar. A contaminação com As altera os padrões de concentração de minerais, como ferro e fosfato em *Pereskia aculeata*, especialmente nas folhas.

### **4. OBJETIVOS**

#### **4.1. Objetivo geral:**

- Avaliar e determinar as taxas de acúmulo e translocação de As, além de investigar respostas bioquímicas e fisiológicas envolvidas nos mecanismos de tolerância de *P. aculeata* a este metaloide.

## 4.2. Objetivos Específicos:

- Avaliar o acúmulo e a translocação de As em *P. aculeata*;
- Entender como diferentes concentrações de As afetam de forma distinta a fisiologia *P. aculeata*;
- Avaliar as alterações de concentrações intrínsecas dos minerais ferro e fósforo inorgânico em *P. aculeata*.

## 5. METODOLOGIA

### 5.1. Obtenção do material vegetal

Estacas caulinares para a produção de mudas de *P. aculeata* (Cactaceae), obtidas de um plantio familiar, foram lavadas em água corrente, colocadas em solução nutritiva de Clark (1975), pH 6,5, e mantidas em sala de crescimento de plantas, com intensidade luminosa, temperatura e fotoperíodo controlados ( $230 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,  $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , 16/8 h claro/escuro), até a emissão de raízes.

As plantas foram identificadas quanto ao gênero e espécie pelo especialista Dr. Diego Gonzaga, e tombadas com o número de identificação VIC56922, no Herbário VIC, da Universidade Federal de Viçosa.

### 5.2 Cultivo das plantas e aplicação dos tratamentos

Com o processo de estaquia concluído e as estacas enraizadas, foi feita a transferência para vasos contendo 3 L de substrato Mec Plant, produzido a partir da casca de Pinus bio-estabilizada, e areia média de rio, na proporção de 2:1.

A aplicação de  $\text{As}^{\text{V}}$ , por meio de irrigação diretamente na superfície do substrato, utilizando 50 mL de solução para fornecer 1, 2 e  $4 \mu\text{g g}^{-1}$  de substrato, foi feita quando as plantas atingiram altura de, no mínimo, 30 cm, e quantidade igual ou maior de 20 folhas completamente expandidas. O experimento foi montado em cinco repetições e as plantas expostas por 5 dias ao As.

Ao final do período de exposição aos tratamentos, amostras frescas de folhas do terço médio e totalmente expandidas para análises bioquímicas. As folhas localizadas no topo do caule, ainda em expansão (folhas novas) e as folhas maduras, localizadas abaixo do terço médio no caule (folhas velhas) foram utilizadas para análises de minerais e arsênio, assim como as raízes. As amostras utilizadas para as análises bioquímicas foram mantidas em ultra freezer ( $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ ), até que fossem feitas as análises laboratoriais.

### **5.3 Análises laboratoriais**

#### ***Determinação de ferro, fósforo e arsênio na planta***

Amostras de folhas e raízes foram lavadas em água destilada e mantidas em estufa, a 80 °C, até obtenção de massa seca constante. A fração orgânica do material seco foi decomposto das amostras, por via úmida, em mistura de ácido nítrico e perclórico (2:1), sob controle de temperatura, a 150 °C (Marin et al., 1993), sendo quantificada a concentração de ferro e As nas folhas, por meio da técnica de espectrometria de emissão óptica em plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). A determinação da concentração de fósforo foi feita por meio da técnica da formação do complexo fosfomolibdato, o qual foi quantificado por espectrofotometria na região do visível, no comprimento de onda de 720 nm.

#### ***Fator de translocação***

O índice de fator de translocação (TF) foi calculado conforme proposto por Yoon et al. (2006):

$$\text{Fator de translocação (FT)} = \text{Conc. As}_{\text{folha}} // \text{Conc. As}_{\text{raiz}}$$

#### ***Determinação dos parâmetros fotossintéticos e trocas gasosas***

As determinações relativas às trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a* foram realizadas com auxílio de um analisador de gás no infravermelho (IRGA) equipado com uma câmara de fluorescência (IRGA – Licor® modelo LI-6400/XT), assim que as plantas atingiram uma altura de, no mínimo, 30 cm, e possuíam número mínimo de 20 folhas. As medições foram realizadas entre 8:00 e 12:00 horas, em folhas situadas entre o 3º e 5º nós a partir do ápice, com bom aspecto fitossanitário e completamente expandidas. A câmara foliar foi ajustada para trabalhar com densidade de fluxo de fótons de 1000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , em concentração de CO<sub>2</sub> de 400  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  ar, com controle da temperatura do bloco em 25 °C, para determinação da concentração interna de carbono (C<sub>i</sub>) ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), condutância estomática (*g<sub>s</sub>*) ( $\mu\text{mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e a taxa de fotossíntese líquida (*A*) ( $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).

Os parâmetros da fluorescência da clorofila foram medidos usando o Mini-PAM, e sua mensuração foi feita nas mesmas folhas anteriores pré-adaptadas ao escuro por 30 min, a fim de se obter o rendimento quântico potencial do fotossistema II ( $F_v/F_m'$ ), rendimento quântico efetivo do fotossistema II ( $\phi$  PSII), dissipação fotoquímica (qP) e dissipação não fotoquímica (NPQ).

#### ***Determinação dos teores dos pigmentos fotossintéticos***

A extração das clorofilas e dos carotenoides foi feita a partir de três discos foliares com 1 cm de diâmetro, obtidos das mesmas folhas usadas para a determinação dos parâmetros fotossintéticos e trocas gasosas. Os discos foram incubados em 5 mL de solução de dimetilsulfóxido (DMSO - saturado com carbonato de cálcio), em tubos de ensaio devidamente tampados e revestidos com papel alumínio, onde ficam por 24 horas, seguido de transferência para banho-maria, a 65 °C, por 45 min. Após esse período, procedeu-se à leitura da absorbância dos extratos de pigmentos, nos comprimentos de onda 665, 649 e 480 nm. As leituras obtidas foram utilizadas para a estimativa dos teores de clorofila *a*, *b*, total, e de carotenoides totais calculado conforme a equação abaixo, proposta por Wellburn (1994), sendo os resultados expressos em mg g<sup>-1</sup> MF.

$$\text{Clorofila } a = 12,47 A_{665} - 3,62A_{649}$$

$$\text{Clorofila } b = 25,06 A_{649} - 6,5A_{665}$$

$$\text{Carotenoides} = (1000A_{480} - 1.29Ca - 53.78Cb)/220.$$

#### ***Determinação da concentração de peróxido de hidrogênio***

A concentração de peróxido de hidrogênio foi determinada em amostras de 200 mg de folhas e raízes frescas, maceradas e homogeneizadas em meio de extração composto por tampão fosfato de potássio 50 mM, pH 6,5, hidroxilamina 1 mM, seguidas de centrifugação a 10.000 xg 15 minutos, a 4 °C (Kuo e Kao, 2003). Alíquotas de 20 µL de sobrenadante foram adicionadas ao meio de reação contendo 80 µL de sulfato ferroso amoniacal 250 µM mais o ácido sulfúrico 25 mM, laranja de xilenol 250 µM e sorbitol 100 mM (Gay e Gebicki, 2000). A mistura foi homogeneizada e mantida no escuro, por 30 min, e a absorbância determinada em 560 nm. As concentrações de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> foram estimadas por meio de curva analítica, preparada com padrões de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, e expressa em µmoles de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> MF.

#### ***Determinação do acúmulo de MDA***

Para analisar o estresse oxidativo, e conseqüentemente os danos às membranas celulares da planta *P. aculeata* ao arsênio, foi utilizado o TBA (ácido tiobarbitúrico) na avaliação da concentração de MDA (malonaldeído), produto secundário da peroxidação lipídica, que por meio de reação colorimétrica entre MDA e TBA, será possível a leitura espectrofotométrica. Amostras de folhas e raízes, com massa de 150 mg, foram maceradas em meio com 2 mL de ácido tricloroacético (TCA) 1% (p/v) e centrifugadas a 10.000 xg, por 15 minutos. Ao sobrenadante foi adicionado

1,5 mL de ácido tiobarbitúrico 0,5% (p/v) em TCA 20% (p/v), mantidos em incubação a 95°C, por 30 min, seguido de imersão em banho de gelo, por 10 min, e posterior centrifugação a 3.000 xg, 4 °C, por 10 min. O sobrenadante foi utilizado para a análise, em espectrofotômetro UV/Visível, nos comprimentos de onda de 440, 532 nm e 600 nm. A concentração de MDA foi calculada utilizando-se o coeficiente de extinção molar de 155 mM<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup> e expressa em nmol de MDA g<sup>-1</sup> MF (Hodges et al., 1999).

#### ***Determinação da atividade do sistema antioxidante enzimático***

Para determinação das atividades enzimáticas, amostras de 0,3 g folhas e raízes foram maceradas em moinho de bolas e homogeneizadas nos seguintes meios de extração:

- **(SOD)** dismutases do superóxido, **(POX)** peroxidases e **(CAT)** catalases: tampão fosfato de potássio 0,1 M, pH 6,8, EDTA 0,1 mM, fluoreto de fenilmetilsulfônico (PMSF) 1 mM e polivinilpirrolidona (PVPP) 1% (Peixoto et al., 1999);
- **(APX)** peroxidases do ascorbato: tampão fosfato de potássio 50 mM, pH 7,0, EDTA 1,0 mM, ácido ascórbico (AA) 1,0 mM, PMSF 1 mM, ditioneitol (DTT) 2 mM e PVPP 1% (p/v) (Peixoto et al., 1999).

