



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
DOUTORADO EM AGRONOMIA

EDER SILVA DE OLIVEIRA

**BIOFORTIFICAÇÃO E TOXIDAZ POR SELÊNIO E FITOEXTRAÇÃO DE
CÁDMIO EM PLANTAS DE JAMBU CULTIVADAS EM HIDROPONIA**

BELÉM/PARÁ

2021

EDER SILVA DE OLIVEIRA

**BIOFORTIFICAÇÃO E TOXIDEZ POR SELÊNIO E FITOEXTRAÇÃO DE
CÁDMIO EM PLANTAS DE JAMBU CULTIVADAS EM HIDROPONIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia (PPGAGRO) da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Mário Lopes da Silva Junior.

BELÉM/PARÁ

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O48b Oliveira, Eder Silva de
BIOFORTIFICAÇÃO E TOXIDEZ POR SELÊNIO E FITOEXTRAÇÃO DE CÁDMIO EM
PLANTAS DE JAMBU CULTIVADAS EM HIDROPONIA / Eder Silva de Oliveira. - 2021.
131 f. : il. color.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA), Campus
Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Mario Lopes Silva Junior

1. Acmella Oleracea . 2. Índice de Translocação. 3. Índice de Tolerância. 4. Indicadores
Multivariados. 5. Efeito hormético. I. , Mario Lopes Silva Junior, orient. II. Título

CDD 631.585

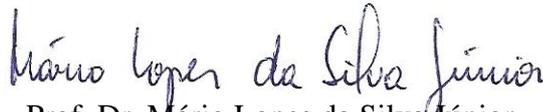
EDER SILVA DE OLIVEIRA

**BIOFORTIFICAÇÃO E TOXIDEZ POR SELÊNIO E FITOEXTRAÇÃO DE
CÁDMIO EM PLANTAS DE JAMBU CULTIVADAS EM HIDROPONIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em
Agronomia (PPGAGRO) da Universidade Federal Rural da
Amazônia (UFRA) como requisito parcial para a obtenção
do título de Doutor em Agronomia.

Defesa: Belém (PA), 28 de junho de 2021.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Mário Lopes da Silva Júnior
Orientador – Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Documento assinado digitalmente

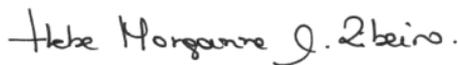
gov.br

WANDERLI ROGERIO MOREIRA LEITE

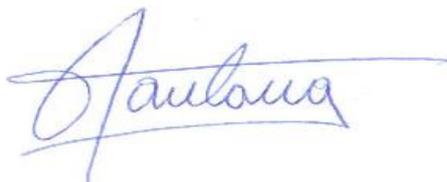
Data: 09/12/2021 14:10:38-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Wanderli Rogério Moreira Leite
Examinador Externo – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)



Profa. Dra. Hebe Morganne Campos Ribeiro
Examinadora Externa – Universidade do Estado do Pará - UEPA



Prof. Dr. Antônio Cordeiro de Santana
Examinador Interno - Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)



Prof. Dr. Gledson Luiz Salgado de Castro
Examinador Interno - Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

À minha esposa Gilmara pelo amor, cumplicidade e apoio incondicional que me dedica em todos esses anos de união.

Aos meus filhos Daniel e Pedro pelo amor e carinho com que me cercam todos os dias.

À minha mãe Cecília e ao meu Pai José (in memoriam) pela dedicação e apoio para que eu pudesse conquistar mais uma vitória em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Deus pela vida, graça e sabedoria para alcançar essa vitória.

À Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), ao Programa de Pós-graduação em Agronomia (PPGAGRO) e todo seu corpo docente e técnico pelos conhecimentos que me foram proporcionados e pela oportunidade de elaboração da tese de doutorado.

À Universidade do Estado do Pará (UEPA) pelo apoio financeiro e analítico laboratorial.

Ao meu orientador Professor Dr. Mário Lopes da Silva Júnior, pela orientação, solicitude, construção e compartilhamento de conhecimentos de fronteira.

Aos professores Antônio Cordeiro de Santana, Antônio Rodrigues Fernandes e ao Dr. Jessivaldo Rodrigues Galvão pelo apoio analítico na modelagem estatística e operacionalização do experimento.

Aos colegas de graduação Ricardo Falesi, Gabriel Leão, Washigton Aleksander e pós-graduação Ítalo Sampaio, Vivian Costa, Letícia Hungria e Yan Nunes UFRA/UEPA pelo apoio operacional na condução dos experimentos, análises, debates e construção da pesquisa.

Aos meus pais, José Gonçalves de Oliveira (*in memoriam*) e Cecília Silva de Oliveira, por todo amor, esforço e dedicação em minha criação.

À amiga Márcia Nágem Krag, que apesar da distância nesse momento, pelo incentivo, amizade e apoio em todas as situações.

Um agradecimento especial à minha amada esposa, Gilmara Oliveira, que sempre com muito amor e paciência nunca hesitou em me auxiliar e cuidar de mim em todos os momentos, inclusive ajudando neste momento de elaboração de tese.

Feliz o homem que acha sabedoria e o homem que adquire conhecimento.

(Provérbios 3:13).

RESUMO

O jambu é uma planta nativa das regiões tropicais, principalmente da Amazônia Brasileira, e vastamente utilizada na gastronomia regional. O objetivo dessa tese foi analisar o comportamento do jambu [*Acmella oleracea* (L.)] quanto à capacidade de toxidez, biofortificação e fitoextração. Os experimentos foram individualizados para toxidez e biofortificação por Selênio (Se) e fitoextração e tolerância ao Cádmio (Cd). Os delineamentos experimentais foram inteiramente casualizados e conduzidos em casa de vegetação por sistema hidropônico. O primeiro experimento analisou o comportamento fisiológico, biométrico e de conteúdo de Se e contou com quatro tratamentos e 15 repetições, totalizando 60 plantas. Foram utilizadas três doses de Se na forma de selenato de sódio (5, 10 e 20 mg.L⁻¹), mais controle (zero de Se). O segundo experimento avaliou o potencial de biofortificação e contou com seis tratamentos e cinco repetições, utilizando o Se, também na forma de selenato, com doses de 1, 2, 3, 4 e 5 mg.L⁻¹ e mais controle. O terceiro experimento avaliou a capacidade de fitoextração, tolerância e conteúdo de Cd no jambu e foi desenvolvido com cinco tratamentos e seis plantas por tratamento. As doses utilizadas foram de 1, 3, 6 e 9 mg.L⁻¹, mais controle (zero de Cd). Os dados foram submetidos à ANOVA, construção de indicadores multivariados e composição do modelo de regressão. No experimento de toxidez de Se, os dados morfofisiológicos, mostraram efeito benéfico para a planta até 5 mg.L⁻¹, com conteúdo de 462,15 µg.kg⁻¹ de Se na parte aérea. A partir de 10 mg.L⁻¹ de Se, a planta passa mostrar sinais de toxidez até a dose letal de 20 mg.L⁻¹. Com a utilização de indicadores multivariados, foi possível ter uma visão mais ampla da relação dose/resposta e estimar através dos modelos de regressão a concentração de 2,95 mg.L⁻¹ de Se na solução, como dose ótima para o melhor desempenho do jambu. No segundo experimento o jambu obteve seu maior desempenho agrônomico quanto suplementado com até 3 mg.L⁻¹ de Se. A análise mais sistêmica dos indicadores multivariados mostrou que entre 2,77 e 3,36 mg.L⁻¹ de Se o jambu absorveu mais nutrientes, otimizou o crescimento e o ganho de massa. Com base no indicador geral multivariado, a dose ideal para biofortificação com fins de nutrição humana foi de 2,98 mg.L⁻¹ Se, onde o consumo diário de 100g de jambu biofortificado irá fornecer 50,13 µg.dia⁻¹ de Se, disponibilizando para a população quantidade do elemento necessária para uma dieta equilibrada. O terceiro experimento mostrou que em pequenas doses (1 e 3 mg.L⁻¹), a planta apresentou ganho de massa e maior desempenho fotossintético, porém a partir de 6 mg.L⁻¹ esse efeito é inverso. O jambu não é uma planta hiperacumuladora de Cd, porém é tolerante ao metal, apresentando inclusive efeito hormético. Com 28 dias de exposição a 1mg.L⁻¹ de Cd

em solução nutritiva, a planta concentrou em sua parte aérea $1,35 \text{ mg.kg}^{-1}$ de Cd, valor 6,5 vezes maior que o permitido pela ANVISA para hortaliças folhosas. A pesquisa permitiu concluir que o jambu é tolerante e fitoextrator de Cd e pode ser biofortificado a doses crescentes de Se desde que respeitados os limites de consumo diário e os níveis de toxidez planta.

Palavras-chave: Hormese. Cádmio. Selênio. Índice de translocação. Índice de tolerância.

ABSTRACT

Jambu is a plant native to tropical regions, mainly from the Brazilian Amazon, and widely used in regional cuisine. The objective of the thesis research was to analyze the behavior of jambu [*Acmella oleracea* (L.) R. K. Jansen] regarding its toxicity, biofortification and phytoextraction capacity. The experiments were individualized for toxicity and biofortification by Selenium (Se) and phytoextraction and tolerance to Cadmium (Cd). The experimental designs were completely randomized and carried out in a greenhouse using a hydroponic system. The first experiment analyzed the physiological, biometric and Se content behavior and had 4 treatments and 15 repetitions, totaling 60 plants. Three doses of selenium were used in the form of sodium selenate (5, 10 and 20 mg.L⁻¹), plus the control (zero of Se). The second experiment evaluated the biofortification potential and had 6 treatments and 5 repetitions, using selenium, also in the form of selenate, with doses of 1, 2, 3, 4 and 5 mg.L⁻¹ and more control. The third experiment evaluated the phytoextraction capacity, tolerance and Cd content in jambu and was developed with 5 treatments and 6 plants per treatment. The doses used were 1, 3, 6 and 9 mg.L⁻¹, plus control (zero of Cd). Data were submitted to ANOVA, construction of multivariate indicators and composition of the regression model. In the Se toxicity experiment, the morphophysiological data showed a beneficial effect for the plant up to 5 mg.L⁻¹, with a content of 462.15 µg.kg⁻¹ of Se in the aerial part. From 10 mg.L⁻¹ of Se, the plant starts to show signs of toxicity up to a lethal dose of 20 mg.L⁻¹. With the use of multivariate indicators, it was possible to have a broader view of the dose/response relationship and to estimate, through regression models, the concentration of 2.95 mg.L⁻¹ of Se in the solution, as the optimal dose for the best performance of the jambu. The second experiment showed that jambu obtained its greatest agronomic performance when supplemented with up to 3 mg.L⁻¹ of Se. A more systemic analysis of the multivariate indicators showed that between 2.77 and 3.36 mg.L⁻¹ of Se the jambu absorbed more nutrients, optimized its growth and mass gain. Based on the multivariate general indicator, the ideal dose for biofortification for human nutrition purposes was 2.98 mg.L⁻¹ Se, where the daily consumption of 100g of biofortified jambu will provide 50.13 µg.day⁻¹ of Se, making available to the population the amount of the element necessary for a balanced diet. The third experiment showed that in small doses (1 and 3 mg.L⁻¹), the plant showed mass gain and greater photosynthetic performance, but from 6 mg.L⁻¹ onwards this effect is inverse. Jambu is not a Cd hyperaccumulating plant, but it is tolerant to the metal, even presenting a hormetic

effect. After 28 days of exposure to $1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of Cd in nutrient solution, the plant concentrated in its aerial part $1.35\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ of Cd, a value 6.5 times higher than that allowed by ANVISA for leafy vegetables. The research allowed us to conclude that jambu is tolerant and phytoextractor of Cd and can be biofortified to increasing doses of Se, as long as daily consumption limits and plant toxicity levels are respected.

Keywords: Hormesis. Cadmium. Selenium. Translocation index. Tolerance index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Indicador multivariado de crescimento (Ic) do Jambu submetido a doses de Se. ...	49
Figura 2 - Sintomas de toxidez de plantas de Jambu expostas a doses crescentes de Se.	51
Figura 3 - Indicador de ganho de massa do Jambu submetido a doses de Se.	52
Figura 4 - Arqueamento das folhas de jambu expostas a 20 mg.L ⁻¹ de Se, com 21 dias de tratamento.	53
Figura 5 - Clorose das folhas de jambu expostas a doses de 10 e 20 mg.L ⁻¹ de Se, com 21 dias de tratamento.	53
Figura 6 - Indicador fisiológico (If) do Jambu submetido a doses de Se.	54
Figura 7 - Indicador geral (Ig) do Jambu submetido a doses de Se.	55
Figura 8 - Conteúdo médio de Se nas folhas de jambu em µg.kg ⁻¹	57
Figura 9 - Conteúdo médio de Se no caule de jambu em µg.kg ⁻¹	58
Figura 10 - Conteúdo médio de Se na raiz de jambu em µg.kg ⁻¹	59
Figura 11 - Conteúdo médio de Se na parte aérea (PA) do jambu em µg.kg ⁻¹	59
Figura 12 - Índice de tolerância (It) do Jambu submetido a doses de Se.	60
Figura 13 - Conteúdo médio de selênio na parte aérea (PA) em plantas de jambu.	78
Figura 14 - Índice de Tolerância do Jambu em g.planta ⁻¹ , submetido a doses de Se.	80
Figura 15 - Eficiência no uso de nutrientes do Jambu em g.planta ⁻¹ , submetido a doses de Se.	81
Figura 16 - Indicador de crescimento (Ic) de plantas de jambu submetidas a doses crescentes de Se.	82
Figura 17 - Indicador de ganho de massa (Im) de plantas de jambu submetidas a doses crescentes de Se.	83
Figura 18 - Indicador de concentração de nutrientes (ICn) de plantas de jambu submetidas a doses crescentes de Se.	83
Figura 19 - Indicador de acúmulo de nutrientes (IAN) de plantas de jambu submetidas a doses crescentes de Se.	84
Figura 20 - Indicador Geral (Ig) de plantas de jambu submetidas a doses crescentes de Se. ...	85
Figura 21 - Conteúdo de Cd na parte aérea do jambu cultivado em hidroponia (mg.kg ⁻¹). ...	110
Figura 22 - Índice de Tolerância (It) do Jambu em g.planta ⁻¹ , submetido a doses de Cd.	117
Figura 23 - Índice de Eficiência de Uso de Nutrientes (Eun) do Jambu em g.planta ⁻¹ , submetido a doses de Cd.	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados das análises biométricas e de trocas gasosas.	48
Tabela 2 - Modelos de Regressão dos indicadores multivariados mostrando o comportamento do jambu e dose ideal para cada indicador.	56
Tabela 3 - Conteúdo médio de selênio em plantas de jambu.	78
Tabela 4 - Acúmulo médio de selênio em plantas de jambu.	79
Tabela 5 - Índice de Translocação Se em plantas de jambu.	80
Tabela 6 - Análise de regressão dos indicadores multivariados do experimento de biofortificação.	85
Tabela 7 - Resultado das variáveis biométricas do jambu exposto ao Cd e cultivado em hidroponia.	107
Tabela 8 - Resultado das variáveis fisiológicas do jambu exposto ao Cd e cultivado em hidroponia.	108
Tabela 9 - Conteúdo de Cd em jambu cultivado em hidroponia ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).	109
Tabela 10 - Conteúdo de nutrientes em jambu exposto ao Cd e cultivado em hidroponia ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).	112
Tabela 11 - Acúmulo de cádmio em jambu cultivado em hidroponia ($\text{g}\cdot\text{planta}^{-1}$).	113
Tabela 12 - Acúmulo de nutrientes em jambu exposto com Cd em $\text{g}\cdot\text{planta}^{-1}$ cultivado em hidroponia.	115
Tabela 13 - Índice de translocação (Tr em %) de cádmio em jambu.	116
Tabela 14 - Análise de variância dos indicadores multivariados do jambu exposto ao Cd. ..	119
Tabela 15 - Modelos de Regressão dos indicadores multivariados mostrando o comportamento do jambu contaminadas com Cd.	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Taxa de assimilação líquida de CO ₂
Ac	Índice de acúmulo
ACP	Análise de componentes principais
ANOVA	Análise de variância
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
AP	Altura da planta
Ca	Cálcio
Cd	Cádmio
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DC	Diâmetro do caule
E	Transpiração
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EUA	Estados Unidos da América
Eun	Índice de uso eficiente de nutrientes
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i> , traduzido: Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
Fe	Ferro
gs	Condutância estomática
IAn	Indicador de acúmulo de nutrientes
Ic	Indicador de crescimento
ICn	Indicador de concentração de nutrientes
If	Indicador fisiológico
Ig	Indicador geral
Im	Indicador de massa
It	Índice de tolerância
K	Potássio
Li	Lítio
MFC	Massa fresca de caule
MFF	Massa fresca de folha
MFR	Massa Fresca de raiz