Após centrifugação a 12.000 xg, por 15 min, a 4°C, os sobrenadantes foram utilizados como extrato enzimático bruto e as atividades enzimáticas foram determinadas pela adição do extrato aos seguintes meios de reação:

- **SOD:** Tampão fosfato de sódio 50 mM, pH 7,8, contendo metionina 13 mM, azul de p-nitro tetrazólico (NBT) 75 µm, EDTA 0,1 mM e riboflavina 2 µm (Giannopolitis and Ries, 1977);
- **POX:** Tampão de fosfato de potássio 25 mM, pH 6,8, pirogalol 20 mM e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 2 mM (Peixoto et al., 1999);
- **CAT:** Tampão fosfato de potássio 50 mM e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 12,5 mM, para CAT (Peixoto et al., 1999);
- **APX:** tampão fosfato de potássio 50 mM, pH 6,0, ácido ascórbico 0,8 mM e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 1 mM (Peixoto et al., 1999).

Na análise da **SOD**, as amostras foram mantidas, por 5 minutos, a 25 °C, em câmara de reação sob iluminação, seguida de determinação da absorbância a 560 nm. Uma unidade de SOD é estabelecida como a quantidade de enzima necessária para reduzir em 50% a fotorredução do NBT, e os resultados foram expressos em U

min<sup>-1</sup> mg<sup>-1</sup> proteína, indicando quanto do substrato é convertido por unidade de tempo para cada miligrama de proteína presente na amostra (Giannopolitis e Ries, 1977).

A atividade da **POX** foi estimada pela leitura da absorvância a 420 nm, durante o primeiro minuto de reação, utilizando o coeficiente de extinção molar de 2,47 mM<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup> (Peixoto et al., 1999), sendo a concentração expressa em μmol purpurogalina min<sup>-1</sup> mg<sup>-1</sup> proteína, indicando quanto de purpurogalina (produto da reação catalisada pela peroxidase) é formado por unidade de tempo e por uma determinada quantidade de proteína.

Para **CAT**, a atividade foi estimada por meio da leitura da absorvância a 240 nm, no primeiro minuto de reação, utilizando o coeficiente de extinção molar de 36 M<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup> (Peixoto et al., 1999), com o resultado expresso em μmol H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> min<sup>-1</sup> mg<sup>-1</sup> proteína, indicando quanto do peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) é decomposto por unidade de tempo por uma determinada quantidade de proteína.

A atividade da **APX** foi estimada pela leitura da absorvância a 290 nm, durante cinco minutos de reação, utilizando o coeficiente de extinção molar 2,8 mM<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup> (Peixoto et al., 1999), e expressa em μmol AsA min<sup>-1</sup> g<sup>-1</sup> proteína, indicando quanto do substrato ácido ascórbico (AsA) é convertido por unidade de tempo por uma determinada quantidade de proteína.

#### ***Determinação dos teores totais de proteínas***

A concentração de proteínas no extrato enzimático bruto foi realizada pelo método preconizado por Bradford (1976), em que 100 μL do extrato foram adicionados a 1 mL do reagente de Bradford e mantidos no escuro por 20 min. A absorvância foi lida a 595 nm e os teores de proteínas estimados com base em curva analítica preparada com padrões de BSA.

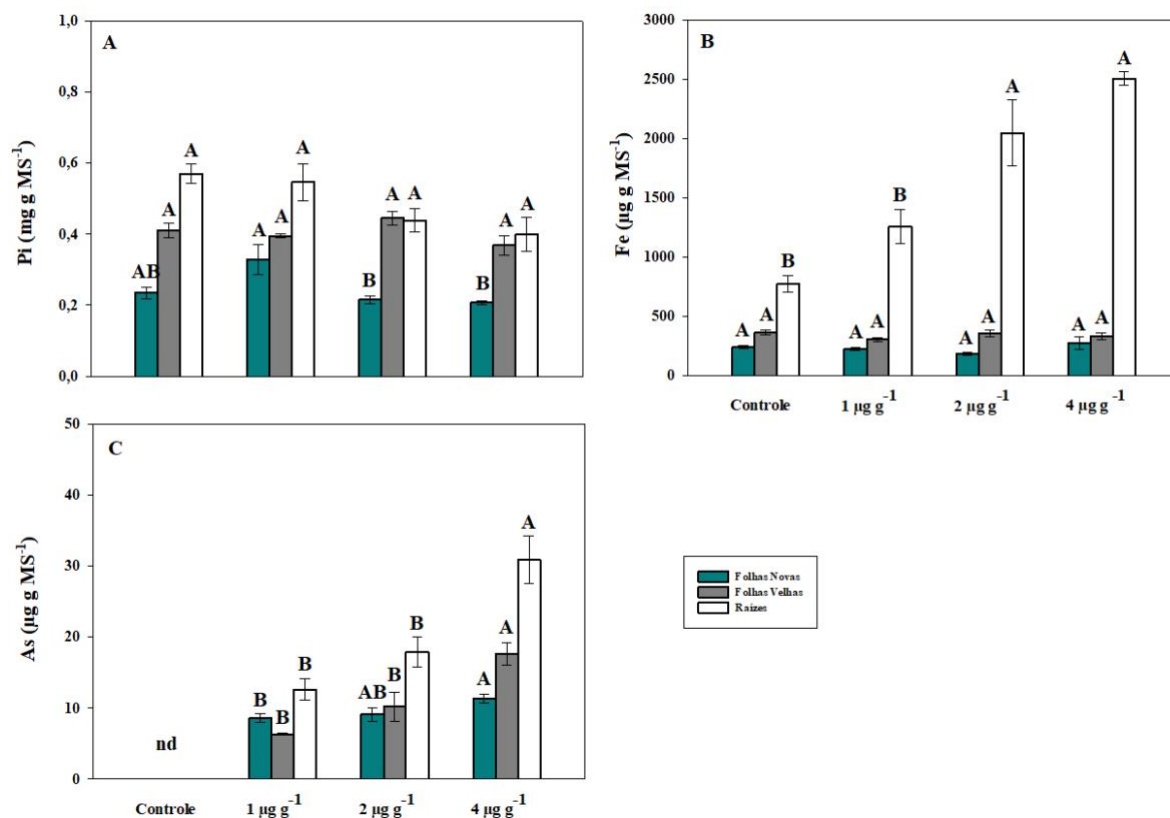
#### **5.4. Desenho experimental e análise estatística**

Os experimentos foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado (DIC), sendo 4 tratamentos com 5 repetições, e cada unidade experimental constituída de 1 plantas/repetição. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, por meio do programa estatístico R (R CORE TEAM, 2014) com auxílio do pacote ExpDes.pt.

## 6. RESULTADOS

### *Acúmulo de fosfato inorgânico, ferro e arsênio*

Como podemos observar na figura 1A, plantas expostas a concentrações de  $\text{As}^{\text{V}}$  não diferem estatisticamente do grupo controle quanto à concentração de fosfato inorgânico (Pi). No entanto, folhas novas, no tratamento com  $1 \mu\text{g g}^{-1}$ , mostraram aumento em relação a 2 e  $4 \mu\text{g g}^{-1}$ , e se sobrepõe, estatisticamente, aos grupos controle. As raízes e folhas velhas apresentaram níveis mais estáveis de Pi, em comparação com folhas novas, independentemente da concentração de arsenato. Folhas novas e velhas de plantas expostas ao As não diferiram estatisticamente do grupo controle quanto a concentração de ferro (Fe). As raízes, apresentaram teores mais elevados desse elemento, nos tratamentos com 2 e  $4 \mu\text{g g}^{-1}$ . Os resultados apresentados na figura 1C mostram que folhas velhas tendem a acumular mais As do que folhas novas, conforme resultados também obtidos para o acúmulo de Pi e Fe. Os resultados indicam uma tendência dose-resposta, onde os maiores acúmulos de As ocorreram na maior concentração aplicada ao substrato, especialmente nas raízes.



**Figura 1.** Concentrações de fosfato inorgânico (Pi) (A), ferro (Fe) (B) e arsênio

(As) (C) em folhas novas, folhas velhas e raízes de plantas de *Pereskia aculeata* cultivadas em substrato com arsenato. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, comparando os tecidos individualmente dentro dos tratamentos, não diferem entre si pelo teste Tukey ( $P \leq 0,05$ ). As barras dispostas nos gráficos representam o erro padrão.

### **Potencial de translocação do As**

A tabela 1 mostra que os fatores de translocação (FT) de As para plantas de *Pereskia aculeata*, sob os diferentes tratamentos (1, 2 e 4  $\mu\text{g g}^{-1}$ ), não apresentam diferenças estatisticamente significativas entre si. Embora não tenha sido feita a análise estatística, é possível inferir que essa translocação é essencialmente a mesma, quer seja considerando folhas novas ou velhas. Os resultados indicam, no entanto, a prevalência do acúmulo de As nas raízes, em qualquer condição de tratamento e disposição da folha na planta.

**Tabela 1.** Fator de translocação de arsênio (As) em *Pereskia aculeata*. Médias, e seus respectivos erros padrão, seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey ( $P \leq 0,05$ ).