Mg	Magnésio
Mn	Manganês
MSC	Massa seca de caule
MSF	Massa seca de folha
MSI	Massa seca de inflorescência
MSR	Massa seca de raiz
N	Nitrogênio
Na	Sódio
Na ₂ SeO ₄	Selenato de sódio
Na ₂ SeO ₃	Selenito de sódio
NF	Número de folhas
Ni	Níquel
NI	Número de inflorescência
NPK	Nitrogênio, Fósforo e Potássio
NR	Número de ramos
P	Fósforo
Pb	Chumbo
Se	Selênio
Tr	Índice de translocação
UEPA	Universidade do Estado do Pará
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRA	Universidade Federal Rural da Amazônia
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1	CONTEXTUALIZAÇÃO	18
1.1	Revisão de Literatura	23
1.1.1	Biofortificação agrônômica de alimentos.....	23
1.1.2	O elemento selênio e seu potencial na biofortificação	24
1.1.3	Metais pesados.....	27
1.1.4	O metal cádmio e sua toxidez.....	27
	REFERÊNCIAS	30
2	TOXIDEZ DE SELÊNIO EM PLANTAS DE JAMBU <i>ACMELLA OLERACEA</i> (L.) R. K. JANSEN CULTIVADO EM HIDROPONIA	37
2.1	Introdução	39
2.2	Material e Métodos	40
2.2.1	Procedimentos experimentais	40
2.2.2	Análises laboratoriais	41
2.2.2.1	Análise Biométrica.....	41
2.2.2.2	Determinação de troca gasosa em folhas	42
2.2.2.3	Análises Químicas.....	42
2.2.3	Modelo Estatístico de análise	43
2.2.3.1	A técnica de Análise de componentes principais (ACP)	43
2.2.3.1.1	Construção dos Indicadores Estatísticos	44
2.2.3.2	A análise de regressão.....	45
2.3	Resultados	46
2.3.1	Dimensão Crescimento.....	46
2.3.2	Dimensão Massa.....	49
2.3.3	Dimensão Fisiológica	54
2.3.4	Conteúdo de Se e índice de Tolerância (It)	57
2.4	Discussões	61
2.5	Conclusão	62
	REFERÊNCIAS	63
3	BIOFORTIFICAÇÃO DE SELÊNIO EM PLANTAS DE JAMBU [<i>ACMELLA OLERACEA</i> (L.) R. K. JANSEN] CULTIVADAS EM HIDROPONIA	67

3.1	Introdução	69
3.2	Material e métodos	71
3.2.1	Procedimentos experimentais	71
3.2.2	Análises laboratoriais	72
3.2.2.1	Análise Biométrica.....	72
3.2.2.2	Análises químicas	73
3.2.3	Índice de translocação, tolerância e uso eficiente dos nutrientes	73
3.2.3.1	A técnica de Análise de componentes principais (ACP)	74
3.2.3.1.1	Construção dos Indicadores Estatísticos	75
3.2.3.2	A análise de regressão.....	76
3.3	Resultados.....	77
3.3.1	Índice de Translocação (Tr).....	79
3.3.2	Índice de tolerância (It).....	79
3.3.3	Índice do uso eficiente dos nutrientes.....	80
3.3.4	Indicadores multivariados.....	81
3.4	Discussões	86
3.5	Conclusão	89
	REFERÊNCIAS.....	90
4	EFEITO HORMÉTICO DE CD EM <i>ACMELLA OLERACEA</i> (L.) R. K. JANSEN, CULTIVADA EM SOLUÇÃO NUTRITIVA	94
4.1	Introdução	98
4.2	Material e métodos	100
4.2.1	Procedimentos experimentais	100
4.2.2	Sistema de Cultivo.....	101
4.2.3	Produção de Mudanças	101
4.2.4	Delineamento Experimental	101
4.2.5	Procedimentos Analíticos laboratoriais	102
4.2.5.1	Análise Biométrica	102
4.2.5.2	Troca gasosa em folhas.....	102
4.2.5.3	Análises Químicas	103
4.2.6	Índice de Translocação, Tolerância e Uso Eficiente de Nutrientes	103
4.2.7	Modelo Estatístico de análise	104
4.2.7.1	A técnica de Análise de componentes principais (ACP)	104

4.2.7.1.1	Construção dos Indicadores Estatísticos	105
4.2.7.2	A análise de regressão.....	106
4.3	Resultados.....	107
4.3.1	Massa e Crescimento	107
4.3.2	Trocas Gasosas	108
4.3.3	Conteúdo de Cádmio	109
4.3.4	Conteúdo de Nutrientes	110
4.3.5	Índice de Acúmulo de Cádmio	113
4.3.6	Índice de Acúmulo de Nutrientes	114
4.3.7	Índice de Translocação (Tr) do Cádmio	115
4.3.8	Índices de Tolerância (It) e Uso eficiente de Nutrientes (Uen).....	116
4.3.9	Indicadores Multivariados	117
4.4	Discussões	120
4.5	Conclusão	123
	REFERÊNCIAS.....	124
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	129

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A desnutrição é uma realidade que se apresenta em várias nações, um contraponto ao direito fundamental de todo ser humano de ter uma alimentação saudável (KHUSCH; LEE; CHO, 2012; MARQUES JÚNIOR *et al.*, 2017). As consequências de uma deficiência nutricional, ou fome oculta, são as mais diversas, dentre elas pode-se citar o retardo mental, crescimento inadequado, maior susceptibilidade a doenças, entre outras (GONÇALVES *et al.*, 2015; VALENCIA *et al.*, 2017).

Estas consequências são mais perceptíveis no continente africano, porém, segundo a *Food and Agriculture Organization*¹ (FAO, 2020), desde 2014 a América Latina e o Caribe vêm sofrendo com o aumento de insegurança alimentar devido à baixa qualidade dos alimentos. Este problema tende a ser maximizado, principalmente nos países em desenvolvimento, com o aumento da população mundial que deve atingir oito bilhões de pessoas no ano de 2030 (KHUSCH; LEE; CHO, 2012).

Como estratégia para minimizar os efeitos e combater a desnutrição e a insegurança alimentar mundial surge a biofortificação, que consiste na suplementação nutricional através de adubação em culturas agrônômicas (alface, milho, feijão, arroz, manjeriço, entre outros) e melhoramento genético de plantas (MARQUES JUNIOR *et al.*, 2017; PUCCINELLI *et al.*, 2017; VALENÇA *et al.*, 2017; LOUREIRO *et al.*, 2018).

Em países como a Suíça e Finlândia, por exemplo, a biofortificação agrônômica a base de selênio (Se) ocorre desde a década de 1980, com a incorporação do elemento na adubação por convencional (EICHHOLZER, 2003; ALFTHAN *et al.*, 2015). No Brasil, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) vem desenvolvendo estratégias biofortificação de culturas tradicionais para diminuir a desnutrição e garantir maior segurança alimentar da população (BIOFORT, 2021).

Além das culturas tradicionais, várias hortaliças têm sido usadas como estratégia de suplementação nutricional, principalmente com o elemento químico selênio (Se). Estudos em batata-doce, alface, rúcula, entre outros tem utilizado o Se para produzir hortaliças biofortificadas (FERREIRA, 2016; NASCIMENTO, 2018; MARZULLO, 2021). O uso de hortaliças regionais também tem sido bastante utilizado para a biofortificação; como abordado

¹ Tradução: FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura.

no estudo de Puccinelli *et al.* (2017) que utilizaram o manjeriço, hortaliça mais popular na dieta mediterrânea, para promover a suplementação por Se para esta população específica.

Notadamente, o uso dessas hortaliças para a biofortificação funciona como estratégia no alcance de uma população específica que possui hábitos alimentares peculiares. No caso da Amazônia, o jambu assume papel estratégico para a biofortificação, pois além de ser da família *Asteraceae* (mesma da alface, essa amplamente usada em experimentos dessa natureza), é consumido vastamente pela população da região ao longo do ano e, sobretudo na festa religiosa do Círio de Nazaré (HOMMA *et al.*, 2011; SANTOS *et al.*, 2019).

Popularmente denominada de jambu, típica da Amazônia, ocorrem também em outras regiões tropicais como África e Ásia, a espécie *Acmella oleracea* (L.) R. K. Jansen, é uma planta herbácea, pertencente à família *Asteraceae* (GUSMÃO; GUSMÃO, 2013). É hortaliça folhosa, semiereta, com caule cilíndrico, carnoso, folhas compostas, pecioladas, com pecíolos que variam de 20 a 60 cm e ligeiramente alados (FAVORETO; GILBERT, 2010; SAMPAIO *et al.*, 2019). De acordo com Torres *et al.* (2008) e Borges, Goto e Lima (2013), o jambu é uma hortaliça muito utilizada na culinária da região norte do Brasil, principalmente no Pará, compondo vários pratos típicos como o pato no tucupi e tacacá, sobretudo em épocas de festas tradicionais como o Círio de Nazaré e festas de fim de ano.

Sua principal aplicação é no uso medicinal, pois produz vários compostos bioativos, dentre eles, um alcaloide denominado de espilantol (SAMPALIO *et al.*, 2019; COSTA *et al.* 2020). Rondonelli *et al.* (2019) demonstraram as atividades anti-inflamatórias, antioxidantes e analgésicas da *Acmella oleracea*, sugerindo o uso de princípios ativos da planta no controle crônico da dor provocado por doenças degenerativas.

Conforme Nascimento *et al.* (2020) ocorrem também vários compostos com propriedades antioxidantes como os flavanóides (rutina, miquelianina, quercetina), aminoácidos como o triptofano, que ajuda na regulação e desenvolvimento da planta e na defesa de patógenos, amidas polifenólicas como a clovamida. Ainda segundo Nascimento *et al.* (2020) seu estudo mostrou 31 compostos descritos pela primeira vez no jambu e cinco novos compostos descritos pela primeira vez na literatura, desencadeando novos usos da planta como produto alimentício, farmacêutico e na indústria química.

Cheng *et al.* (2015) ao implementarem novo método de detecção de marcadores bioativos em *Acmella oleracea* identificaram a presença de uma nova alquilamida no jambu. Este composto, de acordo com esses autores já havia sido identificado em outras plantas pertencentes à família *Asteraceae* e é importante na indústria farmacêutica e cosmética (CHENG *et al.*, 2015).

Utilizado para consumo em dieta alimentar, o jambu apresenta características químicas e nutricionais interessantes como a presença de aminoácidos (asparagina, valina, ácido glutâmico e isoleucina), fitosteróis, carboidratos, fibras, proteínas, mostrando-se como boa alternativa para aumentar o consumo de vegetais e melhorar a segurança alimentar (NEVES, *et al.*, 2019). Contudo, dado o consumo do jambu na região amazônica, seu potencial de biofortificação e a deficiência nutricional do elemento em todo território brasileiro, a biofortificação com Se dessa hortaliça regional faz vislumbrar uma importante estratégia de suplementação nutricional da população amazônica.

Não obstante, a estratégia de biofortificação com Se cumpre um papel não só na saúde humana, visto que o elemento é um componente essencial de aminoácidos e proteínas com funções específicas de imunidade, metabolismo do hormônio da tireoide, defesas antioxidantes etc. (PUCCINELLI; MALORGIO; PEZZAROSSA, 2017; NEWMAN *et al.* 2019), mas também, em baixas concentrações é um regulador da atividade biológica das plantas, promovendo seu crescimento e desenvolvimento (VALENÇA, *et al.* 2017; LEI *et al.*, 2018).

De acordo com White (2018) e Sarwar *et al.* (2020) o comportamento das plantas expostas ao Se difere em relação a capacidade de tolerar e acumular o elemento em seus tecidos, classificando as plantas em não acumuladoras (toleram até 10 mg.kg^{-1} de Se), acumuladoras (toleram de 100 a 1000 mg.kg^{-1} de Se) e as hiperacumuladoras (toleram acima de 1000 mg.kg^{-1} de Se).

Entretanto, faz-se necessário ponderar as doses desse elemento em ensaios de biofortificação, pois doses elevadas deste podem causar toxidez em plantas não tolerantes e seres humanos (PRAUCHNER, 2014). Segundo o conselho de Alimentos e Nutrição dos Estados Unidos da América (EUA), a recomendação de ingestão é de $55 \mu\text{g}$ de Se.dia^{-1} para adultos e o máximo tolerável é de $400 \mu\text{g}$ de Se.dia^{-1} , valores acima do limite causam toxidez e podem levar a sérios problemas de saúde (INSTITUTE OF MEDICINE, 2000).

Portanto percebe-se a importância do estabelecimento de limiares tóxicos de elementos minerais essenciais/benéficos, pois certas espécies de plantas e hortaliças como girassol e alface possuem a capacidade de captar, translocar e armazenar elementos tóxicos como os metais pesados que estejam nos solos e podem ser incorporados a esses e outros alimentos da dieta alimentar humana (ANDRADE; TAVARES; MAHLER, 2014; SYTAR *et al.*, 2016).