Tratamentos ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	FT Folhas novas	FT Folhas velha
Controle	nd	nd
1	0,624 $\pm$ 0,04 a	0,621 $\pm$ 0,13 a
2	0,666 $\pm$ 0,05 a	0,612 $\pm$ 0,18 a
4	0,528 $\pm$ 0,08 a	0,6 $\pm$ 0,03 a

nd: não detectado

### **Parâmetros fotossintéticos**

A taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$  foi seriamente afetada pela exposição das plantas ao  $\text{As}^V$ , atingindo 40 e 70% de redução, nos tratamentos com 1 e 2  $\mu\text{g g}^{-1}$ , respectivamente. Na maior concentração não foi possível a medição dos parâmetros fotossintéticos, em virtude do elevado grau de toxidez do elemento nas plantas. No tratamento com 1  $\mu\text{g g}^{-1}$  observa-se que os parâmetros condutância estomática e concentração interna de  $\text{CO}_2$  refletem as respostas das plantas aos efeitos tóxicos do as, com significativos incrementos nos dois parâmetros. Com o aumento da concentração de As no substrato, no entanto, o parâmetro condutância revelou ser o

principal responsável pela redução drástica na taxa de assimilação de CO<sub>2</sub>, cujos valores sofreram redução significativa.

**Tabela 2.** Taxa de Assimilação de CO<sub>2</sub> (A), condutância Estomática (g<sub>s</sub>), concentração Interna de CO<sub>2</sub> (C<sub>i</sub>) de plantas de *Pereskia aculeata* cultivadas em substrato com As.

Tratamentos (µg g <sup>-1</sup> )	A (µmol CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	g <sub>s</sub> (mol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	C <sub>i</sub> (µmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )
Controle	2,54 ± 0,3 a	0,145 ± 0,03 b	350,78 ± 8,8 b
1	1,54 ± 0,7 b	0,368 ± 0,05 a	383,92 ± 4,93 a
2	0,74 ± 0,2 c	0,078 ± 0,01 b	372,80 ± 4,79 ab
4	nd	nd	nd

nd: não detectado

### Fluorescência

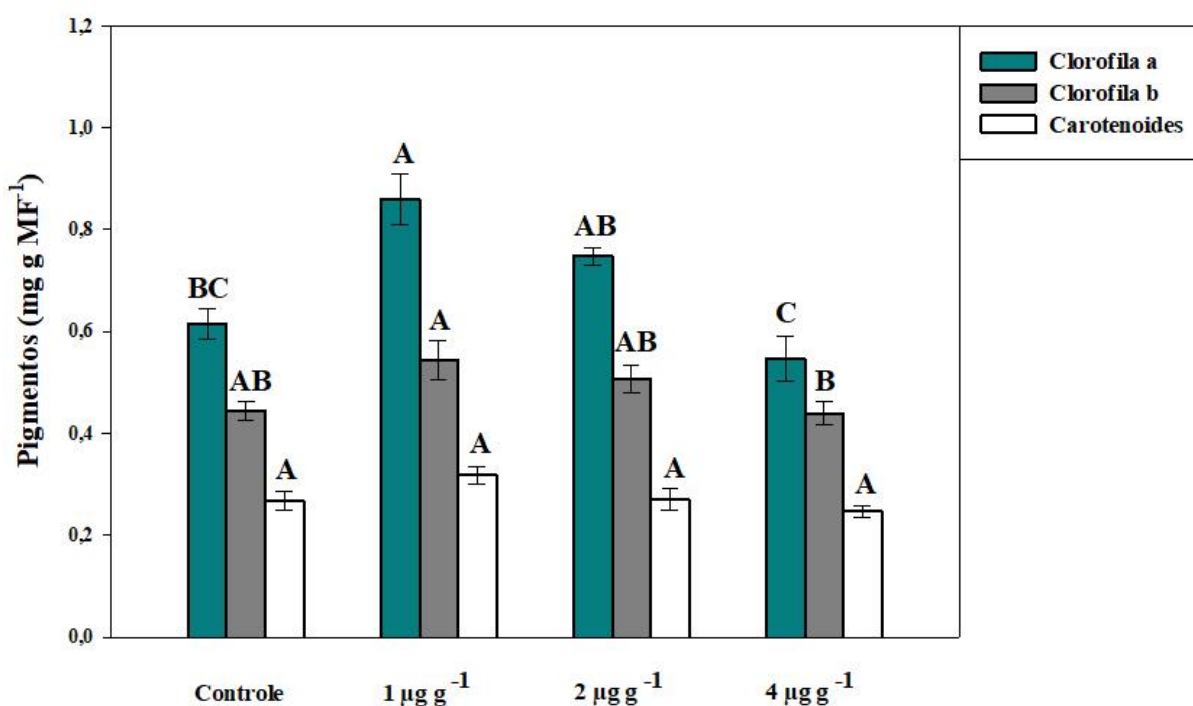
Os valores de Fv/Fm decresceram nos tratamentos contendoAs, independentemente da concentração utilizada, não sendo responsivos com o incremento da concentração. Para os demais parâmetros, apenas NPQ mostrou alteração, sendo os valores maiores do que o controle nos tratamentos com 1 µg g<sup>-1</sup> e 2 µg g<sup>-1</sup> As<sup>V</sup> (Tabela 3).

**Tabela 3.** Eficiência quântica máxima do PSII (Fv/Fm), eficiência quântica efetiva do PS2 (Φ<sub>PSII</sub>), coeficiente de dissipação fotoquímica (qP) e coeficientes de dissipação não fotoquímica (qN e NPQ) de plantas de *Pereskia aculeata* contaminadas por arsênio.

Trat. (µg g <sup>-1</sup> )	Fv/Fm	Φ <sub>PSII</sub>	qP	qN	NPQ
Controle	0,732 ± 0,013 a	712,4 ± 9,9 a	967,6 ± 16,4 a	36,67 ± 4,8 a	0,043 ± 0,01 c
1	0,644 ± 0,027 b	660 ± 31,0 a	965,5 ± 5,9 a	68 ± 12,5 a	0,11 ± 0,01 ab
2	0,639 ± 0,008 b	636,8 ± 10,1 a	974,75 ± 7,9 a	57,5 ± 7,9 a	0,125 ± 0,01 a
4	0,619 ± 0,016 b	639,6 ± 21,5 a	943,8 ± 9,5 a	62,67 ± 11,1 a	0,06 ± 0,01 bc

### Concentração dos pigmentos cloroplastídicos

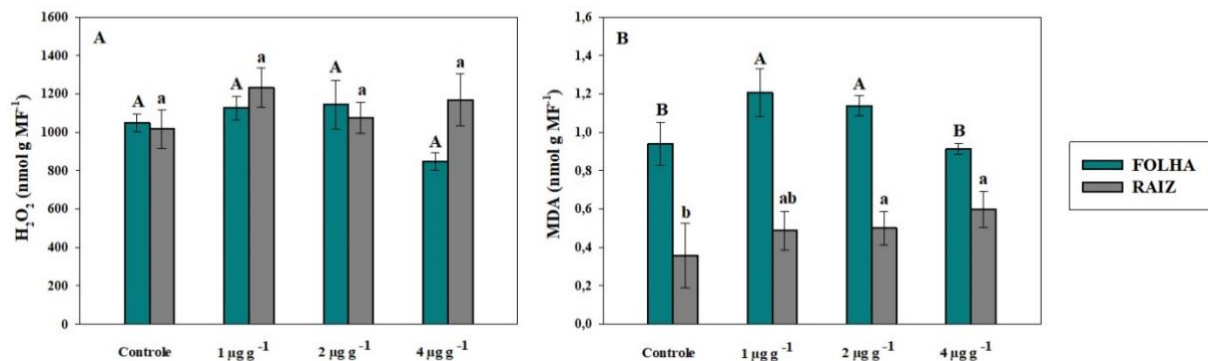
Plantas expostas à concentração de  $2 \mu\text{g g}^{-1}$  de  $\text{As}^{\text{V}}$  apresentaram aumento nas concentrações de clorofila em relação ao controle, enquanto aquelas expostas a  $4 \mu\text{g g}^{-1}$  indicaram redução. Plantas expostas às concentrações de  $4 \mu\text{g g}^{-1}$  tiveram menor concentração de clorofila b em relação às plantas expostas a  $2 \mu\text{g g}^{-1}$ . A concentração de carotenoides não apresentou alteração significativa nos diferentes tratamentos.



**Figura 2.** Efeito do arsênio (As) sobre os teores de pigmentos em *Pereskia aculeata*. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ( $P \leq 0,05$ ). As barras dispostas nos gráficos representam o erro padrão.

### Peroxidação lipídica e Peróxido de hidrogênio

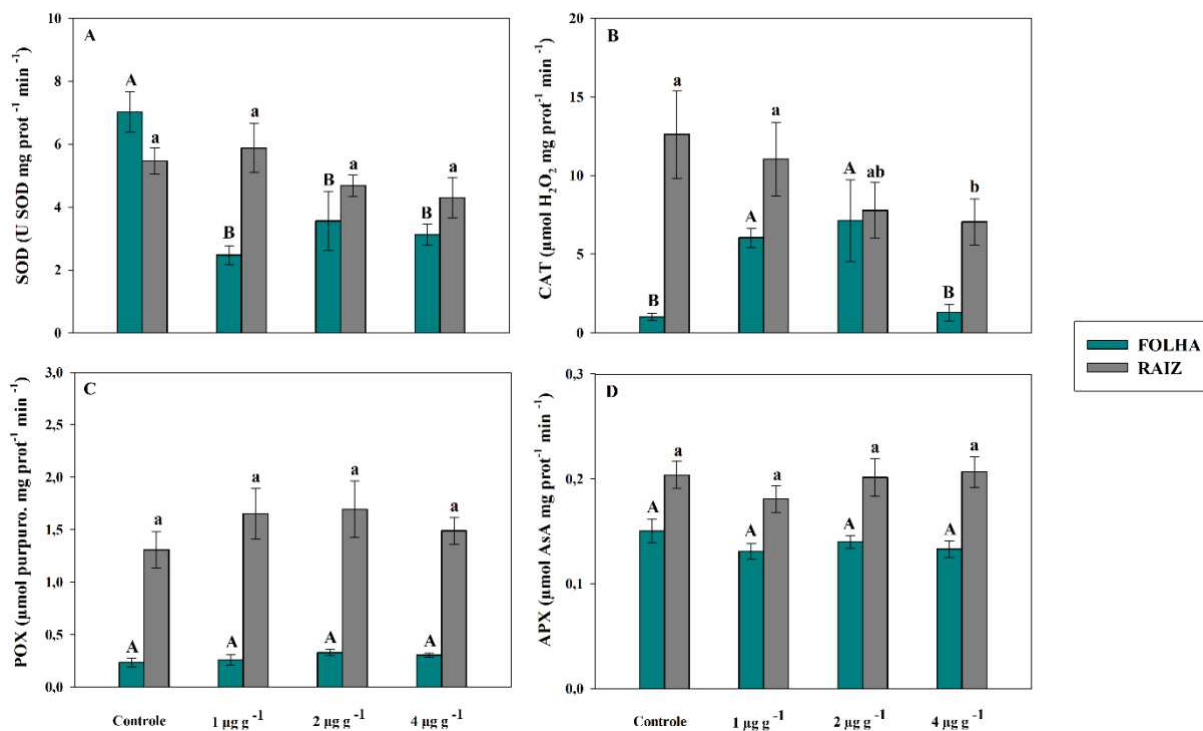
Os tratamentos não influenciaram na formação de peróxido de hidrogênio em folhas e raízes (figura 3A). Entretanto, para a concentração de MDA (figura 3B) folhas de plantas expostas à  $1 \mu\text{g g}^{-1}$  de As indicaram significativo aumento indicativo de toxicidade, quando comparados ao grupo controle. Nas raízes, no entanto, a indicação de dano ocorreu a partir da concentração de  $2 \mu\text{g g}^{-1}$  de As.



**Figura 3.** Concentração de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) (A), e malondialdeído (MDA) (B) em folhas e raízes de *P. aculeata* expostas ao arsênio (As). Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula para folhas e minúscula para raízes, não diferem entre si pelo teste Tukey ( $P \leq 0,05$ ). As barras dispostas nos gráficos representam o erro padrão.

### **Sistema antioxidante enzimático**

A exposição das plantas ao As<sup>V</sup> promoveu a redução da atividade de SOD nas folhas, enquanto nas raízes não houve alterações, como podemos observar na figura 4A. A CAT (figura 4B) apresentou aumento de atividade nas folhas de plantas expostas às concentrações de 2 e 4 µg g<sup>-1</sup> de As<sup>V</sup>, porém nas raízes houve redução em plantas expostas à concentração de 4 µg g<sup>-1</sup>. A atividade de POX e APX (figura 4 C e D) não apresentaram alterações significativas nos diferentes tratamentos.



**Figura 4.** Efeito do arsênio (As) sobre a atividade de enzimas do sistema antioxidante em folhas e raízes de *P. aculeata*. (A) dismutase do superóxido (SOD), (B) catalase (CAT), (C) peroxidases (POX), (D) peroxidase do ascorbato (APX). Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula para folhas e minúscula para raízes, não diferem entre si pelo teste Tukey ( $P \leq 0,05$ ). As barras dispostas nos gráficos representam o erro padrão.

## 7. DISCUSSÃO

No início do desenvolvimento, as folhas novas atuam como órgãos drenos, ou seja, locais onde os nutrientes são importados para sustentar o crescimento da planta (Taiz e Zeiger, 2017). Em função dessa característica, percebe-se que a presença de As promoveu uma tendência de redução na concentração de fosfato nessas folhas, em virtude da semelhança química entre esses dois componentes, os quais competem pelos mesmos sítios de absorção. As raízes são os principais órgãos de absorção de nutrientes do solo, incluindo o fosfato. A maior concentração de Pi nas raízes em relação às folhas novas pode ser explicada pelo fato de que as raízes estão continuamente absorvendo fosfato do solo e transportando-o para outras partes da planta (Faquin, 2005). Parte desse fosfato permanece nas raízes, resultando em uma concentração relativamente alta, conforme ocorre, também, com o As (Clarkson et al., 1978; Faquin, 2005; Taiz e Zeiger, 2017; Sanchez, 2021).

O ferro pode se acumular nas raízes como complexo com o fosfato (Briat et al., 2015). Uma vez absorvido pelas raízes, o fosfato pode ser translocado para a parte aérea, mas o Fe pode, devido à complexação, reduzir a translocação desse para as partes superiores da planta (Cumbus et al., 1977; Mathan e Amberger, 1977; Rosas-Castor et al., 2014; Briat et al., 2015). Presume-se que o mesmo ocorra com o As, devido à semelhança química com o fosfato (Rosas-Castor et al., 2014; Briat et al., 2015). O aumento da concentração de ferro na raiz pode ser explicado como mecanismo de proteção, esses complexos podem se acumular nas raízes, limitando a translocação de arsênio para as partes aéreas da planta.

O As, na forma de  $As^V$ , é absorvido pelas plantas de forma semelhante ao fosfato (Pi), fazendo com que seja absorvido através dos PHTs, transportadores de fosfato (Neves, 2020). O acúmulo de As nas plantas desestabiliza a homeostase celular, reduzindo processos biológicos essenciais como fotossíntese e respiração (Neves, 2020). Essa redução gera aumento de espécies reativas de oxigênio livres, causando desequilíbrio do potencial redox das células e danos às proteínas, pigmentos fotossintéticos e membranas lipídicas (Neves, 2020).

Uma vez dentro da célula, esse componente pode ser reduzido a arsenito, armazenado no vacúolo ou formar complexos com ferro (Abbas et al., 2018; Bali e Sidhu, 2021). Quando esse mecanismo é insuficiente, ocorre o aumento do transporte de As, especialmente na forma de  $As^{III}$  para o tecido vascular central e para a parte

aérea. Chao et al. (2014) identificaram a enzima High Arsenic Content 1 (HAC1), uma arsenato redutase, responsável pela redução de  $As^V$  a  $As^{III}$  em *Arabidopsis thaliana*, a qual se acumula na epiderme da raiz e nas células do periciclo. Os resultados indicam que, embora *Pereskia aculeata* não apresente grandes variações nos fatores de translocação de As entre as diferentes concentrações de tratamento, há uma translocação de arsênio em relação ao controle. Portanto, a expressão genética da proteína HAC1 pode ser relevante para explicar o fator de translocação desse elemento em plantas de *Pereskia aculeata*.

A concentração de As nas raízes aumenta significativamente com o aumento da concentração do elemento no substrato, especialmente no tratamento com  $4 \mu\text{g ml}^{-1}$ . Ainda assim, os dados sugerem que os processos de redução e complexação nas raízes, principalmente relacionados ao acúmulo de Fe, não foram eficientes suficientes para limitar o transporte de arsênio para a parte aérea.

Assim como ocorre para a maioria dos elementos metálicos, como o ferro, zinco, cromo, manganês, cobre, chumbo, níquel e Cd, o maior acúmulo de As ocorre, também nas raízes (AS Al-Farra et al., 2009). Segundo Mensah et al. (2022), resultados de fator de translocação menor do que 0,2 indicam o potencial de utilização de uma determinada espécie para os processos de fitorremediação, destacando a capacidade de retenção do elemento poluente nas raízes. Valores de fator de translocação, conforme os obtidos em plantas de *P. aculeata*, por sua vez, indicam um potencial de transporte do elemento do solo para as folhas, o que, em termos de risco alimentar, torna-se preocupante, pois essa é a parte da planta consumida pela população, especialmente as folhas novas.

A ação tóxica do As envolve, dentre outras, interferência em processos fotoquímicos e bioquímicos da fotossíntese, especialmente pela substituição do fosfato em reações bioquímicas essenciais, resultando em inibição de enzimas e disfunção metabólica (Bali e Sidhu, 2021). Resultados apresentados por Anjum et al. (2017) mostraram redução significativa na eficiência fotossintética das cultivares de milho Run Nong 35 e Dong Dan 80 expostas ao tratamento combinado de cádmio ( $100 \mu\text{M}$ ) e As ( $200 \mu\text{M}$ ), atribuída à diminuição dos níveis de clorofila e à inibição das enzimas envolvidas na fixação de  $\text{CO}_2$ . O aumento na concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ) e a redução dos demais parâmetros sugerem que a atividade das enzimas do ciclo de Calvin-Benson, como a ribulose 1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase

(RUBISCO) foi afetada, prejudicando a fixação do CO<sub>2</sub> (Gomes, 2022). De forma mais intensa, observa redução da condutância estomática, assemelhando-se às respostas de plantas submetidas a déficit hídrico. Plantas de ora-pro-nóbis também apresentaram um aumento significativo da concentração de CO<sub>2</sub> intercelular, quando submetidas ao déficit hídrico (Barros, 2020). A resposta ao estresse mais severo inclui o fechamento dos estômatos para conservar água, resultando em valores intermediários de concentração interna de CO<sub>2</sub>, devido a taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> estar severamente reduzida, mas a menor abertura estomática impede um aumento excessivo na concentração interna de CO<sub>2</sub>.