Esta questão é importante, pois de um lado existe um grupo de metais pesados que em concentrações específicas sejam essenciais para a dieta humana e, de outro lado, um grupo

plenamente tóxico em qualquer concentração na planta e no organismo humano. De forma global, a exposição a estes elementos metálicos tóxicos tem se alastrado trazendo riscos à saúde humana, principalmente em países industrializados, com grande densidade populacional (ALLOWAY, 2013; PRAUCHNER, 2014). Dentre as principais fontes de metais pesados nos alimentos, destaca-se as áreas com elevadas concentrações geológicas, principalmente próximas a depósitos de minerais sulfetados, deposições de material particulado, utilização intensiva de fertilizantes fosfatados etc. (HANAHAM, 2013; RAI *et al.* 2019).

Um dos principais metais não essenciais presentes em solos impactados e altamente tóxicos para os seres humanos e plantas é o cádmio (Cd) (KABATA-PENDIAS, 2010; ALLOWAY, 2013). O elemento é liberado para o meio ambiente pelas indústrias de zinco, chumbo e cobre, uso de águas residuárias na agricultura, fertilizantes fosfatados e pesticidas a base de metais (SHANMUGARAJ; MALLA; RAMALINGAM, 2019).

A exposição de plantas ao Cd traz diversos efeitos adversos, com redução da capacidade de translocação de nutrientes, retardo no crescimento, clorose, necrose, danos ao aparato fotossintético, aumento da peroxidação lipídica e alterações no metabolismo (HE *et al.*, 2017; SHANMUGARAJ; MALLA; RAMALINGAM, 2019; QIN *et al.*, 2020). No entanto, algumas em algumas plantas, o Cd em pequenas doses apresenta efeito indutor de crescimento. Esse fenômeno é chamado de efeito hormético ou hormesis que se caracteriza pelo efeito binário que alguns organismos apresentam ao serem expostos a um agente de estresse, por exemplo, um metal pesado. Esse fenômeno fica evidente quando o agente, em pequenas doses, produz uma resposta estimulatória do organismo e em doses maiores, uma resposta inibitória (RAY; FARRIS; HARTMANN, 2014; PINCELLI-SOUZA *et al.*, 2020).

Neste contexto, Hungria *et al.* (2019) ao avaliarem o potencial fitorremediador de plantas de jambu em solos contaminados com Cd, concluíram que a espécie *Acmella oleracea* teve redução de biomassa da parte aérea em locais de maior aplicação de Cd (9 mg.kg⁻¹), baixo indicativo de sensibilidade ao metal, sem a presença de indícios de toxidez na estrutura da planta. Porém, mesmo em espécies ditas tolerantes a metais pode-se observar baixo crescimento e deficiência no desenvolvimento de suas células quando expostas a metais como o Cd (PEREIRA *et al.*, 2011; JIBRIL *et al.*, 2017; NOGUEIROL *et al.*, 2018; ZARE *et al.*, 2018).

Neste cenário emerge a necessidade de experimentos que analisem formas e doses de aplicação de elementos como o Se em vários tipos de culturas no país. Em função de se compreender a importância desse elemento para a nutrição humana conjuntamente com o papel cultural do consumo da hortaliça jambu na região Amazônica, há de se ressaltar que a

análise do potencial de biofortificação do jambu, níveis de toxidez e sua capacidade de fitoextração são preponderantes a partir do momento que surge a seguinte problemática: o jambu possui capacidade de captar, tolerar e acumular de Cd? Essa hortaliça é passível de biofortificação? E, sendo assim, quais as doses limite que garantam boa produção de biomassa e níveis ideais na nutrição humana sem promover a toxidez da planta?

A hipótese central desta pesquisa é que o jambu, além de possuir capacidade tolerar e acumular Cd, pode ser biofortificado a doses crescentes de selênio desde que respeitados os limites de toxidez da planta.

O conjunto de direcionamentos propostos veio para alcançar o objetivo geral de analisar o comportamento da *Acmella oleracea* (L.) R. K. Jansen (jambu), quanto à capacidade de tolerar e acumular Cd e estratégias de biofortificação com selênio. Tendo como objetivos específicos: (i) analisar o comportamento fisiológico e nutricional do jambu submetido a doses crescentes de selênio, bem como o potencial de translocação e acúmulo do elemento; (ii) avaliar o potencial do jambu para biofortificação a doses crescentes de selênio. (iii) analisar a capacidade de captação, tolerância e acúmulo de Cd em plantas de jambu.

Na presente tese, os resultados da pesquisa e suas respectivas conclusões, foram desenvolvidos em três capítulos (exceto por esta contextualização introdutória). Cada um desses capítulos contempla um objetivo específico, sendo eles:

Capítulo I: Toxidez de Selênio em plantas de Jambu (*Acmella oleracea*) cultivado em hidroponia a partir de indicadores multivariados das dimensões fisiológica, crescimento, massa. Este capítulo objetivou analisar o comportamento morfofisiológico e a tolerância do jambu submetido a doses crescentes de selênio, bem como o potencial de translocação e acúmulo do elemento;

Capítulo II: Biofortificação de selênio no cultivo do Jambu (*Acmella oleracea*) hidropônico. Este capítulo objetivou avaliar o potencial do jambu para biofortificação a doses crescentes de selênio; e, por fim;

Capítulo III: Efeito hormético de Cd em *Acmella oleracea* (L.) R. K. Jansen, cultivada em solução nutritiva, que buscou analisar a capacidade de captação, tolerância e efeito estimulante/inibitório do Cd em *Acmella oleracea* (L.) R. K. Jansen cultivada em solução nutritiva.

1.1 Revisão de Literatura

1.1.1 Biofortificação agrônômica de alimentos

O problema da desnutrição é uma realidade que se apresenta a uma boa parte da população mundial. O acesso a uma alimentação saudável deve ser um direito fundamental o todo ser humano e constar como política pública de todos os governos (KHUSCH; LEE; CHO, 2012; MARQUES JUNIOR *et al.*, 2017). Segundo a FAO (2020), embora a África seja a região onde os níveis de insegurança alimentar estejam mais elevados, observa-se que na América Latina e no Caribe, essa insegurança vem aumentando desde 2014, podendo colocar quase um terço dos habitantes da região em condições de incapacidade de obter alimentos ou reduzir sua quantidade e qualidade nutricional.

Distúrbios fisiológicos, retardo metal, crescimento inadequado, menor rendimento físico e mental são algumas das consequências da deficiência nutricional no metabolismo humano (GONÇALVES *et al.*, 2015). O problema de a insegurança alimentar e desnutrição tende a ser majorado com o aumento da população mundial, que poderá alcançar oito bilhões de pessoas até 2030, sendo a maior parte deste aumento deverá ocorrer nos países em desenvolvimento (KHUSCH; LEE; CHO, 2012).

Na África Subsariana, a deficiência nutricional, ou fome oculta, é o reflexo da baixa concentração de ferro (Fe), zinco (Zn), iodo (I) e selênio (Se) nos alimentos. Países como Senegal, Mali, Gana, Togo e República Democrática do Congo, possuem boa parte de sua população feminina com sintomas de anemia por deficiência de ferro (VALENÇA *et al.*, 2017).

Uma forma de se combater a desnutrição mundial é suplementação de micronutrientes em culturas convencionais e o melhoramento genético de plantas, denominado de biofortificação. Esta técnica tem sido utilizada para reduzir a desnutrição em países subdesenvolvidos e em desenvolvimento (MARQUES JUNIOR *et al.*, 2017; VALENÇA *et al.*, 2017; LOUREIRO *et al.*, 2018).

Países como a Suíça, por exemplo, que possuem baixas concentrações de Se em seus solos adotam a estratégia de biofortificação agrônômica de alimentos desde 1984, com incorporação de selenato de sódio nas misturas de nitrogênio (N), o fósforo (P) e o potássio (K) - misturas NPK - para ser aplicado nas culturas (EICHOLZER, 2003).

No Brasil, iniciativas como a rede BioFORT, coordenada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, vem conduzindo ações para diminuir a desnutrição e garantir maior

segurança alimentar, produzindo cultivares melhoradas geneticamente para suprir a necessidade nutricional (BIOFORT, 2021).

Diversas estratégias têm sido utilizadas para promover a biofortificação de alimentos, dentre elas a biofortificação agrônômica, que consiste na correta e eficiente aplicação de nutrientes minerais, em culturas tradicionais como milho, arroz, feijão-caupi, mandioca, trigo, abóbora etc., aumentando assim a produção destas cultivares e disponibilizando para a população alimentos com elevado teor nutricional (REIS *et al.*, 2014; MARQUES JUNIOR *et al.*, 2017; LOUREIRO *et al.*, 2018).

Além das cultivares tradicionais utilizadas em programas de biofortificação, alguns estudos têm sido desenvolvidos no campo das hortaliças como estratégia de suplementação nutricional, principalmente com Se. Puccinelli *et al.* (2017) demonstraram como o manjeriço, hortaliça mais popular na dieta mediterrânea, pode ser biofortificado com Se. Ferreira (2016) mostra as estratégias de biofortificação com selenato e selenito de sódio em alface. Nascimento (2018), demonstra que a melhor dose de Se em solução nutritiva para biofortificar a rúcula foi de 22 $\mu\text{mol.L}^{-1}$, em estudo com batata-doce, Marzullo (2021), indica que 0,5 dm^3 de selenato de sódio foi capaz de biofortificar um kg de batata-doce, quase cinco vezes mais que o recomendado e que a 172 g de batata-doce biofortificada são suficientes para suprir a necessidade diária de Se.

1.1.2 O elemento selênio e seu potencial na biofortificação

Selênio (Se) é um metaloide capaz de apresentar fortes reações biológicas antagônicas a diversos metais potencialmente tóxicos, como cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e prata (Ag), podendo proteger espécies vegetais e animais do efeito tóxicos destes elementos (ALLOWAY, 2013). Pertencente ao mesmo grupo do enxofre (S), o Se possui algumas semelhanças em suas propriedades químicas gerais. É altamente calcófilo, substituindo o enxofre em vários minerais de sulfeto, como a calcopirita, esfarelita, pirita, galena, entre outros (KABATA-PENDIAS; SZTEKE, 2015).

A média de concentração de Se na crosta terrestre é de 0,05 mg.kg^{-1} , com ocorrências de até 0,5 mg.kg^{-1} em alguns locais compostos por rochas máficas. Nas rochas sedimentares está associado a fração argilosa, podendo apresentar altas concentrações em sedimentos argilosos. Em depósitos de rochas sedimentares cretáceas oriundas de erupções vulcânicas pode chegar à concentração de 100 mg.kg^{-1} (KABATA-PENDIAS, 2010; KABATA-PENDIAS; SZTEKE, 2015).

Na maioria dos solos a concentração de Se varia entre 0,05 a 1,5 mg.kg⁻¹. Solos enriquecidos com o elemento são oriundos de rochas máficas com concentração elevada ou regiões impactadas por deposição atmosférica de Se. Em algumas regiões de países como a Finlândia, Irlanda, Lituânia, Polônia, Rússia, Suécia, China, Estados Unidos e Japão possuem solos com concentração bem acima da média mundial, variando de 2 a 1250 mg.kg⁻¹ de Se. Todavia, a maioria dos solos mundiais possui baixa concentração do elemento (KABAPA-PENDIAS, 2010; PRAUCHNER, 2014; KABATA-PENDIAS; SZTEKE, 2015).

O Se é o componente essencial de selenoaminoácidos e selenoproteínas, possuindo múltiplas nas atividades biológicas de animais e humanos. No corpo humano, as selenoproteínas são envolvidas no metabolismo do hormônio da tireóide, funções de imunidade e defesas oxidantes, agindo como um cofator da enzima glutathione peroxidase e catalizador na redução de peróxidos de hidrogênio que causam danos a células e tecidos (PUCCINELLI; MALORGIO; PEZZAROSSA, 2017; NEWMAN *et al.*, 2019). A deficiência de Se contribui para a doença de Keshan, doenças cardiovasculares, câncer, diabetes tipo 2 e ainda produz uma série de sintomas como hipotireoidismo, subfertilidade, deficiência imunológica e aumento na susceptibilidade de infecções (RAYMAN, 2008; 2012).

Em baixas concentrações é um regulador da atividade biológica de plantas e animais, promovendo o crescimento e desenvolvimento. Em moderadas concentrações possui funções homeostáticas. O limite entre os níveis nutricionais que o Se promove e os níveis de toxidez são muito próximos (VALENÇA *et al.*, 2017; LEI *et al.*, 2018). De acordo com a Instrução Normativa nº 28, de 26 de julho de 2018, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), a dose diária recomendada para adultos varia de no mínimo 8,25 a no máximo 319,75 µg.dia⁻¹ de Se (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2018).

A estratégia de biofortificação com Se tem se mostrado eficaz em países como a Finlândia que desde 1985 utiliza a ingestão de Se na população. Em 1991, a média de Se neste país era de 120 µg de Se.dia⁻¹, na forma de selenato de sódio (ALFTHAN *et al.*, 2015). Enquanto na Finlândia a estratégia de suplementação foi o uso de selenato no solo, outros países têm se utilizado de outras técnicas de suplementação como pulverização foliar e soluções nutritivas hidropônicas. Neste caso a hidroponia, em detrimento a outras formas de inserção do Se, evita a adição direto no solo, reduzindo a preocupação com a contaminação ambiental, além reduzir a perda de Se para substâncias coloidais. A hidroponia permite uma aplicação controlada, fornecendo concentração específica para a planta (NEWMAN *et al.*, 2019).

O Se cumpre um papel importante não só na nutrição humana, mas também na produção agrícola, atuando como elemento benéfico, podendo aumentar a produtividade de lavouras (PRAUCHNER, 2014). A assimilação do Se afeta tanto o conteúdo de enxofre (S), quanto nitrogênio (N), sendo usado como estratégia para aumentar a produção secundária de metabólitos de S e N nas plantas (MALAGOLI *et al.*, 2015). O elemento em baixas concentrações em culturas agrícolas, desempenha papel de protetor contra diferentes estresses abióticos, incluindo metais pesados, resfriamento, seca e deficiência nutricional. O mecanismo presente na tolerância ao estresse abiótico pode envolver o processo de antagonismo (com relação aos efeitos dos metais pesados), desintoxicação de compostos orgânicos nocivos, com melhor desempenho do sistema antioxidante, proteção de membranas e produção de biomassa através da atividade fotossintética (HAWRYLAK-NOWAK *et al.*, 2018; QIN *et al.*, 2018; SARWAR *et al.*, 2020).

É importante destacar que o comportamento das plantas difere quanto a exposição ao selênio. A capacidade de tolerar e concentrar o elemento em seus tecidos classifica as plantas em não acumuladoras ou sensíveis que não podem tolerar concentrações maiores que 10 mg.kg⁻¹ de peso seco, acumuladoras ou indicadoras que podem tolerar de 100 a 1000 mg.kg⁻¹ de peso seco como a *Azolla pinnata*, e as hiperacumuladoras que toleram acima de 1000 mg.kg⁻¹ de peso seco, como a *Astragalus albulus* (WHITE, 2018; SARWAR *et al.*, 2020)

Via de regra, a absorção do Se pela planta depende da forma como este está disponível. Na forma de selenato e selênio orgânico a absorção depende dos mecanismos e rotas de captação do enxofre (S), porém na forma de selenito a absorção está relacionada à captação do fósforo, tornando esta forma de disponibilidade de Se mais tóxica para a planta (PRAUCHNER, 2014). Ao absorver o Se na forma de selenato, este vai ser transportado via transportadores de sulfato devido suas semelhanças químicas. Ao ser absorvido o Se irá formar aminoácidos análogos aos formados pelo enxofre, como selenocisteína, selenometionina em detrimento a cisteína e metionina. Essa substituição em plantas não acumuladoras de Se, provoca alterações na funcionalidade das proteínas, ocasionado disfunções, fisiológicas, metabólicas e estruturais nas células (MALAGOLI *et al.*, 2015; SARWAR *et al.*, 2020).

1.1.3 Metais pesados

Os metais pesados, sendo essenciais ou não, podem ser considerados tóxicos para os seres humanos a depender da concentração a que são expostos, notadamente, quanto estes elementos estão presentes na dieta alimentar. A exposição a estes elementos se alastrou pelo globo, causando perturbações ambientais e riscos a saúde humana, especialmente em países industrializados, com grande densidade populacional (MARSCHNER, 2012). As fontes antropogênicas de metais pesados têm aumentado exponencialmente desde a revolução industrial, devido ao aumento populacional, com criação de novas áreas urbanas e a necessidade de produção de bens e alimentos (SHANMUGARAJ; MALLA; RAMALINGAM, 2019; RAI *et al.*, 2019).

Dentre as principais fontes potenciais que levam a presença de metais pesados nos alimentos, pode-se destacar áreas com concentrações geológicas/geogênicas elevadas, sobretudo em áreas de depósitos de minerais sulfetados, intemperismo de folhelhos negros, calcários, rochas fosfatadas bem como rochas ultramáficas (ALLOWAY, 2013). As fontes antropogênicas relacionam-se as deposições atmosféricas através de material particulado emitido por indústrias e veículos, uso de esterco de gado na atividade agrícola, utilização intensiva de fertilização, sobretudo os fosfatados, aplicação de lodo de esgoto na agricultura, uso de pesticidas a base de metais pesados, tratamento inadequado de resíduos de efluentes, entre outros (HANAHAM, 2013; RAI *et al.*, 2019).

1.1.4 O metal cádmio e sua toxidez

O Cádmio (Cd) é um dos metais não essenciais que despertam mais atenção para as ciências do solo e nutrição de plantas, devido ser potencialmente tóxico para os seres humanos e relativamente móveis ao sistema solo/planta (SINH; MACLAUGHLIN, 1999). Com concentração média na crosta variando de 0,1-0,2 mg.kg⁻¹, é encontrado em minerais como a greenoquita (CdS) e Otavita (CdCO₃), ocorrendo também associado a sulfetos de Zinco (Zn) e Chumbo (Pb). As altas concentrações geogênicas do metal estão geralmente relacionadas a rochas sedimentares e ígneas. Por produzir diversos efeitos adversos em humanos, animais e plantas, é considerado um dos metais mais tóxicos existentes (KABATA-PENDIAS, 2010; ALLOWAY, 2013).

De acordo com Smolders e Mertens (2013) e Alloway (2013) as concentrações atuais de Cd nos solos é maior que os valores geogênicos, devido a deposição atmosférica e uso de

fertilizantes fosfatados. A média nos solos é de 0,1-1 mg.kg⁻¹ de Cd, valor que em princípio parece não afetar os processos geoquímicos do solo, porém pode interagir com os ecossistemas mesmo em níveis traço, pois este metal possui elevada toxicidade.

Sua aplicação está relacionada principalmente confecção de baterias de Ni-Cd e Ag-Cd, porém sua maior fonte é refino do Zn, sendo que o Cd é encontrado como subproduto. Todavia, o Cd também é utilizado na fabricação de pigmentos e plásticos, placas de circuitos eletrônicos, produção de fertilizantes e defensivos, além da presença do metal em combustíveis fosseis (KUBIER; WILKIN; PICHLER, 2019).

Na maioria dos solos, o Cd está ligado a substâncias coloidais na forma de Cd²⁺, podendo participar de íons complexos e quelatos orgânicos. Desta maneira, sua biodisponibilidade está relacionada com reações de oxidação e redução. Em condições de pH baixo (4-4,7), o metal compete com outros íons metálicos pelos sítios de adsorção dos colóides, tornando-o mais disponível na solução do solo. Em pH mais alcalino, o Cd torna-se menos disponível principalmente pela precipitação na forma de sulfetos (LINHARES *et al.* 2009; KABATA-PENDIAS, 2010). Assim sendo, em solos ácidos, como os solos amazônicos, existe a maior probabilidade do Cd tornar-se disponível na solução do solo e ser assimilado pelo sistema radicular das plantas. Obviamente, a disponibilidade do metal não está relacionada somente às condições biogeoquímicas locais, mas também ao *input* antropogênico do mesmo no sistema solo/planta (LINHARES *et al.*, 2009).

Em áreas de maior atividade humana com presença de indústrias e emissão de material particulado, com intensa atividade agrícola com uso de fertilizantes fosfatados, uso de lodo de esgoto em solos, água residuárias usadas em irrigação, entre outras fontes, pode acarretar a maior disponibilidade do Cd nos solos e em plantas cultivadas, que, se tiverem capacidade de acumulação, podem fornecer este metal na dieta da população destas áreas (KABATA-PENDIAS, 2010; SHANMUGARAJ; MALLA; RAMALINGAM, 2019).

Nas plantas, sobretudo nas chamadas agrônômicas, a presença do Cd provoca toxidez, com retardo no crescimento, clorose, necrose, redução da taxa fotossintética e condutância estomática, transporte de nutrientes, redução na absorção de água, inibição de enzimas, aumento da peroxidação lipídica e alteração no metabolismo (HE *et al.*, 2017; SHANMUGARAJ; MALLA; RAMALINGAM, 2019; QIN *et al.*, 2020).

Nas raízes de plantas expostas ao metal, ocorre o escurecimento, amolecimento, redução de comprimento, aumento do diâmetro e redução da matéria seca. O estresse no sistema radicular da maioria das plantas cultivadas deve-se ao aumento do tamanho das células parenquimatosas e expansão do tecido cortical (HUSSAIN *et al.*, 2019).

De acordo com Solis-Dominguez *et al.* (2007) o teor de Cd normal nas folhas da maioria das plantas varia de 0,05-0,2 mg.kg⁻¹, sendo que valores acima destes podem provocar clorose, ressecamento e necrose das folhas. Além disso, a presença do metal causa redução no uso da água, taxa fotossintética líquida, redução da atividade enzimática, fenômeno provocado pela substituição de nutrientes como o Zn por Cd em metaloenzimas. Estudos como o de Kurdizel, Prasad e Strzalka (2004) mostram que em algumas plantas, o Cd substituiu o Mg na Rubisco, modificando assim sua estrutura.

Ainda conforme Kurdizel, Prasad e Strzalka (2004), a presença do metal reduz a fotossíntese, pois inibe a cadeia de transporte de elétrons do cloroplasto. Com a redução da taxa fotossintética, a abertura estomática também é reduzida. Esta redução pode estar ligada as alterações nas relações hídricas ou pela competição do Cd com as substâncias minerais. Perfus-Barbeoch *et al.* (2002) relatam em seu estudo com *Arabidopsis thaliana* L. que o metal pode induzir a liberação de Ca do retículo endoplasmático e vacúolos, aumentando o nível de citosol, conduzindo a uma menor abertura estomática. Como resultado, ocorreu inibição do crescimento e translação de nutrientes como o Mn e Cu.

Como mencionado anteriormente, a presença do Cd afeta a absorção de nutrientes. Paiva, Carvalho e Siqueira (2002) relatam a redução na capacidade de translocação de Fe em mudas de ipe-roxo e de S, Cu e Fe em mudas de cedro. Khan *et al.* (2016) descrevem os efeitos da exposição de tomate, alface e batata a metais pesados. Estes autores reportam redução na concentração de N, P em alface e tomate, redução do Fe em alface e aumento de Ca e Fe na batata, sobretudo porque o Fe e Ca possuem o mesmo sítio de transporte que o Cd. A concentração de Mg no tomate e alface cresceu de forma linear, já na batata de forma quadrática, com redução nas doses maiores. O K sofreu redução em todas as plantas expostas ao Cd.

A exposição de plantas ao Cd traz diversos efeitos adversos, sobretudo no aparato fotossintético e absorção de nutrientes. Todavia, alguns estudos têm demonstrado que o Cd em pequenas doses possui efeito indutor no crescimento de algumas plantas. No momento em que um organismo é submetido a doses crescentes de um agente de estresse, por exemplo, um metal pesado este irá produzir no organismo, uma resposta estimulatória em pequenas doses e uma resposta inibitória à medida que a dose do agente de estresse aumenta. Este conceito é denominado de Hormesis e ocorre quando há um comportamento bifásico na curva dose-resposta (CALABRESE; BLAIN, 2009; RAY; FARRIS; HARTMANN, 2014; PINCELLI-SOUZA *et al.*, 2020).

Diversos estudos têm demonstrado esse fenômeno em plantas - relacionando à baixa ação de metais pesados, radionuclídeos, compostos orgânicos, entre outros - a efeitos benéficos e efeitos adversos em doses elevadas destas substâncias (CALABRESE; BLAIN, 2009).

Dentre estes estudos, pode-se citar o efeito estimulante do Cd, demonstrado por Jia *et al.* (2015), no aumento da biomassa vegetal em *Lonicera japonica*, com dose de até 10 mg.kg⁻¹ de Cd. Este crescimento foi atribuído a melhor assimilação de carbono fotossintético, aumento da clorofila a e b e no conteúdo de carotenóides, relacionado tais resultados a efeitos benéficos no aparato fotossintético da planta, provocado Cd em baixa concentração, fenômeno conhecido como Hormesis. Ying *et al.* (2010) ao estudarem o efeito do Cd em *Picris divaricata*, mostram que a taxa de assimilação fotossintética mostrou crescimento entre as doses 5 e 10 µM de Cd, o carbono interno, condutância estomática e transpiração se mantiveram semelhantes ao controle, até a dose de 5 µM e houve crescimento no conteúdo da rubisco de até 196 % e 115% respectivamente nas doses de 5 e 10 µM de Cd.

REFERÊNCIAS

ALFTHAN, G.; EUROLA, M.; EKHOLM, P.; *et al.* Effects of nationwide addition of selenium to fertilizers on foods, and animal and human health in Finland: From deficiency to optimal selenium status of the population. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v.31, p.142-147, 2015.

ALLOWAY, B. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. **Environmental Pollution**, 3 ed., n.22, 2013. 614p.

ANDRADE, J. C. M.; TAVARES, S. R. L; MAHLER, C. F. **Fitorremediação: o uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental**. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2014. 107p.

BioFORT. **Resultados**. [S.l.]: EMBRAPA: Rede BioFort, 2021. Disponível em: biofort.com.br/resultados. Acesso em: 05 jul. 2021.

BORGES, L. S; GOTO, R; LIMA, G. P. P. Exportação de nutrientes em plantas de jambu, sob diferentes adubações. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 1, p. 107-116, jan./fev. 2013.

CALABRESE, E. J.; BLAIN, R. B. Hormesis and plant biology. **Environmental Pollution**, n.159, p.42-48, 2009.

CHENG, Y.; LIU, R. H.; HO, M. *et al.* Alkylamides of *Acmella oleracea*. **Molecules**, v.20, p.6970-6977, 2015.

COSTA, V.C.N.; SILVA JUNIOR, M.L.; SAMPAIO, I.M.G.; BITTENCOURTH, R. F. P.M.; FIGUEIREDO, S.P.; SANTOS, G.A.M.; SOUZA, L.R.; OLIVEIRA, E.S. Nitrogen fertilization and liming improves growth, production, gas exchange and post-harvest quality of yellow flower jambu. **Journal of Agricultural Studies**, n.3, v.8, p556-774, 2020.

EICHHOLZER, M. Micronutrient deficiencies in Switzerland: causes and consequences. **Journal of Food Engineering**, v.56, n.2-3, p.171-179, 2003.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **The State of Food Security and Nutrition in the World 2020: Transforming food systems for affordable healthy diets**. Rome: FAO/ IFAD/UNICEF/WFP/WHO, 2020. 320p.

FAVORETO, R.; GILBERT, B. *Acmella oleracea* (L.) R. K. Jansen (*Asteraceae*) – Jambu. **Revista Fitos**, v. 5, n. 1, mar. 2010.

FERREIRA. R. L. C. **Biofortificação e toxicidade de selênio na cultura da alface em solução nutritiva**. 2016. 37f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências Agrárias e veterinárias. Jaboticabal, SP, 2016.

GONÇALVES, A.S.F.; GONÇALVES, W.M.; SILVA, K.M.J.; OLIVEIRA, R.M. Uso da biofortificação vegetal: uma revisão. **Cerrado Agrociências**, v.6, p.75-87, 2015.

GUSMÃO, M. T. A.; GUSMÃO, S. A. L. **Jambu da Amazônia**. Características gerais, cultivo convencional, orgânico e hidropônico. Editora Edufra. Belém-PA. 2013. 135p.

HANAHAM, S. E. **Enviromnetal Chemistry**. 9. ed. [s.l.]: CRC Press, 2013. 773p.

HAWRYLAK-NOWAK, B.; DRESLER, S.; RUBINOWSKA, K.; MATRASZEK-GAWRON, R.; WOCH, W. HASANUZZAMAN, M. Selenium biofortification enhances the growth and alters the physiological response of lamb's lettuce grown under high temperature stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.127, p.446-456, 2018.

HE, S.; YANG, X.; HE, Z.; BALIGAR, C. Morphological and physiological responses of plants to cadmium toxicity: a review. **Pedosphere**, v.27, n.3, p.421-438, 2017.

HOMMA, A. K. O; SANCHE, R. S; DE MENEZES, A. J. E. A; DE GUSMÃO, S. A. L. Etnocultivo do jambu para abastecimento da cidade de Belém, estado do Pará. **Amazônia: Ci. & Desenv.**, Belém, v. 6, n. 12, jan./jun., 2011.

HUNGRIA, L. C; OLIVEIRA, E.S; SAMPAIO, I.M; SOUZA, E.S.; FERNANDES, A. R. Tolerância de plantas de jambu (*Acmella oleracea*) cultivadas em solo contaminado por cádmio. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 5, n. 11, p. 26211-26219. 2019.

HUSSAIN, A.; ALI, S.; RIZWAN, M. *et al.* Morphological and physiological responses of plants to cadmium toxicity. *In: HASANUZZAMAN, M. et al. (Ed.). Cadmium toxicity and tolerance in plants.* Academic Press. Elsevier. 2019. p. 47-72.

JIA, L.; LIU, Z.; CHEN, W.; YE, Y. YU, S.; HE, X. Hormesis effects induced by cadmium on growth and photosynthetic performance in a hyperaccumulator, *Lonicera japonica* Thunb. **Journal of plant Growth Regulation**, n.34. p.13-21, 2015.