As plantas expostas ao As mostraram diminuição na eficiência fotossintética (Fv/Fm) com o aumento da concentração do tratamento, com ocorrência significativa a partir de 1 µg g<sup>-1</sup>, indicando o potencial desse elemento em *P. aculeata*, cujos danos já se tornam perceptíveis mesmo em baixas concentrações. Essas alterações na eficiência do fotossistema II (PSII) são comuns para diversos outros elementos metálicos, cuja intensidade de dano depende do tempo de exposição e da concentração dos metais nos tecidos foliares (Li et al. 2015; Pereira et al. 2000; Ralph et al. 2005).

O rendimento quântico efetivo do PSII ( $\Phi_{PSII}$ ) é um indicador direto da eficiência fotossintética, e os valores altos indicam eficiência na captura de luz. Já qP, reflete a proporção de centros de reação abertos, e os altos valores indicam que a maior parte da energia luminosa está sendo usada para a fotossíntese. A variação de valores de qN e NPQ, indicam a dissipação de energia não usada para a fotossíntese como calor na forma de radiação infravermelha (Kramer et al. 2004; Ralph e Gademann 2005). Os altos valores de NPQ em 2 µg g<sup>-1</sup> indicam alta dissipação não fotoquímica, geralmente uma resposta ao estresse, como relatado por Wang et al. (2016), onde um valor significativo de NPQ foi encontrado em plantas de *Ficus tikoua* contaminadas com 480 µmol L<sup>-1</sup> de As.

Estudos evidenciam que o acúmulo de espécies reativas de oxigênio no cloroplastos podem desempenhar um papel importante na inibição do reparo e síntese da proteína D1, que é uma subunidade crucial para o funcionamento do fotossistema II (PSII) (Sejima et al., 2014; Gururan et al., 2015; Takagi, 2016), o que explica a redução de NPQ em 4 µg g<sup>-1</sup> diante de uma possível degradação do aparelho fotossintético diante do estresse oxidativo.

A clorofila é essencial para a fotossíntese, e esse aumento em sua concentração pode indicar uma resposta adaptativa das plantas ao estresse induzido pelo arsenato, um mecanismo para continuar a produzir energia através da fotossíntese. Concentrações mais elevadas ou exposição prolongada ao arsenato, no entanto, podem ter consequências prejudiciais que dificultam a síntese dos pigmentos do cloroplasto e, como resultado, a capacidade da planta de realizar a fotossíntese de forma eficaz, o que pode explicar a redução da concentração em plantas expostas a  $4 \mu\text{g g}^{-1}$  de  $\text{As}^{\text{V}}$ . Como observado por Duman et al. (2010) e Singh et al. (2006), as concentrações de Chl nas plantas aumentam quando expostas a baixas concentrações de As ( $<50 \mu\text{M}$ ) por curtos períodos de exposição ( $<5 \text{ d}$ ). Essas concentrações então caem quando expostas a altas concentrações de As ( $> 50 \mu\text{M}$ ) por um longo período de tempo ( $\sim 10$  dias).

A estabilidade na concentração de carotenoides sob estresse de arsênio (As) pode parecer contraintuitiva, considerando que o estresse oxidativo geralmente aumenta a biossíntese de antioxidantes (Zulfiqar e Ashraf, 2021). No entanto, o estresse oxidativo intenso pode degradar carotenoides tão rapidamente quanto são sintetizados, fator que pode explicar esse resultado.

Os dados indicam que as folhas das plantas expostas a  $1 \mu\text{g g}^{-1}$  e  $2 \mu\text{g g}^{-1}$  de  $\text{As}^{\text{V}}$  e as raízes expostas a  $2 \mu\text{g g}^{-1}$  e  $4 \mu\text{g g}^{-1}$  apresentam danos às membranas celulares devido à peroxidação lipídica, como evidenciado pelo aumento de MDA. Apesar disso, as concentrações de  $\text{H}_2\text{O}_2$  permaneceram constantes, sugerindo que a produção de  $\text{H}_2\text{O}_2$  não aumentou significativamente com o estresse, ou que os mecanismos antioxidantes das plantas podem estar controlando os níveis de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . A redução nos valores de  $F_v/F_m$  reflete uma diminuição na eficiência fotossintética devido ao estresse oxidativo causado pelos tratamentos de  $\text{As}^{\text{V}}$ .

O sistema antioxidante em plantas é composto por diversas enzimas e elementos que atuam em conjunto para neutralizar os efeitos nocivos das espécies reativas de oxigênio (ROS), que incluem a catalase (CAT), peroxidases (POX), superóxido dismutase (SOD), além de compostos como glutathione, ascorbato, carotenoides totais, fenólicos e flavonoides (Taïbi et al., 2016; I.Khan et al., 2021). Quando as plantas são submetidas a estresse, há um aumento na produção de ROS, o que pode levar a um desequilíbrio no status redox da planta, resultando em danos oxidativos a lipídios, proteínas e ácidos nucleicos (Barbosa, MR. et al, 2014). Assim,

a capacidade das plantas em aumentar a atividade de enzimas antioxidantes é um fator determinante na sua resistência ao estresse, facilitando a manutenção da homeostase redox e promovendo a sobrevivência sob condições adversas. (Reddy et al., 2004).

Nas plantas de *P. aculeata* expostas ao As observou-se que a atividade de SOD nas folhas diminuiu, provavelmente, resultantes dos danos oxidativos que inativaram a enzima, enquanto nas raízes essa atividade permaneceu inalterada, sugerindo uma diferença na resposta antioxidante entre diferentes partes da planta, conforme por Song et al. (2020) em plantas de alface.

As variações das respostas de SOD ocorrem não só em diferentes órgãos da planta, mas também em diferentes espécies e diferentes estresses. Particularmente sob estresse a As, a resposta desta enzima em diferentes estudos é considerada variável. Em muitos estudos foi relatado aumento da atividade de SOD em plantas submetidas ao estresse por As, como na mostarda (*Brassica juncea* L.) (Pandey et al., 2016), arroz (Asgher et al., 2021; Mostofa et al., 2021) e trigo (Sharma et al., 2017).

Naturalmente, a enzima CAT possui maior atividade nas folhas (Ataíde et al., 2018) e, dessa forma, foi possível mostrar o incremento maior dessa atividade nas plantas expostas ao As. Como observado nos resultados, a atividade de CAT nas folhas aumentou em resposta ao estresse oxidativo, enquanto nas raízes diminuiu devido aos danos oxidativos. Essa dinâmica é complexa e pode resultar em níveis estáveis de peróxido de hidrogênio nas folhas e raízes, indicando que, apesar das variações na atividade enzimática, a planta consegue manter um certo equilíbrio na concentração de ROS.

Os resultados obtidos por Bocová et al. (2012) em seu estudo sobre alterações nos conteúdos e atividades de APX em pontas de raízes de cevada, durante a recuperação após estresse de curto prazo por Cd, mostraram que o estresse metálico não altera a atividade da peroxidase. No entanto, muitos estudos apontam que a atividade do APX aumenta em plantas expostas à toxicidade do As, como em *Brassica juncea* L. (Pandey et al., 2016) e *Oryza sativa* (Rahman et al., 2015; Jung et al., 2019; Asgher et al., 2021). Ainda assim, respostas variáveis da atividade de APX nas raízes e folhas são relatadas sob toxicidade por As. Plantas de alho cultivadas em regimes elevados de As apresentaram diminuição de 62% na atividade de APX nas raízes, e diminuição de 22% na parte aérea (Malik et al., 2012; Ruíz-Torres et al., 2017),

também observou uma redução de 1,3 vezes na atividade de APX em *Phaseolus aureus Roxb.* sob 10  $\mu\text{M}$  As. Ainda pode haver variações dentro de uma mesma espécie, como relatado por Saha et al. (2017), que ao analisar as respostas antioxidantes de dois cultivares de arroz, Khitish (como sensível) e Nayanmani (como tolerante), sob estresse por As, relataram elevação de 70% e 332% nas raízes e parte aérea de Khitish, mas apenas 22% e 13% nas raízes e brotos de Nayanmani.

Portanto, a ausência de alterações significativas nas atividades de POX e APX em plantas contaminadas com As pode indicar que essas enzimas não são os principais componentes da resposta antioxidante nessas plantas, as quais podem estar utilizando outros mecanismos para mitigar o estresse oxidativo ou podem ter uma capacidade inata de tolerância ao As, o que não depende da modulação dessas enzimas específicas.

## 8. CONCLUSÃO

A resposta de *Pereskia aculeata* ao estresse por arsenato inclui acúmulo de ferro e arsênio nas raízes, possível formação de complexos como  $\text{FeAsO}_4$ , e uma translocação limitada desses elementos para a parte aérea. A presença de ferro nas raízes parece promover a complexação do arsênio, restringindo sua translocação, no entanto, ela ocorre independentemente das diferentes concentrações de  $\text{As}^{\text{V}}$ .

O ferro e o fósforo, minerais encontrados em grande quantidade na planta e que contribuem para seu alto valor nutricional, não tiveram suas concentrações reduzidas nas folhas, que são as partes comestíveis. Dessa forma, a planta manteve suas características nutricionais.