JIBRIL, S. A.; HASSAN, S. A.; ISHAK, C. F.; MEGAT WAHAB, P. E. Cadmium toxicity affects phytochemicals and nutrient elements composition of lettuce (*Lactuca sativa L.*). **Advances in Agricultura**, p. 1-7, 2017.

INSTITUTE OF MEDICINE. **Dietary Reference Intakes for Vitamin C, Vitamin E, Selenium, and Carotenoids.** National Academies Press, Washington DC, 2000. 529.p

KABATA-PENDIAS, A. Cadmium. *In: KABATA-PENDIAS, A (ed). Trace elements in soils and plants.* CRC Press, Boca Raton, p. 287–304. 2010.

KABATA-PENDIAS, A.; SZTEKE, B. **Trace elements in abiotic and biotic environments.** Boca Raton: CRC Press, 2015. 468p.

KHAN, A.; KHAN, S.; ALAM, M.; KHAN, M. A.; AAMIR, M.; QAMAR, Z.; REHMAN, Z. U.; PERVEEN, S. Toxic metal interactions affect the bioaccumulation and dietary intake of macro- and micro-nutrients. **Chemosphere**, v. 146, p121-128, 2016.

KHUSH, G.S.; LEE, S.; CHO, JI. Biofortification of crops for reducing malnutrition. **Plant Biotechnology Reports**, v. 6, p.195-202, 2012.

KUBIER, A.; WILKIN, R. T.; PICHLER, T. Cadmium in soils and groundwater: a review. **Applied Geochemistry**, v.108, p.1-16, 2019.

KURDZIEL, B.M.; PRASAD, M.N.V.; STRZALKA, K. Photosynthesis in heavy metal stressed plants. *In: PRASAD, M.N.V. Heavy metal stress in plants: From biomolecules to ecosystems.* 2 ed. Springer, 2004. p.146-181.

LEI, B; BIAN, Z.; YANG, Q.; WANG, J.; CHENG, R.; LI, K; LIU, W.; ZHANG, Y.; FANG, H.; TONG, Y. The positive function of selenium supplementation on reducing nitrate accumulation in hydroponic lettuce (*Lactuca sativa L.*). **Journal of Integrative Agriculture**, n.17, v.4, p.837-846, 2018.

LINHARES, L. A.; EGREJA FILHO, F. B. E.; OLIVEIRA, C. V.; BELLIS, V. M. Adsorção de cádmio e chumbo em solos tropicais altamente intemperizados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.3. p.291-299, 2009.

LOUREIRO, M. P.; CUNHA, L. R.; NASTARO, B. T.; PEREIRA, K. Y.; NEPOMUCENO, M. L. Biofortificação de alimentos: problema ou solução? **Segurança Alimentar e Nutricional**, Campinas, v.25, n.2, p.66-84, 2018.

MALAGOLI, M.; SCHIAVON, M.; DALL'ACQUA, S.; PILON-SMITS, E. Effects of selenium biofortification on crop nutritional quality. **Frontiers in Plant Science**, v.6, n. 280, p.1-5, 2015.

MARZULLO, Y. O. T. **Biofortificação com selênio na batata-doce**. 2021. 67f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2021.

MARQUES JUNIOR, E.; LORENZONI, R. M.; ROSADO, C. C. G.; SOARES, T. C. Alimentos biofortificados: O futuro da alimentação mundial. *In: Agronomia: colhendo as safras do conhecimento*. Alegre, ES: UFES, CAUFES, 2017. 243p.

MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. Academic Press Elsevier, 2012. 649p.

MINISTÉRIO DA SAÚDE - AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Instrução Normativa Nº 28, que Estabelece as listas de constituintes, de limites de uso, de alegações e de rotulagem complementar dos suplementos alimentares. **Diário Oficial da União**, 27 jul. 2018, edição: 144, seção: 1, p. 141, 2018.

NASCIMENTO, C. S. **Biofortificação agrônômica da rúcula com selênio em sistema hidropônico**. 2018. 43f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP. 2018. 43p.

NASCIMENTO, L.E.S.; ARRIOLA, N.D.A.; SILVA, L.A.L.; FAQUETI, L.G.; SANDJO, L.P.; ARAÚJO, C.E.S.; BIAVATTI, M.W.; BARCELOS-OLIVEIRA, J.L.; AMBONI, R.D.M.C. Phytochemical profile of different anatomical parts of jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen): a comparison between hydroponic and conventional cultivation using PCA and cluster analysis. **Food Chemistry**, n.332, p.1-12, 2020.

NEVES, D. A.; SCHMIELE, M.; PALLONE, J. A. L. *et al.* Chemical and nutritional characterization of raw and hydrothermal processed jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen). **Food Research International**, v. 116, p. 1144-1152, feb. 2019.

NEWMAN, R.; WATERLAND, N.; MOON, T.; TOU, J. C. Selenium biofortification of agricultural Crops and effects on plant nutrients and bioactive compounds important for human health and disease prevention – a review. **Plant Foods for Human Nutrition**, n.74, p.449-460, 2019.

NOGUEIROL, R. C.; MONTEIRO, F. A.; SOUZA JUNIOR, J. C.; AZEVEDO, R. A. NO₃-NH₄⁺ proportions affect cadmium bioaccumulation and tolerance of tomato. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 1, p. 1-13, 2018.

PAIVA, H. N.; CARVALHO, J. G.; SIQUEIRA, J. O. Índice de translocação de nutrientes em mudas de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) e de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.) submetidas a doses crescentes de cádmio, níquel e chumbo. **Revista Árvore**, v.26, n.4, p.467-473, 2002.

PEREIRA, B. F. F.; ROZANE, D. E.; ARAÚJO, S. R.; BARTH, G.; QUEIROZ, R. J. B.; NOGUEIRA, T. A. R.; MORAES, CABRAL, C. P.; BOARETTO, A. E.; MALAVOLTA, E. Cadmium availability and accumulation by lettuce and rice. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** [online], v. 35, p. 645-654, 2011.

PERFUS-BARBEOCH, L.; LEONHARDT, N.; VAVASSEUR, A.; FORESTIER, C. Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status. **The Plant Journal**, n.32, v.4, p.39-548, 2002.

PINCELLI-SOUZA, R.P.; BORTOLHEIRO, F. P.A.P.; CARBONARI, C. A.; VELINI, E. D.; SILVA, M. A. Hormetic effect of glyphosate persists during the entire growth period and increases sugarcane yield. **Pest Management Science**, v.76, p.2388-2394, 2020.

PRAUCHNER, C. A. **A importância do selênio para a agropecuária e saúde humana**. Editora UFMS. Santa Maria. 2014.

PUCINELLI, M.; MALORGIO, F.; I. ROSELLINI, I.; B. PEZZAROSSA, B. Uptake and partitioning of selenium in basil (*Ocimum basilicum* L.) plants grown in hydroponics. **Scientia Horticulturae**, v.225, p.271-276, 2017.

PUCINELLI, M.; MALORGIO, F.; PEZZAROSSA, B. Selenium enrichment of horticultural crops. **Molecules**, n.22, v.6, p.2-18. 2017.

QIN, X.; NIE, Z.; LIU, H., ZHAO, P.; QIN, S.; SHI, Z. Influence of selenium on root morphology and photosynthetic characteristics of winter wheat under cadmium stress. **Environmental and Experimental Botany**, v.150, p.232-239, 2018.

QIN, S.; LIU, H.; NIE, Z.; RENGEL, Z.; GAO, W.; ZHAO, P. Toxicity of cadmium and its competition with mineral nutrients for uptake by plants: a review. **Pedosphere**, v.30, n. 2, p.168-180, 2020.

RAI, P. K.; LEE, S. S.; ZHANG, M.; TSANG, M.; KIM, K. Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms, and management. **Environment International**. v.125, p.365-385, 2019.

RAY, SD.; FARRIS, F.F.; HARTMANN, A. C. Hormesis. In: WEXLER, O. (Ed.). **Encyclopedia of toxicology**. Academic Press. Elsevier, 2014, p.944-948.

RAYMAN, M. P. Food-chain selenium and human health: emphasis on intake. **British Journal of Nutrition**, v.100, p.254–268, 2008.

RAYMAN, M. P. Selenium and human Health. **The Lancet**, v.379, n. 9822, p.1256-1268. 2012.

REIS, A. R.; FURLANI JR, E.; MORAES, M. F.; MELO, S. P. Biofortificação agrônômica com selênio no Brasil como estratégia para aumentar a qualidade dos produtos agrícolas. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 8, n.2, p.128-138, 2014.

RONDONELLI, M., FOSSARI, F.; VECCHIO, V. *et al.* *Acmella oleracea* for pain management. **Fitoterapia**, v.140, n.104419, 2019.

SAMPAIO, I.M.G.; GUIMARÃES, M. A.; LEMOS NETO, H. S.; MAIA, C. L.; VIANA, C. S.; GUSMÃO, S. A. L. Recipientes e densidades de semeadura combinadas com o tempo na produção de mudas de jambu. **Revista de Ciências Agrárias**, v.62, 2019.

SANTOS, C. P; NINA, M. M; DA ROCHA, S. F; LIMA, R. A. A importância da utilização da espécie *Acmella oleracea* L. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v.7, n.4, 2019.

SARWAR, N.; AKHTAR, M.; KAMRAN, M. A.; IMRAN, M.; RIAZ, M. R.; KAMRAN, K.; HUSSAIN, S. Selenium biofortification in food crops: key mechanisms and future perspectives. **Journal of Food Composition and Analysis**, v.93, p1-13. 2020.

SHANMUGARAJ, B. M.; MALLA, A.; RAMALINGAM, S. Cadmium stress and toxicity in plants: an overview. *In: HASANUZZAMAN, M. et al. (Ed). Cadmium toxicity and tolerance in plants.* Academic Press: Elsevier, 2019. Chapter 1, p. 1-17.

SINGH, B.R., MCLAUGHLIN, M.J. Cadmium in Soils and Plants. *In: McLaughlin M.J., Singh B.R. (eds) Cadmium in soils and plants. Developments in plant and soil sciences,* Springer, Dordrecht, v. 85, p.257-267, 1999.

SMOLDERS, E.; MERTENS, J. Cadmium. *In: ALLOWAY, B.; TREVORS, J. T. 3.ed. Heavy metals in soil,* Springer, 2013. p.283-311.

SOLÍS-DOMINGUEZ, F.A.; GONZÁLEZ-CHÁVEZ, M.C.; CARRILLO-GONZÁLEZ, R.; RODRIGUEZ-VAZQUEZ, R., Accumulation and localization of Cadmium in *Echinochloa polystachya* grown within a hydroponic system. **Journal of Hazardous Material**, n. 141, v. 3. p.630 - 636. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.014>.

SYTAR, O.; BRESTIC, M.; TARAN, N.; ZIVCAK, M. Plants Used for Biomonitoring and Phytoremediation of Trace Elements in Soil and Water. **Plant Metal Interaction**, p.361–384. 2016.

TORRES, G. I. P. S; MELO, D. M; LIMA, R. T; DA SILVA, S. P.; SILVA FILHO, J. B.; DE GUSMÃO, S. A. Concentração da solução nutritiva no cultivo de jambu em sistema hidropônico NFT na Amazônia Oriental. **Hortic. bras.**, v. 26, n. 2, jul-ago, 2008.

VALENÇA, A.W.; BAKE, A.; BROUWER, I. D.; GILLER, K. E. Agronomic biofortification of crops to fight hidden hunger in sub-Saharan Africa. **Global Food Security**, v.12, p.8-14, 2017.

ZARE, A. A.; KHOSHGOFTARMANESH, A. H.; MALAKOUTI, M. J.; BAHRAMI, H. A.; CHANEY, R. L. Root uptake and shoot accumulation of cadmium by lettuce at various Cd:Zn ratios in nutrient solution. **Ecotoxicol. Environ. Saf.**, v. 148, p. 441-446, 2018.

WHITE, P. J. Selenium metabolism in plants. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects**, v.1862, n.11, p.2333-2342, 2018.

YING, R.; QIU, R.; TANG, Y.; HU, P. QIU, H.; CHEN, H.; SHI, T. MOREL, J. Cadmium tolerance of carbon assimilation enzymes and chloroplast in Zn/Cd hyperaccumulator *Picris divaricata*. **Journal of Plant Physiology**, n.167, p.81-87, 2010.

2 TOXIDAZ DE SELÊNIO EM PLANTAS DE JAMBU *ACMELLA OLERACEA* (L.) R. K. JANSEN CULTIVADO EM HIDROPONIA

RESUMO

Grande parte da população mundial apresenta deficiência de selênio (Se), em parte pelo baixo teor do elemento na maioria dos solos. É fundamental na nutrição humana - participa de vários processos metabólicos. Na agricultura, o uso de Se em cultivares regionais pode ser uma alternativa para minimizar sua deficiência em algumas áreas do mundo. O objetivo deste estudo foi analisar o comportamento morfofisiológico, o conteúdo de Se captado e a tolerância do jambu submetido a doses crescentes do elemento. Este experimento contou com quatro tratamentos e 15 repetições, totalizando 60 plantas, em hidroponia. Foram utilizadas três doses de Se, na forma de selenato de sódio (5, 10 e 20 mg.L⁻¹), mais controle (zero de Se), com delineamento experimental inteiramente casualizado. Foram medidas variáveis biométricas, fisiológicas e conteúdo de Se na planta. Os resultados foram submetidos à ANOVA e análise de componentes principais originando indicadores de crescimento, massa, fisiológico e geral, bem como modelos de regressão. O jambu exposto a dose de 5 mg.L⁻¹ do elemento por 28 dias, apresentou maior desempenho fisiológico, de crescimento e ganho de massa, bem como concentrou em sua parte aérea 462,15 µg.kg⁻¹ de Se. A planta apesar de mostrar sinais de toxidez, como clorose e arqueamento das folhas, bem como redução no crescimento e ganho de massa, foi capaz de tolerar 10 mg.L⁻¹ do elemento, a concentração de 20 mg.L⁻¹ foi letal para o jambu. Os indicadores de crescimento, de massa e fisiológico, apontam para efeitos benéficos do Se para entre 2,89 a 5,24 mg.L⁻¹. Todavia, com base no indicador geral, a concentração ideal de Se na solução nutritiva é de 2,95 mg.L⁻¹. A toxidez de Se na toxidez no jambu, pode estar relacionada com competição do elemento com nutriente enxofre, pois ambos possuem a mesma rota de absorção, podendo causar a substituição do nutriente em aminoácidos sulfurados e assim toxidez na planta. Conclui-se que o jambu mostrou baixa tolerância ao Se, porém em pequenas doses o elemento provocou efeito benéfico na planta. O uso de análise multivariada na construção de indicadores se mostrou adequada para explicar de forma sistêmica e mais abrangente o comportamento do jambu frente ao Se. A dose mais adequada de Se do ponto de vista agrônomo foi de 2,95 mg.L⁻¹, devendo inclusive servir de baliza para futuros estudos de biofortificação da planta.

Palavras-Chave: absorção de selênio. Indicadores multivariados. Índice de tolerância.

2 SELENIUM TOXIDITY ON JAMBU *ACMELLA OLERACEA* (L.) R.K. JANSEN CULTIVATED IN HYDROPONIA

ABSTRACT

Much of the world's population is deficient in selenium (Se), in part due to the low content of the element in most soils. Fundamental in human nutrition, it participates in several metabolic processes. In agriculture, the use of Se in regional cultivars can be an alternative to minimize its deficiency in some areas of the world. The aim of this study was to analyze the morphophysiological behavior, the content of captured Se and the tolerance of jambu submitted to increasing doses of the element. This experiment had 4 treatments and 15 repetitions, totaling 60 plants, in hydroponics. Three doses of selenium (Se) were used, in the form of sodium selenate (5, 10 and 20 mg.L⁻¹), plus control (zero Se), with a completely randomized design. Biometric and physiological variables and Se content in the plant were measured. The results were submitted to ANOVA and principal component analysis to generate growth, mass, physiological and general indicators, as well as regression models for each indicator. The jambu exposed to a dose of 5 mg.L⁻¹ of the element for 28 days, showed greater physiological performance, growth and mass gain, as well as concentrated 462.15 µg.kg⁻¹ of Se in its aerial part. The plant, despite showing signs of toxicity, such as chlorosis and arching of the leaves, as well as reduced growth and mass gain, was able to tolerate 10 mg.L⁻¹ of the element, the concentration of 20 mg.L⁻¹ was lethal to the jambu. Growth, mass and physiological indicators point to beneficial effects of Se for between 2.89 and 5.24 mg.L⁻¹. However, based on the general indicator, the ideal concentration of Se in the nutrient solution is 2.95 mg.L⁻¹. Se toxicity in jambu toxicity may be related to competition of the element with the nutrient sulfur, as both have the same absorption route, which can cause the replacement of nutrients in sulfur amino acids and thus toxicity in the plant. It was concluded that jambu showed low tolerance to Se, but in small doses the element had a beneficial effect on the plant. The use of multivariate analysis in the construction of indicators proved to be adequate to systematically and more comprehensively explain the behavior of jambu against Se. The most adequate dose of Se from the agronomic point of view was 2.95 mg.L⁻¹, which should even serve as a guide for future studies on the biofortification of the plant.

Keywords: Selenium absorption. Multivariate indicators. Tolerance index.

2.1 Introdução

O selênio (Se) é classificado como não metal e integra a lista de elementos minerais necessários à dieta humana; sua presença em vegetais incrementa o crescimento e o estado nutricional das plantas o que o torna um elemento benéfico (KORNDORFER, 2006; REIS *et al.*, 2014). Grande parte da população mundial apresenta deficiência de Se e diversos estudos para o Brasil atribuem esse fato ao baixo teor de selênio nos solos brasileiros, apesar de desempenhar um importante papel na nutrição humana (HARTIKANIEN, 2005; MORAES, *et al.*, 2009; PRAUCHNER, 2014; REIS *et al.* 2014). Como elemento fundamental ao metabolismo humano o Se participa da estrutura de proteínas, possui propriedades antioxidantes e está distribuído em diversos órgãos do corpo humano, como pâncreas, fígado, córtex renal e hipófise (VIARO; VIARO; FLECK, 2001).

A maioria das plantas superiores apresenta capacidades diferentes de captar, acumular e tolerar o Se. Devido a esta distinção, as plantas são classificadas como não acumuladoras acumulam menos de 100 mg de Se, as acumuladoras acumulam até 1.000 mg de Se e as hiperacumuladoras com a capacidade de acumular até 15.000 mg de Se em sua massa seca. Destaca-se neste sentido, que as plantas de interesse agrônômico, em sua maioria, não possuem esta capacidade de acumular teores elevados do elemento, apresentando valores abaixo de 25 mg.kg⁻¹ de Se em sua massa seca, porém algumas culturas como o nabo indiano, o milho e o arroz apresentaram valores acumulados de 105 mg.kg⁻¹, 77 mg.kg⁻¹ e 42 mg.kg⁻¹ de Se respectivamente, após a fertilização do solo com selênio (RANI; DHILLIN; DHILLON, 2005; PRAUCHNER, 2014).

Portando, analisar o comportamento do Se em cultivares regionais configura-se como uma alternativa importante no fornecimento de estratégias para biofortificação a fim de suprir a deficiência do elemento em algumas áreas do Brasil e mundo.

Na Amazônia, o jambu (*Acmella oleracea* (L.) R. K. Jansen) representa grande parte dos hábitos de consumo de hortaliças pela população regional e com ampla repercussão na gastronomia internacional (SAMPAIO *et al.*, 2019). Essa espécie pertence à Família *Asteraceae*, mesma família da alface (*Lactuca sativa*), este muito utilizado para fins de biofortificação (RAMOS *et al.*, 2011). Dentro desta perspectiva abre-se a possibilidade de o jambu também ser utilizado em estratégias de biortificação. Além disso, não existem estudos que avaliem o comportamento do jambu em ensaios de biortificação com Se, bem como suas reações a presença do elemento.

Alguns elementos, mesmo benéficos, dependendo da dosagem utilizada podem trazer efeitos tóxicos para a planta. Para a maioria das cultivares de interesse agrônomo este limiar entre enriquecimento nutricional da planta e toxidez, já está estabelecido, a exemplo de alface, manjeriço, arroz, milho, entre outras. Contudo, para plantas regionais, como o jambu, experimentos dessa natureza ainda não foram realizados. Presume-se que por ser da mesma família *Asteraceae*, o jambu apresente capacidade de crescimento com doses de até 15 mg.kg^{-1} de Se, tal como mostram experimentos realizados em alface (RAMOS *et al.*, 2010; 2011).

Esse panorama faz emergir a seguinte indagação: qual a dose limite entre biofortificação e toxicidade de selênio que não comprometa o desenvolvimento do jambu cultivado em hidroponia?

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Procedimentos experimentais

O experimento foi conduzido nos meses de agosto e setembro de 2019, em casa de vegetação do Instituto de Ciências Agrárias (ICA) da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), ($1^{\circ} 27' 13,70''$ Sul e $48^{\circ} 26' 32,65''$ Oeste de Greenwich). Com altitude em torno de 14 m, a área onde se desenvolveu o experimento possui clima equatorial quente e úmido, categoria Af de Köppen (KOTTEK *et al.*, 2006).

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com quatro tratamentos, 15 repetições por tratamento, perfazendo um total de 60 plantas, sendo uma planta por vaso. O sistema de cultivo foi hidropônico em vasos de 1,5L. A solução nutritiva utilizada foi a de Hoagland e Arnon (1950). Os vasos foram preenchidos com substrato inerte (sílica moída pré-lavada), revestidos de papel alumínio para evitar a incidência de radiação solar nas paredes do vaso e assim mantendo a temperatura da solução adequada. Os vasos foram perfurados na base, com a introdução de um tubo de silicone para facilitar a recirculação diária da solução.

As sementes de jambu (*Acmella oleracea*), colhidas no banco de sementes da UFRA, foram semeadas no dia 3 de agosto de 2019 em bandejas de poliestireno com 128 células preenchidas com fibra de coco. Em cada célula foi colocada de dez a 15 sementes da variedade regional de jambu flor amarela. Após 10 dias de germinação, foi feito o desbaste das plantas menores deixando uma plântula por célula, cada planta com duas folhas.

Depois de 22 dias, as mudas com quatro folhas expandidas, foram retiradas das da bandeja de poliestireno, suas raízes foram lavadas com água destilada e em seguida transplantadas para os vasos contendo sílica e solução nutritiva a 50% da força iônica para facilitar a adaptação, permanecendo assim por sete dias. Após sete dias de adaptação, as plantas foram suplementadas com as doses de selênio. Foram utilizadas quatro doses de selênio (5, 10 e 20 mg.L⁻¹), aplicadas na forma de selenato de sódio (Na₂SeO₄) e mais a dose controle (PUCCINELI *et al.*, 2017).

A solução nutritiva foi composta por 1 mL.L⁻¹ de NH₄NO₃, 4 mL.L⁻¹ de KNO₃, 5 mL.L⁻¹ de Ca(NO₃)₂, 2 mL.L⁻¹ de MgSO₄, 1 mL.L⁻¹ de Fe-EDDHA e 1 mL.L⁻¹ de Solução micronutrientes e diariamente foram monitorados o pH e a condutividade elétrica da solução nutritiva. O pH foi mantido na faixa de 5,5, a 6,5 e a condutividade elétrica na faixa de 1,0-1,8 µs.cm⁻¹.

Para atender aos objetivos e mensurar a capacidade de absorção do selênio, sua translocação e seus efeitos sobre o jambu, foram feitas três colheitas ao longo do ciclo vegetativo da planta. As colheitas foram realizadas 14, 21 e 28 dias após o transplante. Em cada etapa foram colhidas cinco plantas por tratamento (15 plantas no total e mais cinco plantas controle) e após cada colheita, a solução nutritiva enriquecida com selênio foi trocada por solução nova para manter a concentração da solução até o término do experimento (PUCCINELI *et al.*, 2017).

2.2.2 Análises laboratoriais

2.2.2.1 Análise Biométrica

Após cada colheita, foram medidas as seguintes variáveis biométricas: i) Altura das Plantas (AP) - utilizando régua milimetrada, medindo a partir da superfície da sílica até o ápice; ii) Diâmetro do Caule (DC) - utilizando paquímetro, medindo o caule a 0,5 cm do substrato; iii) Número de Folhas (NF) - contagem das folhas totais emitidas pela planta; Número de Ramos (NR) - contagem de ramos totais emitidas pela planta.

Para a determinação da Massa Fresca de Folha (MFF), Massa Fresca de Caule (MFC); Massa Fresca de Raiz (MFR), as plantas foram limpas com água deionizada e deixadas para secar ao ar livre por 24 horas. Após a secagem as partes das plantas foram separadas e pesadas em balança analítica de precisão. Já para a quantificação das variáveis Massa Seca de Folha (MSF), Massa Seca de Caule (MSC) e Massa Seca de Raiz (MSR), as plantas foram

limpas com água deionizada e secas. Posteriormente as partes das plantas foram separadas, colocadas em sacos de papel e levadas para a estufa a 65°C por 48 horas, até as plantas atingirem pesos constantes. Após as 48 horas as partes das plantas foram retiradas e pesadas em balança de precisão (SAMPAIO *et al.*, 2020).

2.2.2.2 Determinação de troca gasosa em folhas

As variáveis de trocas gasosas foram medidas na primeira folha expandida do ápice até a base da planta. As plantas foram avaliadas aos 14, 21 e 28 dias. A taxa de assimilação líquida de CO₂ (*A*), a condutância estomática ao vapor de água (*g_s*) e a taxa de transpiração (*E*), foram medidas entre às 11:00h e 13:00h, determinado previamente por curva diurna de trocas gasosas, usando um sistema de troca gasosa de fluxo aberto portátil (LI 6400XT, LICOR, Lincoln, NE) sob uma concentração externa de CO₂ de 400 μmol mol⁻¹ de ar e PAR artificial de 1.000 μmol de fótons m⁻²s⁻¹, de acordo com Castro *et al.* (2017; 2019).

2.2.2.3 Análises Químicas

As amostras de raiz, caule e folhas do jambu depois de secas em estufa de circulação a 70°C foram moídas. Após a moagem das amostras, foi retirada uma alíquota de 0,25g e digerida com 4,0ml de HNO₃ a 7 mol.L⁻¹, 2 ml de H₂O₂ (30% mm⁻¹) e 2 ml de água ultrapura. A rampa de digestão no forno micro-ondas consistiu de três passos: subida da temperatura de 0 a 180°C em 10 minutos a 800w, permanência da temperatura de 180°C por 20 min e ventilação por 50 min (PEREIRA JÚNIOR; DANTAS, 2016).

O conteúdo de Se nas amostras de folha, caule e raiz do jambu foi determinada por espectrofotometria de absorção atômica com forno de grafite modelo Varian AA 240 Z, do laboratório de Qualidade de Águas da Amazônia da Universidade do Estado do Pará (UEPA).

De acordo com Swiader, Chyan e Freiji (1994) utilizou-se relação entre a massa seca da planta na dose de interesse e massa seca das plantas, ambas em gramas (g), controle para calcular o índice de tolerância (IT) ao Se pelo jambu, conforme Equação 1:

$$IT = \frac{\text{Massa seca da planta na dose de interesse}}{\text{Massa seca do controle}} \quad (1)$$

valores absolutos das magnitudes dos eixos das componentes, para gerar o vetor de pesos utilizada na construção de cada indicador.

Na construção dos indicadores representativos do conjunto das variáveis definidoras das dimensões: fisiologia da planta (If), crescimento da planta (Ic) e acúmulo de massa da planta (Im) e Geral (Ig) da pesquisa, todas as componentes foram consideradas para que fosse contemplada 100% da variância total da massa de dados. Os vetores de coeficientes associados a cada componente principal foram estimados com a aplicação do Software SPSS, versão 25 (IBM, 2018).

2.2.3.1.1 Construção dos Indicadores Estatísticos

Os indicadores das dimensões If, Ic, Im e Ig, estimados conforme Santana e Santana (2004), diferentemente das análises tradicionais de experimentos, que trabalham com modelos individuais para cada variável dependente, ampliam o escopo da análise para incorporar todos os efeitos captados pelo conjunto de variáveis que representam cada dimensão analisada. Assim, na dimensão definida como fisiologia da planta, ao invés de se observar parcialmente a influência das dosagens de selênio nas variáveis “Taxa de assimilação de CO₂, Condutância estomática e Transpiração”, construiu-se o indicador IF para representar o comportamento das três variáveis no seu conjunto. Com isto, capta-se de forma completa os efeitos causados à planta, observados em cada variável.

Seguindo o modelo proposto por Santana e Santana (2004), os pesos associados ao conjunto de componentes relacionado às dimensões fisiológicas (três componentes), de crescimento (quatro componentes), de acúmulo de massa (seis componentes) e geral (13 componentes) foram estimados com a aplicação do software SPSS 25 (IBM, 2018), e obtidos da seguinte forma (SANTANA; SANTANA, 2004; SANTANA, 2005):

- i) estima-se o vetor com a participação relativa dos autovalores λ ($\lambda_{kj}/\sum \lambda_k$);
- ii) estima-se os coeficientes da matriz de valores absolutos (a_{kj}) dos autovetores de cada componentes transformados;
- iii) estima-se os coeficientes relativos da matriz de autovetores ($a_{kj}/\sum a_k$);
- iv) define-se a combinação linear das variáveis descritoras e faz-se a multiplicação matricial para estimar os pesos Θ como nas Equações 4 e 5.

$$\theta_{j(kx1)} = \left(\frac{a_{kj}}{\sum a_k} \right)_{(kxk)} \cdot \left(\frac{\lambda_k}{\sum \lambda_k} \right)_{(kx1)} \quad (4)$$

Com

$$\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_p = 1 \quad (j = 1 - If, 2 - Ic, 3 - Im, 4 - Ig) \quad (5)$$

Onde k é o número de componentes de cada dimensão j.