Nas concentrações de 1 e 2  $\mu\text{g g}^{-1}$  de As ocorreu evidencia de mitigação dos danos por meio do aumento de NPQ e da atividade de CAT, assim como aumento na concentração de clorofila, mas na concentração mais elevada (4  $\mu\text{g g}^{-1}$ ), esses mecanismos não foram suficientes para prevenir danos severos. Os resultados revelaram que a retenção de As pode ser uma estratégia para limitar sua toxicidade nas partes aéreas da planta, além de contribuir para menor risco de entrada na cadeia trófica. Ainda assim, as adaptações observadas em *Pereskia aculeata* indicam uma capacidade limitada de tolerância ao arsenato, com potencial risco de acumulação de As em partes comestíveis da planta, comprometendo sua segurança para consumo humano.

## 9. REFERÊNCIAS

- Abbas, G., Murtaza, B., Bibi, I., Shahid, M., Niazi, N., Khan, M., Amjad, M., Hussain, M., Natasha, 2018. Arsenic Uptake, Toxicity, Detoxification, and Speciation in Plants: Physiological, Biochemical, and Molecular Aspects. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 59. <https://doi.org/10.3390/ijerph15010059>
- Almeida, M.E.F. de, Junqueira, A.M.B., Simão, A.A., Corrêa, A.D., 2014. Caracterização Química Das Hortaliças Não-Convencionais Conhecidas Como Ora-Pro-Nobis. *Original Article Biosci. J* 30, 431–439.
- Alves, D.T., Nascimento, M.H. da S., Martins, E.M.F., 2021. Pães Enriquecidos Com Ora-Pro-Nóbis: Elaboração E Avaliação Físico-Química, Microbiológica E Sensorial/ Bread Enriched With Ora-Pro-Nobis: Elaboration And Physicochemical, Microbiological And Sensorial Evaluation. *Brazilian Journal of Development* 7, 12633–12646. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n2-061>
- ANA, A.N.D.Á., 2012. Panorama da Qualidade das Águas Superficiais no Brasil. Brasília-DF.
- Agência Nacional de Vigilância Sanitária.,2022. INSTRUÇÃO NORMATIVA - IN Nº 160. Acesso em: <[http://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/IN\\_160\\_2022\\_.pdf/03a02bb0-7856-4da4-a6f8-6a1e99d487d9](http://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/IN_160_2022_.pdf/03a02bb0-7856-4da4-a6f8-6a1e99d487d9)>
- Anjum, S.A., Tanveer, M., Hussain, S., Bao, M., Wang, L., Khan, I., Ullah, E., Tung, S.A., Samad, R.A., Shahzad, B., 2015. Cadmium Toxicity In Maize (*Zea Mays L.*): Consequences On Antioxidative Systems, Reactive Oxygen Species And Cadmium Accumulation. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22, 17022–17030. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4882-z>
- Asgher, M., Ahmed, S., Sehar, Z., Gautam, H., Gandhi, S.G., Khan, N.A., 2021. Hydrogen Peroxide Modulates Activity And Expression Of Antioxidant Enzymes And Protects Photosynthetic Activity From Arsenic Damage In Rice (*Oryza sativa L.*). *J. Hazard. Mater.* 401, 123365. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123365>
- Ataíde, W.L. da S., Nogueira, G.A. dos S., Brito, A.E. de A., Lima, E.G. da S.,

- Palheta, J.G., Silva, K.R.S., Costa, T.C., Nascimento, V.R. do, Martins, J.T. da S., Machado, L.C., Neto, C.F. de O., 2018. Enzymatic and Non-enzymatic Antioxidant System in Young Plants of *Tachigali vulgaris* Submitted to Drought. *J. Agric. Sci.* 10, 479. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n11p479>
- Bali, A.S., Sidhu, G.P.S., 2021. Arsenic Acquisition, Toxicity And Tolerance In Plants - From Physiology To Remediation: A Review. *Chemosphere* 283, 131050. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131050>
- Barbalho, S.M., Guiguer, É.L., Marinelli, P.S., Do Santos Bueno, P.C., Pescinini-Salzedas, L.M., Dos Santos, M.C.B., Oshiiwa, M., Mendes, C.G., De Menezes, M.L., Nicolau, C.C.T., Otoboni, A.M., De Alvares Goulart, R., 2016. *Pereskia aculeata* Miller Flour: Metabolic Effects and Composition. *J Med Food* 19, 890–894. <https://doi.org/10.1089/jmf.2016.0052>
- Barros, J.P.A. de, 2020. Eficiência E Plasticidade Fotossintética Em Plantas De Ora-Pro-Nóbis Submetidas Ao Déficit Hídrico 1–85.
- Briat, J.F., Rouached, H., Tissot, N., Gaymard, F., Dubos, C., 2015. Integration Of P, S, Fe, And Zn Nutrition Signals In *Arabidopsis thaliana*: Potential Involvement Of Phosphate Starvation Response 1 (PHR1). *Front. Plant Sci.* 6, 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00290>
- Borba, R.P., Figueiredo, B.R., Cavalcanti, J.A., 2004. Arsênio Na Água Subterrânea Em Ouro Preto E Mariana, Quadrilátero Ferrífero (MG). *Revista Escola de Minas* 57, 45–51.
- Bundschuh, J., Litter, M.I., Parvez, F., Román-Ross, G., Nicolli, H.B., Jean, J.S., Liu, C.W., López, D., Armienta, M.A., Guilherme, L.R.G., Cuevas, A.G., Cornejo, L., Cumbal, L., Toujaguez, R., 2012. One Century Of Arsenic Exposure In Latin America: A Review Of History And Occurrence From 14 Countries. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.024>
- Campos, J.A., Oliveira, N.J.F. de, Chamba, J.S.V., Colen, F., Costa, C.A. da, Filho, A. da S.S., 2017. Brotação De Ora-Pro-Nóbis Em Substrato Alternativo De Casca De Arroz Carbonizada. *Holos* 7, 148–167. <https://doi.org/10.15628/holos.2017.6424>

- Chao, D.-Y., Chen, Y., Chen, J., Shi, S., Chen, Z., Wang, C., Danku, J.M., Zhao, F.-J., Salt, D.E., 2014. Genome-wide Association Mapping Identifies a New Arsenate Reductase Enzyme Critical for Limiting Arsenic Accumulation in Plants. *PLoS Biol.* 12, e1002009. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002009>
- Clark, R.B., 1975. Characterization Of Phosphatase Of Intact Maize Roots. *J Agric Food Chem* 23, 458–460. <https://doi.org/10.1021/jf60199a002>
- Clarkson, D.T., Sanderson, J., Scattergood, C.B., 1978. Influence Of Phosphate-Stress On Phosphate Absorption And Translocation By Various Parts Of The Root System Of *Hordeum vulgare* L. (barley). *Planta* 139, 47–53. <https://doi.org/10.1007/BF00390809>
- Cruz, A.F., Savicki, A., Eugenio Frentzel, A., Padilha Adam, I., de Oliveira Prado, L., Franqueto, L., Eugenia Balbi, M., 2020. “Ora-pro-nobis” (*Pereskia aculeata* Mill, cactaceae) No Consumo Humano. Non-Conventional Edible Plants: The Use Of “Ora-Pro-Nobis” (*Pereskia aculeata* Mill., Cactaceae) Leaves In Human Consumption. *Visão Acadêmica* 21, 19–33.
- Cumbus, I.P., Hornsey, D.J., Robinson, L.W., 1977. The Influence Of Phosphorus, Zinc And Manganese On Absorption And Translocation Of Iron In Watercress. *Plant Soil* 48, 651–660. <https://doi.org/10.1007/BF00145775>  
<https://doi.org/10.1007/BF00390809>
- Duman, F., Ozturk, F., Aydin, Z., 2010. Biological Responses Of Duckweed (*Lemna minor* L.) Exposed To The Inorganic Arsenic Species As<sup>iii</sup> And As<sup>v</sup>: Effects Of Concentration And Duration Of Exposure. *Ecotoxicology* 19, 983–993. <https://doi.org/10.1007/s10646-010-0480-5>
- Edwards, E.J., Donoghue, M.J., 2006. *Pereskia* and the Origin of the Cactus Life-Form. *Am Nat* 167, 777–793. <https://doi.org/10.1086/504605>
- Faquin, Valdemar *Nutrição Mineral de Plantas / Valdemar Faquin. -- Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. p.: il. - Curso de Pós-Graduação “Lato Sensu” (Especialização) a Distância: Solos e Meio Ambiente.*