Portanto, tem-se o modelo matemático utilizado para estimar os pesos associados às variáveis descritoras do comportamento da planta, tendo como referência as dimensões relacionadas à fisiologia, crescimento, acúmulo de massa e geral. Por fim, cada indicador é obtido pela multiplicação do vetor de pesos θ , pelos valores das variáveis explanatórias relacionadas aos aspectos fisiológicos (If), de crescimento (Ic), de acúmulo de massa (Im) e geral (g).

2.2.3.2 A análise de regressão

A especificação do modelo de regressão múltipla utilizado para representar o fenômeno estudado nesta tese, envolvendo os efeitos das doses de Se sobre a fisiologia, crescimento e acúmulo de massa nas plantas de jambu, foi definido no sistema de equações abaixo:

$$If = b_{10} + b_{11}D_s + b_{12}D_s^2 + u_1 \quad (6)$$

$$Ic = b_{20} + b_{21}D_s + b_{22}D_s^2 + u_2 \quad (7)$$

$$Im = b_{30} + b_{31}D_s + b_{32}D_s^2 + u_3 \quad (8)$$

$$Ig = b_{40} + b_{41}D_s + b_{42}D_s^2 + u_4 \quad (9)$$

Em que: If é o Indicador fisiológico da planta; Ic é o Indicador de crescimento da planta; Im é o Indicador de massa da planta; Ig é o Indicador Geral da planta; D_s representa as doses de selênio com resposta linear; D_s^2 as doses de selênio com resposta quadrática (controle, 5mg.L^{-1} , 10mg.L^{-1} e 20mg.L^{-1}); b_{i0} são os interceptos das equações ($i = 6, 7, 8, 9$); b_{ij} são os parâmetros associados às variáveis das equações; u_i são os termos de erro aleatórios das equações.

Os dados de conteúdo de Se (folha, caule, raiz e parte aérea), tolerância, biometria, trocas gasosas, bem como os indicadores multivariados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste Skott-Knott (SK), $p < 0,05$, com a utilização do software R versão 3.5.2 (R CORE TEAM, 2018).

2.3 Resultados

Os resultados das variáveis de explanatórias de crescimento (NF, NR, DC, AP), massa (MFF, MFC, MFR, MSF, MSR, MSC) e trocas gasosas (A , g_s e E) estão expressos na Tabela 1 e mostram o comportamento do jambu suplementado com doses crescentes de Se. De posse das variáveis explanatórias e através da análise de componentes principais (ACP), foram criados indicadores que comportam as dimensões de crescimentos, massa, fisiológica que agrupam todas as variáveis explanatórias e mostram o comportamento sistêmico do jambu na presença de Se.

2.3.1 Dimensão Crescimento

A variável NF não apresentou diferença significativa entre as doses de 5 mg.L^{-1} de Se e a dose controle, porém as doses de 10 e 20 mg.L^{-1} de Se reduziram significativamente em relação ao controle e a dose de 5 mg.L^{-1} de Se com 14 dias de experimento em relação ao transplantio. Já com 21 dias houve decréscimo no número de folhas à medida que aumentou a concentração de Se na solução nutritiva. Com 28 dias de cultivo as plantas com 5 mg.L^{-1} de Se não mostraram diferença significativa em relação as plantas controle para a variável NF. Em relação aos dias de tratamento, a variável NF mostrou diferença significativa com crescimento nas doses de 5 em relação a dose 10 mg.L^{-1} de Se, porém na dose de 20 mg.L^{-1} de Se não houve diferença desta variável nos dias de tratamento, indicando que nesta dose de Se não ocorreu o desenvolvimento da planta.

O Número de ramos (NR) não diferiu significativamente em relação aos tratamentos (doses) nos 14 dias após o transplantio. Com 21 e 28 dias de experimento respectivamente, somente a dose de 20 mg.L^{-1} diferiu significativamente em relação ao tratamento controle, havendo diminuição significativa do número de ramos para esta dose, comportamento que se repetiu até o final do experimento. Na comparação dos dias de tratamento, houve crescimento significativo do número de ramos entre 14 e 21 dias do transplantio, porém esta variável não diferiu significativamente entre os dias 21 e 28 a partir da implantação do experimento.

A variável DC (diâmetro do caule), seguiu o mesmo comportamento do NR, não mostrando diferença significativa entre os tratamentos, nos primeiros 14 dias de instalação do experimento, indicando que para esta variável, o acréscimo nas doses de Se na solução nutritiva não surtiu efeito. O efeito do Se nesta variável só foi significativo na dose de 20 mg.L^{-1} já na segunda semana de suplementação com Se (21 dias do transplantio). Em relação

aos dias de tratamento, o comportamento da variável DC também foi similar ao NR, mostrando crescimento significativo a partir de 21 dias de experimento.

Outra variável analisada e estabelecida neste estudo como indicativa de crescimento foi à altura da planta (AP), mostrando certa similaridade com o comportamento das variáveis anteriormente descritas, a variável AP não mostrou diferença significativa entre as doses de Se (tratamentos) suplementadas na solução nutritiva, nos primeiros 14 dias de experimento. Com 21 dias, a dose 20 mg.L⁻¹ afetou a altura da planta, fato evidenciado pela diferença significativa entre a respectiva dose e o controle. Quando se compara os dias de tratamento em relação às doses de Se nota-se que para 20 mg.L⁻¹ não houve diferença significativa, indicando influência do Se no crescimento do jambu (Tabela 1).

Tabela 1 - Resultados das análises biométricas e de trocas gasosas.

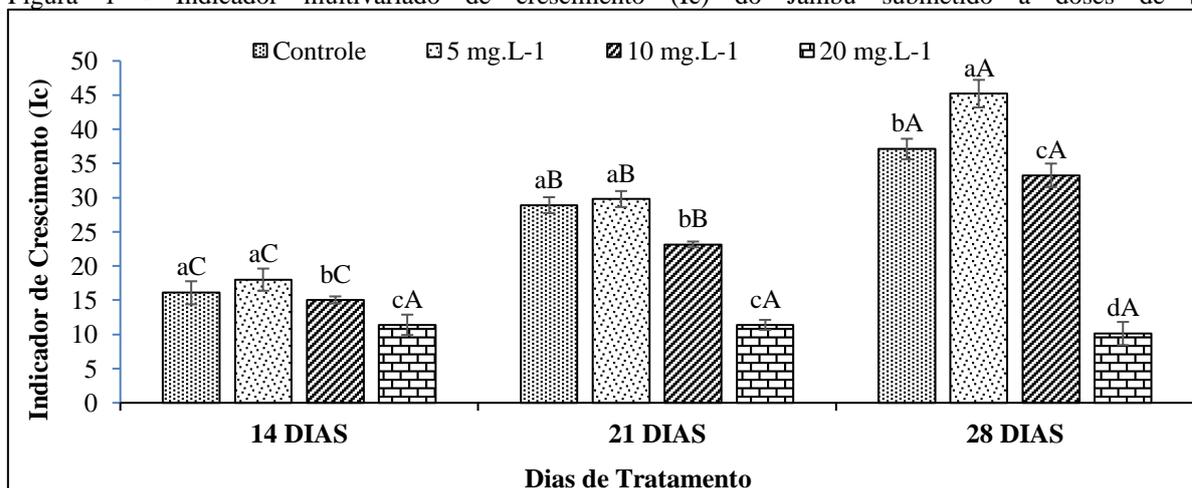
Variáveis	Controle			5 mg.L ⁻¹			10 mg.L ⁻¹			20 mg.L ⁻¹		
	14 Dias	21 Dias	28 Dias	14 Dias	21 Dias	28 Dias	14 Dias	21 Dias	28 Dias	14 Dias	21 Dias	28 Dias
NF	39,80±aC	78,60±2,07 aB	128,00±aA	41,80±0,83aC	70,60±5,02bB	132,70±10,61aA	34,40±1,51bC	48,00±1,0cB	80,00±12,08bA	25,20±4,7cA	20,60±1,94dA	21,00±8,0cA
NR	6,20±0,89aB	10,90±2,30aA	12,40±0,89aA	5,20±0,44aB	10,94±0,92aA	12,60±1,67aA	5,40±0,89aC	10,30±1,48aB	13,15±0,74aA	4,40±1,51aB	6,40±0,54bA	6,60±1,67bA
DC	3,42±0,87aB	4,58±0,30aA	5,36±0,70aA	2,34±0,85aC	4,52±0,01aB	5,89±0,55aA	3,28a±0,76aC	4,69±0,07aB	6,26±0,22aA	2,72±1,00aB	3,88±0,66bA	4,14b±0,75A
AP	14,26±1,79aB	23,74±5,07aA	21,12±2,20bA	13,50±1,11aC	24,37±1,94aB	29,02±2,47aA	14,50±1,18aC	28,54±1,52aB	30,42±0,07bA	14,14±3,71aA	14,80±2,54bA	15,42±4,39cA
MFF	4,56±1,63aC	14,60±0,19aB	22,32±0,70aA	4,86±0,74aC	14,79±0,33aB	22,12±0,62aA	4,35±1,12aC	7,74±0,88bB	15,20±0,36bA	3,15±0,92bA	2,90±0,20cA	1,40±0,87cB
MFC	3,17±0,99aC	10,79±2,27aB	18,45±4,29aA	3,63±0,42aC	10,83±1,54aB	19,79±3,60aA	3,20±1,07aC	10,83±0,85aB	16,81±1,35aA	3,01±1,87aA	4,23±0,81bA	3,75±2,32bA
MFR	1,62±0,80aC	8,22±0,38aB	11,73±1,49aA	1,56±0,37aC	9,07±1,03aB	11,27±0,95aA	0,62±0,57bB	2,36±0,08bA	1,82±0,31bA	0,24±0,13bB	0,51±0,10cB	1,15±0,38cA
MSF	0,32±0,04aC	1,35±0,09aB	2,41±0,22aA	0,40±0,07aC	1,24±0,04aB	2,42±0,18aA	0,39±0,10aC	0,78±0,06bB	1,28±0,27bA	0,64±0,05bA	0,48±0,05cA	0,26±0,02cB
MSR	0,25±0,03aC	0,54±0,11aB	0,97±0,03aA	0,25±0,01aC	0,61±0,04aB	0,81±0,11bA	0,20±0,03bB	0,50±0,08bA	0,42±0,13cA	0,13±0,03cA	0,15±0,03cA	0,09±0,01dB
MSC	0,22±0,02aC	0,83±0,13bB	1,39±0,03aA	0,28±0,07aC	0,86±0,08aB	1,48±0,05aA	0,32±0,10aC	0,98±0,05aB	1,13±0,001bA	0,27±0,03aA	0,27±0,01cA	0,22±0,01cA
A	32,29±1,57aA	33,71±2,00aA	21,12±6,29bB	31,75±1,57aA	31,57±0,76bA	26,36±6,29aA	31,56±1,19aA	30,72±0,38bA	27,29±0,20aA	24,23±4,90bA	9,84±3,46cB	0,00cC
g_s	0,33±0,01aA	0,41±0,16aA	0,12±0,04bB	0,32±0,01aA	0,34±0,06aA	0,23±0,03aA	0,26±0,05aA	0,31±0,06aA	0,23±0,05aA	0,31±0,07aA	0,11±0,03bB	0,00bC
E	7,43±0,62aA	8,00±1,36aA	3,27±1,01aB	6,97±0,78aA	8,06±0,48aA	4,04±1,75aB	6,70±0,56aA	8,03±0,17aA	4,13±1,60aB	7,14±1,39aA	3,66±0,93bB	0,00bC

Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Legenda: NF - Número de Folhas; NR - Número de Ramos; DC - Diâmetro do Caule (mm); AP - Altura da Planta (cm); MFF - Massa Fresca de Folhas (g.planta⁻¹); MFC - Massa Fresca de Caule (g.planta⁻¹); MFR - Massa Fresca de Raiz (g.planta⁻¹); MSF - Massa Seca de Folha (g.planta⁻¹); MSR - Massa Seca de Raiz (g.planta⁻¹); MSC - Massa Seca de Caule (g.planta⁻¹); A - Taxa de assimilação de CO₂ (μmol m⁻².S⁻¹); g_s - Condutância estomática (mol m⁻².S⁻¹); E - Transpiração (mmol m⁻².S⁻¹). As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre tratamentos no mesmo período de cultivo; as letras maiúsculas apontam as diferenças significativas nos dias de cultivo para a mesma dose de Se, de acordo com o teste Scott-Knott (*p* < 0,05).

O indicador de crescimento (IC) destacado na Figura 1, mostra que houve efeito benéfico do Se no desenvolvimento da planta. Destacadamente, com 28 dias de experimento, pode-se observar um crescimento significativo das plantas suplementadas com 5 mg.L⁻¹ do elemento. Percebe-se, porém, que com 14 dias as doses de 10 mg.L⁻¹ e 20 mg.L⁻¹ já começam a prejudicar o crescimento do jambu, não apresentando o mesmo desempenho que as plantas expostas a 5 mg.L⁻¹ e ao controle. Este comportamento seguiu até o final do experimento, com as plantas suplementadas com 10 mg.L⁻¹ se desenvolvendo porém com crescimento abaixo das plantas com 5 mg.L⁻¹ e o jambu exposto a 20 mg.L⁻¹ não cresceu ao longo do experimento. Nota-se que o uso do indicador de crescimento responde de maneira sinérgica ao comportamento da planta para as variáveis explanatórias analisadas.

Figura 1 - Indicador multivariado de crescimento (Ic) do Jambu submetido a doses de Se.



Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre tratamentos no mesmo período de cultivo; as letras maiúsculas apontam as diferenças significativas nos dias de cultivo para a mesma dose de Se, de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

2.3.2 Dimensão Massa

A variável Massa Fresca de Caule (MFC) não mostrou diferença significativa entre os tratamentos nos primeiros 14 dias, somente mostrando efeito do selênio na dose de 20 mg.L⁻¹ a partir de 21 dias do transplantio. Em relação aos dias de tratamento, a planta mostrou aumento dos valores da variável, com diferença significativa entre os dias de tratamento para todas as doses exceto para a dose de 20 mg.L⁻¹ de Se onde não houve diferença significativa entre o início do experimento e o final do mesmo.