- Feitoza, L.Q., Terra, F. de S., Grasselli, C. da S.M., 2021. Plantas Medicinais e seus Compostos com Potencial Terapêutico no Tratamento do Câncer: Revisão Integrativa. *Revista Brasileira de Cancerologia* 67.  
<https://doi.org/10.32635/2176-9745.rbc.2021v67n1.1114>
- Felipe, R.T.A., Oliveira, J.A. de, Leão, G.A., 2009. Potencial De *Cajanus Cajan* E *Crotalaria Spectabilis* Para fitorremediação: Absorção De Arsênio E Respostas Antioxidativas. *Revista Árvore* 33, 245–254. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622009000200006>
- Finnegan, P.M., Chen, W., 2012. Arsenic Toxicity: The Effects on Plant Metabolism. *Front Physiol* 3. <https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00182>
- Fonseca, Ú.A.C., Antônia Alcântara Amaral, C., Costa Liboredo, J., 2022. Consumo De Ora-Pro-Nobis Por Residentes No Município De Ouro Preto, Minas Gerais. *Anais do Congresso Nacional de Alimentos e Nutrição*.
- Garcia, J.A.A., Corrêa, R.C.G., Barros, L., Pereira, C., Abreu, R.M.V., Alves, M.J., Calheta, R.C., Bracht, A., Peralta, R.M., Ferreira, I.C.F.R., 2019. Phytochemical Profile And Biological Activities Of “Ora-Pro-Nobis” Leaves (*Pereskia aculeata* Miller), An Underexploited Superfood From The Brazilian Atlantic Forest. *Food Chem* 294, 302–308.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.074>
- Gay, C., Gebicki, J.M., 2000. A Critical Evaluation of the Effect of Sorbitol on the Ferric–Xylenol Orange Hydroperoxide Assay. *Anal Biochem* 284, 217–220.  
<https://doi.org/10.1006/abio.2000.4696>
- Giannopolitis, C.N., Ries, S.K., 1977. Superoxide Dismutases. *Plant Physiol* 59, 309–314.
- Gomes Filho, A.A.P., 2022. Participação Do Silício Nos Processos De Absorção, Translocação E Atenuação Da Toxicidade Do Arsênio Em Alface (*Lactuca sativa* L.) (Dissertação). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.573>
- Guimarães, J.R. de A., 2018. Caracterização Físico-Química E Composição Mineral De *Pereskia aculeata* Mill., *Pereskia grandifolia* Haw. E *Pereskia bleo* (Kunth)

DC. (Thesis). Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu.

Gururani, M.A., Venkatesh, J., Tran, L.S.P., 2015. Regulation of Photosynthesis during Abiotic Stress-Induced Photoinhibition. *Mol. Plant* 8, 1304–1320. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2015.05.005>

Gusman, G.S., Oliveira, J.A., Farnese, F.S., Cambraia, J., 2013. Arsenate And Arsenite: The Toxic Effects On Photosynthesis And Growth Of Lettuce Plants. *Acta Physiol Plant* 35, 1201–1209. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-1159-8>

Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M.H.M., Zulfiqar, F., Raza, A., Mohsin, S., Mahmud, J., Fujita, M., Fotopoulos, V., 2020. Reactive Oxygen Species And Antioxidant Defense In Plants Under Abiotic Stress: Revisiting The Crucial Role Of A Universal Defense Regulator. *Antioxidants* 9, 681. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>

Hodges, D.M., DeLong, J.M., Forney, C.F., Prange, R.K., 1999. Improving The Thiobarbituric Acid-Reactive-Substances Assay For Estimating Lipid Peroxidation In Plant Tissues Containing Anthocyanin And Other Interfering Compounds. *Planta* 207, 604–611. <https://doi.org/10.1007/s004250050524>

Isayenkov, S. V., Maathuis, F.J.M., 2008. The Arabidopsis Thaliana Aquaglyceroporin Atnip7;1 Is A Pathway For Arsenite Uptake. *FEBS Lett.* 582, 1625–1628. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2008.04.022>

Jung, H., Kong, M.-S., Lee, B.-R., Kim, T.-H., Chae, M.-J., Lee, E.-J., Jung, G.-B., Lee, C.-H., Sung, J.-K., Kim, Y.-H., 2019. Exogenous Glutathione Increases Arsenic Translocation Into Shoots and Alleviates Arsenic-Induced Oxidative Stress by Sustaining Ascorbate–Glutathione Homeostasis in Rice Seedlings. *Front. Plant Sci.* 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01089>

Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N.K., Rafiq, M., Bakhat, H.F., Imran, M., Abbas, T., Bibi, I., Dumat, C., 2017. Arsenic Behaviour In Soil-Plant System: Biogeochemical Reactions And Chemical Speciation Influences, In: *Enhancing Cleanup Of Environmental Pollutants*. Springer International Publishing, pp. 97–140. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-55423-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-55423-5_4)

- Khan, I., Awan, S.A., Rizwan, M., Ali, S., Zhang, X., Huang, L., 2021. Arsenic Behavior In Soil-Plant System And Its Detoxification Mechanisms In Plants: A Review. *Environmental Pollution*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117389>
- Kowalski, L., Dias da Silva, A., Rodrigues Pagno, A., Piana, M., 2020. Atividade Antimicrobiana de Flavonoides: uma Revisão de Literatura. *Revista Interdisciplinar em Ciências da Saúde e Biológicas* 4, 51–65. <https://doi.org/10.31512/ricsb.v4i1.119>
- Kramer, D.M., Johnson, G., Kiirats, O., Edwards, G.E., 2004. New Fluorescence Parameters for the Determination of Q A Redox State and Excitation Energy Fluxes. *Photosynth. Res.* 79, 209–218. <https://doi.org/10.1023/B:PRES.0000015391.99477.0d>
- Kumar, S., Dubey, R.S., Tripathi, R.D., Chakrabarty, D., Trivedi, P.K., 2015. Omics And Biotechnology Of Arsenic Stress And Detoxification In Plants: Current Updates And Prospective. *Environ Int.* <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.019>
- Kuo, M.C., Kao, C.H., 2003. Aluminum Effects on Lipid Peroxidation and Antioxidative Enzyme Activities in Rice Leaves. *Biol Plant* 46, 149–152. <https://doi.org/10.1023/A:1022356322373>
- Li, S., Yang, W., Yang, T., Chen, Y., Ni, W., 2015. Effects of Cadmium Stress on Leaf Chlorophyll Fluorescence and Photosynthesis of *Elsholtzia argyi*-A Cadmium Accumulating Plant. *Int. J. Phytoremediation* 17, 85–92. <https://doi.org/10.1080/15226514.2013.828020>
- Ma, J.F., Yamaji, N., Mitani, N., Xu, X.-Y., Su, Y.-H., McGrath, S.P., Zhao, F.-J., 2008. Transporters Of Arsenite In Rice And Their Role In Arsenic Accumulation In Rice Grain. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 105, 9931–9935. <https://doi.org/10.1073/pnas.0802361105>
- Malik, J.A., Goel, S., Kaur, N., Sharma, S., Singh, I., Nayyar, H., 2012. Selenium Antagonises The Toxic Effects Of Arsenic On Mungbean (*Phaseolus aureus* Roxb.) Plants By Restricting Its Uptake And Enhancing The Antioxidative And Detoxification Mechanisms. *Environ. Exp. Bot.* 77, 242–248.

<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.12.001>

Marin, A.R., Pezeshki, S.R., Masschelen, P.H., Choi, H.S., 1993. Effect Of Dimethylarsenic Acid (DMAA) On Growth, Tissue Arsenic, And Photosynthesis Of Rice Plants. *J Plant Nutr* 16, 865–880.

<https://doi.org/10.1080/01904169309364580>

Martínez-Castillo, J.I., Saldaña-Robles, A., Ozuna, C., 2022. Arsenic Stress In Plants: A Metabolomic Perspective. *Plant Stress* 3.

<https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100055>

Mathan, K.K., Amberger, A., 1977. Influence Of Iron On The Uptake Of Phosphorus By Maize. *Plant Soil* 46, 413–422. <https://doi.org/10.1007/BF00010097>

Mawia, A.M., Hui, S., Zhou, L., Li, H., Tabassum, J., Lai, C., Wang, J., Shao, G., Wei, X., Tang, S., Luo, J., Hu, S., Hu, P., 2021. Inorganic Arsenic Toxicity And Alleviation Strategies In Rice. *J Hazard Mater* 408, 124751.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124751>

Melo, R.F., Dias, L.E., Assis, I.R., Faria, A.F., 2007. Influência Do Arsênio E Fósforo Sobre O Crescimento De Duas Essências Florestais. *Conquistas E Desafios Da Ciência Do Solo Brasileira*

Mensah, A.K., Shaheen, S.M., Rinklebe, J., Heinze, S., Marschner, B., 2022. Phytoavailability And Uptake Of Arsenic In Ryegrass Affected By Various Amendments In Soil Of An Abandoned Gold Mining Site. *Environ. Res.* 214.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113729>

Ministério da Saúde., 2021. PORTARIA GM/MS N° 888. Acesso em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>>

Mostofa, M.G., Rahman, M.M., Nguyen, K.H., Li, W., Watanabe, Y., Tran, C.D., Zhang, M., Itouga, M., Fujita, M., Tran, L.-S.P., 2021. Strigolactones Regulate Arsenate Uptake, Vacuolar-Sequestration And Antioxidant Defense Responses To Resist Arsenic Toxicity In Rice Roots. *J. Hazard. Mater.* 415, 125589.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125589>

- Nascimento, K. dos S., Carvalho, C.B. de M., Gomes, N. de S., Rodrigues, A. da C.C., Barros, L. de S., Nascimento, R.R. do, LACERDA, J.J. de J., EDVAN, R.L., 2018. Macrominerais De Genotipos De Palma Forrageira Submetidos A Períodos De Armazenamento Pós-Colheita.
- NEPA/UNICAMP, N. de E. e P. em A., 2011. Tabela Brasileira de Composicao de Alimentos, 4th ed. Campinas.
- Noor, I., Sohail, H., Sun, J., Nawaz, M.A., Li, G., Hasanuzzaman, M., Liu, J., 2022. Heavy Metal And Metalloid Toxicity In Horticultural Plants: Tolerance Mechanism And Remediation Strategies. *Chemosphere* 303, 135196. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135196>
- Pandey, C., Khan, E., Panthri, M., Tripathi, R.D., Gupta, M., 2016. Impact Of Silicon On Indian Mustard (*Brassica juncea* L.) Root Traits By Regulating Growth Parameters, Cellular Antioxidants And Stress Modulators Under Arsenic Stress. *Plant Physiol. Biochem.* 104, 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.03.032>
- Peixoto, P.H.P., 1999. Aluminum Effects On Lipid Peroxidation And On The Activities Of Enzymes Of Oxidative Metabolism In Sorghum. *Braz J Plant Physiol* 11, 137–143.
- Pereira, W.E., de Siqueira, D.L., Martínez, C.A., Puiatti, M., 2000. Gas Exchange And Chlorophyll Fluorescence In Four Citrus Rootstocks Under Aluminium Stress. *J. Plant Physiol.* 157, 513–520. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(00\)80106-6](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(00)80106-6)
- Pinto, N. de C.C., Cassini-Vieira, P., Souza-Fagundes, E.M. de, Barcelos, L.S., Castañon, M.C.M.N., Scio, E., 2016. *Pereskia aculeata* Miller Leaves Accelerate Excisional Wound Healing In Mice. *J Ethnopharmacol* 194, 131–136. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2016.09.005>
- Piršelová, B., Boleček, P., Gálusová, T., 2016. Effect Of Cadmium And Arsenic On Chlorophyll Fluorescence Of Selected Soybean Cultivars. *Russ. J. Plant Physiol.* 63, 469–473. <https://doi.org/10.1134/S1021443716040129>

- Piršelová, B., Galuščáková, L., Lengyelová, L., Kubová, V., Jandová, V., Hegrová, J., 2022. Assessment of the Hormetic Effect of Arsenic on Growth and Physiology of Two Cultivars of Maize (*Zea mays* L.). *Plants* 11.  
<https://doi.org/10.3390/plants11243433>
- Punshon, T., Jackson, B.P., Meharg, A.A., Warczack, T., Scheckel, K., Guerinot, M. Lou, 2017. Understanding Arsenic Dynamics In Agronomic Systems To Predict And Prevent Uptake By Crop Plants. *Sci. Total Environ.* 581–582, 209–220.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.111>
- Rahman, A., Mostofa, M.G., Alam, M.M., Nahar, K., Hasanuzzaman, M., Fujita, M., 2015. Calcium Mitigates Arsenic Toxicity in Rice Seedlings by Reducing Arsenic Uptake and Modulating the Antioxidant Defense and Glyoxalase Systems and Stress Markers. *Biomed Res. Int.* 2015, 1–12.  
<https://doi.org/10.1155/2015/340812>
- Ralph, P.J., Gademann, R., 2005. Rapid Light Curves: A Powerful Tool To Assess Photosynthetic Activity. *Aquat. Bot.* 82, 222–237.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2005.02.006>
- Ralph, P.J., Macinnis-Ng, C.M.O., Frankart, C., 2005. Fluorescence Imaging Application: Effect Of Leaf Age On Seagrass Photokinetics. *Aquat. Bot.* 81, 69–84. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2004.11.003>
- Rascio, N., Navari-Izzo, F., 2011. Heavy Metal Hyperaccumulating Plants: How And Why Do They Do It? And What Makes Them So Interesting? *Plant Science.*  
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.08.016>
- Reddy, A.R., Chaitanya, K.V., Vivekanandan, M., 2004. Drought-Induced Responses Of Photosynthesis And Antioxidant Metabolism In Higher Plants. *J. Plant Physiol.* 161, 1189–1202. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.01.013>
- Rosas-Castor, J.M., Guzmán-Mar, J.L., Hernández-Ramírez, A., Garza-González, M.T., Hinojosa-Reyes, L., 2014. Arsenic Accumulation In Maize Crop (*Zea mays*): A Review. *Sci. Total Environ.* 488–489, 176–187.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.075>
- Ruíz-Torres, C., Feriche-Linares, R., Rodríguez-Ruíz, M., Palma, J.M., Corpas, F.J.,

2017. Arsenic-Induced Stress Activates Sulfur Metabolism In Different Organs Of Garlic (*Allium sativum* L.) Plants Accompanied By A General Decline Of The NADPH-Generating Systems In Roots. J. Plant Physiol. 211, 27–35.  
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.010>

Sabará, 2023. 25° Festival Do Ora-Pro-Nóbis. Prefeitura De Sabará. Acesso em:  
<<https://orapronobis.sabara.mg.gov.br/>>

Saha, J., Majumder, B., Mumtaz, B., Biswas, A.K., 2017. Arsenic-Induced Oxidative Stress And Thiol Metabolism In Two Cultivars Of Rice And Its Possible Reversal By Phosphate. Acta Physiol. Plant. 39, 263.  
<https://doi.org/10.1007/s11738-017-2562-y>

Sartor, C.F.P., Valéria do Amaral, Hudson Efrain Theodoro Guimarães, Kellen Nobre de Barros, Daniele Fernanda Felipe, Lúcia Elaine Ranieri Cortez, Vanessa Cristina Veltrini, 2010. Estudo da Ação Cicatrizante das Folhas de *Pereskia Aculeata*. Revista Saúde e Pesquisa 3, 149–154.

Sharma, I., 2012. Arsenic Induced Oxidative Stress In Plants. Biologia (Bratisl) 67, 447–453. <https://doi.org/10.2478/s11756-012-0024-y>

Sharma, S., Anand, G., Singh, N., Kapoor, R., 2017. Arbuscular Mycorrhiza Augments Arsenic Tolerance in Wheat (*Triticum aestivum* L.) by Strengthening Antioxidant Defense System and Thiol Metabolism. Front. Plant Sci. 8.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00906>

Sejima, T., Takagi, D., Fukayama, H., Makino, A., Miyake, C., 2014. Repetitive Short-Pulse Light Mainly Inactivates Photosystem I in Sunflower Leaves. Plant Cell Physiol. 55, 1184–1193. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcu061>

Seth, C.S., Chaturvedi, P.K., Misra, V., 2007. Toxic Effect Of Arsenate And Cadmium Alone And In Combination On Giant Duckweed (*Spirodela polyrrhiza* L.) In Response To Its Accumulation. Environ. Toxicol. 22, 539–549.  
<https://doi.org/10.1002/tox.20292>

Singh, N., Ma, L.Q., Srivastava, M., Rathinasabapathi, B., 2006. Metabolic Adaptations To Arsenic-Induced Oxidative Stress In *Pteris vittata* L And *Pteris ensiformis* L. Plant Sci. 170, 274–282.

<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.08.013>

- Song, Y., Zhang, F., Li, H., Qiu, B., Gao, Y., Cui, D., Yang, Z., 2020. Antioxidant Defense System In Lettuces Tissues Upon Various As Species Exposure. *J. Hazard. Mater.* 399, 123003. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123003>
- Streit, N.M., Canterle, L.P., Canto, M.W. do, Hecktheuer, L.H.H., 2005. As Clorofilas. *Ciência Rural* 35, 748–755. <https://doi.org/10.1590/s0103-84782005000300043>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., e Murphy, A. (2017). *Fisiologia E Desenvolvimento Vegetal*. Artmed Editora.
- Takagi, D., Takumi, S., Hashiguchi, M., Sejima, T., Miyake, C., 2016. Superoxide and Singlet Oxygen Produced within the Thylakoid Membranes Both Cause Photosystem I Photoinhibition. *Plant Physiol.* 171, 1626–1634. <https://doi.org/10.1104/pp.16.00246>
- Takeiti, C.Y., Antonio, G.C., Motta, E.M.P., Collares-Queiroz, F.P., Park, K.J., 2009. Nutritive Evaluation Of A Non-Conventional Leafy Vegetable (*Pereskia aculeata* Miller). *Int J Food Sci Nutr* 60, 148–160. <https://doi.org/10.1080/09637480802534509>
- US EPA, U.S.E.P.A., 2000. National Primary Drinking Water Regulations: Arsenic and Clarifications to Compliance and New Source Contaminants Monitoring. Office of the Federal Register, National Archives and Records Administration.
- Wang, Y., Chai, L., Yang, Z., Mubarak, H., Tang, C., 2016. Chlorophyll Fluorescence in Leaves of *Ficus tikoua* Under Arsenic Stress. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 97, 576–581. <https://doi.org/10.1007/s00128-016-1905-5>
- Wellburn, A.R., 1994. The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. *J Plant Physiol* 144, 307–313. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)
- World Health Organization., 2022. Arsenic. Acesso em: <<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>>
- Wilson, S.C., Tighe, M., Paterson, E., Ashley, P.M., 2014. Food Crop Accumulation

And Bioavailability Assessment For Antimony (Sb) Compared With Arsenic (As) In Contaminated Soils. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 21, 11671–11681.

<https://doi.org/10.1007/s11356-014-2577-5>

Zhao, F.J., McGrath, S.P., Meharg, A.A., 2010. Arsenic As A Food Chain Contaminant: Mechanisms Of Plant Uptake And Metabolism And Mitigation Strategies. *Annu Rev Plant Biol* 61, 535–559. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112152>

Zulfiqar, F., Ashraf, M., 2022. Antioxidants As Modulators Of Arsenic-Induced Oxidative Stress Tolerance In Plants: An Overview. *J. Hazard. Mater.* 427, 127891. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127891>