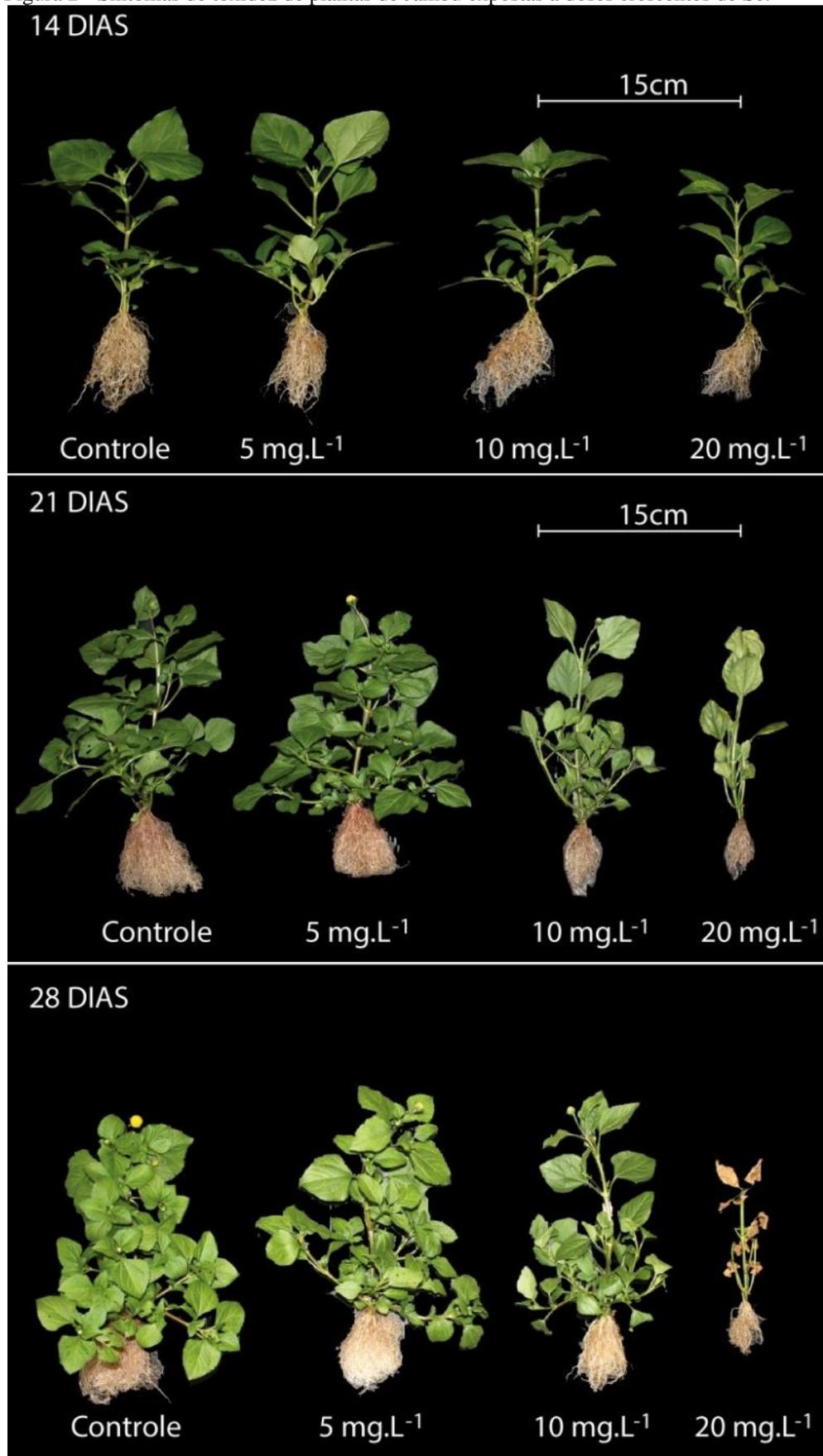
Assim como as demais variáveis descritas anteriormente, a Massa Fresca de Folha (MFF) apresentou diferença significativa somente na dose de 20 mg.L⁻¹ de Se com 14 dias após o transplantio. Porém, de forma não similar, esta variável já mostra a existência de diferença significativa entre a dose de 10 mg.L⁻¹ de Se e o controle, comportamento este acompanhado na dose de 20 mg.L⁻¹ de Se. Indicando que para esta variável, o efeito do selênio pode ser notado a partir de 10 mg.L⁻¹ do elemento-traço.

Quando se compara os períodos (dias) de tratamento, nota-se que na dose de 20 mg.L⁻¹ de Se, a planta obteve ganho massa, fato que pode ser evidenciado na Figura 2, mostra o desenvolvimento da planta ao longo do experimento, na qual é visível a necrose das folhas de jambu na dose de 20 mg.L⁻¹ de Se com 28 dias do transplantio.

As plantas de jambu apresentaram sintomas visuais de toxidez ao Se, evidenciados pela diminuição do tamanho da raiz, caule e folha nas doses de 10 e 20 mg.L⁻¹ ao longo do experimento. Na última fase do experimento (28 dias), as plantas suplementadas com a dose de 20 mg.L⁻¹ de Se morreram (Figura 2). De forma similar a variável MFF, a Massa Fresca de Raiz (MFR) não diferiu de forma significativa entre os tratamentos controle e 5 mg.L⁻¹ de Se, porém, houve um decréscimo da MFR na dose de 10 e 20 mg.L⁻¹ de Se nos primeiros 14 dias de experimento. Vale ressaltar que, com 21 dias de experimento a planta apresentou maior ganho de massa em seu sistema radicular na dose de 5 mg.L⁻¹ de Se (Figura 2).

Ao se analisar o comportamento das variáveis Massa Seca de Folha (MSF), Massa Seca de Raiz (MSR) e Massa Seca de Caule (MSC), destaca-se que nos primeiros 14 dias de experimento, as doses de 5 e 10 mg.L⁻¹ de Se, apresentaram valores maiores que o controle para MSF e MSR, indicando possível efeito benéfico do Se para o jambu. Já variável MSC não mostrou diferença significativa entre as doses de Se nos primeiros 14 dias de experimento. Todavia, com 21 dias, houve um decréscimo significativo no acúmulo de massa seca em todos os tratamentos em relação ao controle para as três variáveis analisadas (Figura 2).

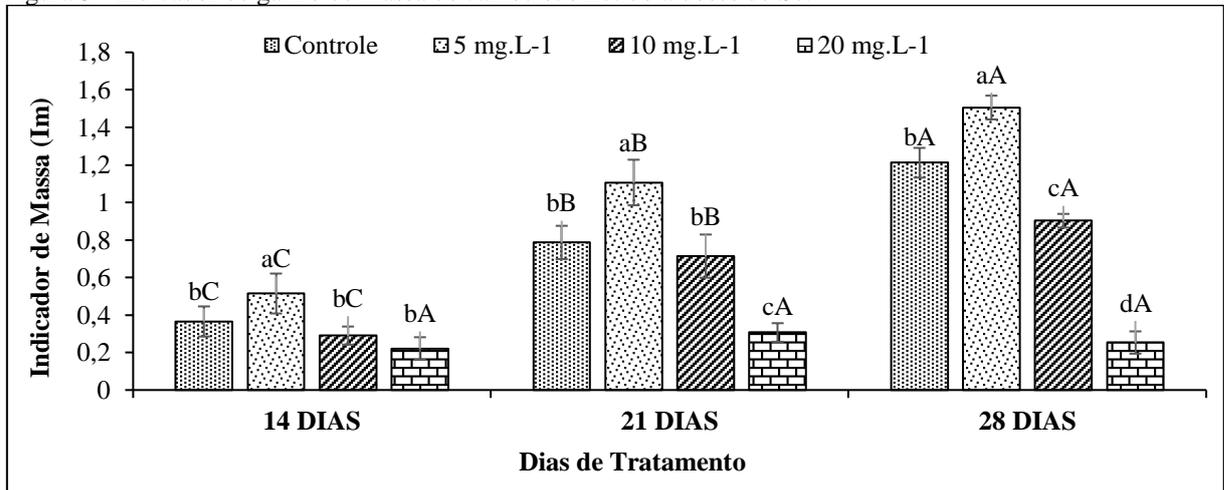
Figura 2 - Sintomas de toxidez de plantas de Jambu expostas a doses crescentes de Se.



Fonte: Eder Silva de Oliveira (2019).

De forma análoga, o comportamento do indicador de Massa (Im) reflete o mesmo comportamento do indicador crescimento, mostrando que a dose de 5 mg.L⁻¹ de Se, promoveu ganho de massa no jambu, inclusive com diferença entre o controle e as demais doses. As doses de 10 mg.L⁻¹ e 20 mg.L⁻¹ de Se provocaram redução no ganho de massa do jambu (Figura 3), podendo desta forma avaliar de maneira completa através de um único indicador como se comportaram as variáveis que respondem pelo indicador. Nota-se que diferente do indicador de crescimento (Ic) de não mostra diferença significativa entre as plantas controle e suplementadas com 10 mg.L⁻¹ no tempo de 28 dias, para o ganho de massa, com 28 dias de experimento o ganho de massa apresentou redução significativa em relação ao controle, mostrando que o Se afetou mais as variáveis de massa que de crescimento (Figura 3).

Figura 3 - Indicador de ganho de massa do Jambu submetido a doses de Se.



Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre tratamentos no mesmo período de cultivo; as letras maiúsculas apontam as diferenças significativas nos dias de cultivo para a mesma dose de Se, de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

Outros sintomas notados na planta foram o arqueamento das folhas a partir dos primeiros 14 dias de experimento e somente na dose de 20 mg. L⁻¹ (Figura 4).

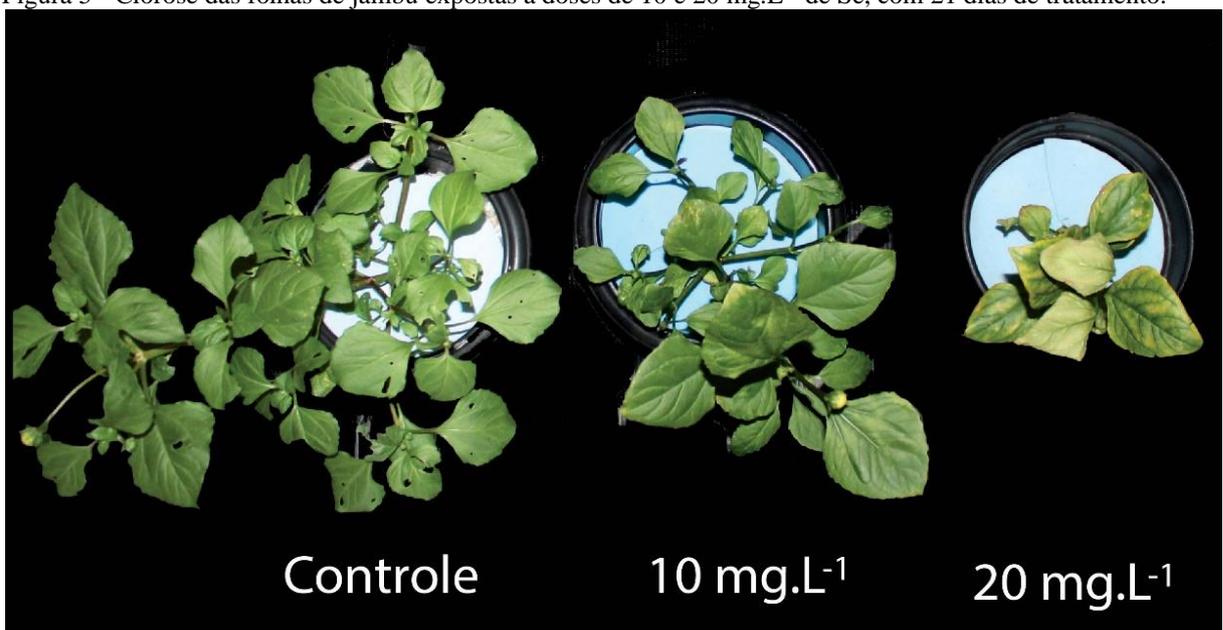
Figura 4 - Arqueamento das folhas de jambu expostas a 20 mg.L^{-1} de Se, com 21 dias de tratamento.



Fonte: Eder Silva de Oliveira (2019).

Prontamente a partir de 21 dias de experimento, os sintomas mostraram-se mais evidentes com aparecimento de clorose, bordas das folhas queimadas, manchas necróticas e redução do tamanho das folhas em relação ao controle, nas plantas suplementadas com as doses de 10 e 20 mg.L^{-1} (Figura 5).

Figura 5 - Clorose das folhas de jambu expostas a doses de 10 e 20 mg.L^{-1} de Se, com 21 dias de tratamento.



Fonte: Eder Silva de Oliveira (2019).

2.3.3 Dimensão Fisiológica

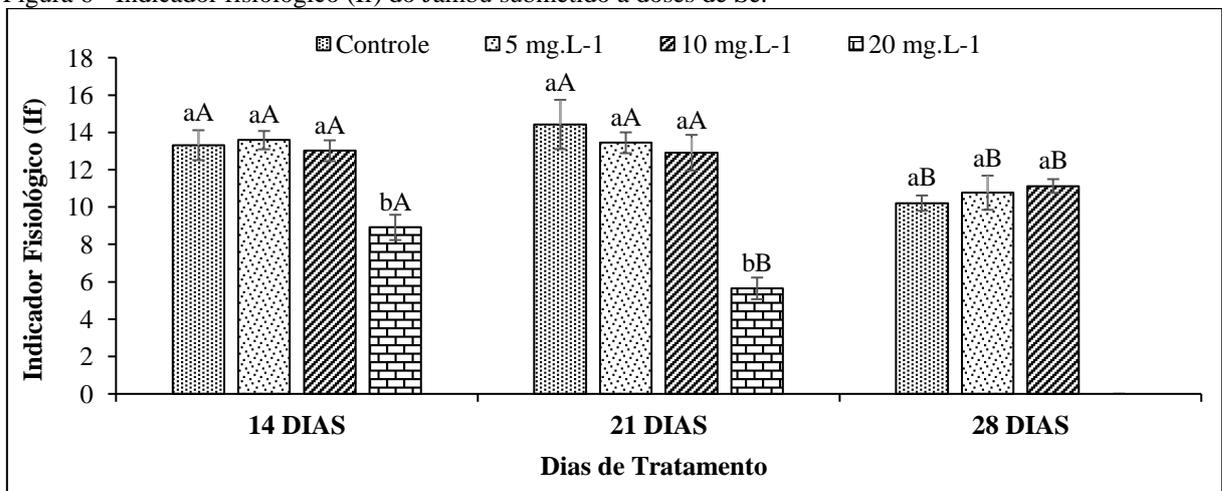
O comportamento fisiológico do jambu suplementado com Se pode ser evidenciado observando as variáveis de trocas gasosas medidas durante o estudo em questão.

Os dados de trocas gasosas corroboram com os dados de crescimento e ganho de massa. Nos primeiros 14 dias de experimento, somente na dose de 20 mg. L⁻¹ de Se houve perda na assimilação de CO₂ (A) por parte da planta, sendo que condutância estomática e a transpiração não foram afetadas pelo Se. Com 21 dias de tratamento houve perda na capacidade de assimilação de CO₂ a partir da dose de 5 mg. L⁻¹ de Se, porém somente na dose de 20 mg.L⁻¹ é que a condutância e transpiração foram afetadas.

Esse padrão de comportamento da planta se repetiu até o final do experimento, todavia com 28 dias, as plantas suplementadas com 20 mg. L⁻¹ de Se morreram.

Em relação ao comportamento do indicador fisiológico (If), nota-se que o comportamento da planta não foi afetado pela dose de 5 mg.L⁻¹ de Se, destacadamente nas primeiras duas etapas do experimento (14 e 21 dias), não houve diferença significativa entre as doses de 5 e 10 mg.L⁻¹ de Se e o controle. Porém, a partir do 28 dias, o If mostra uma redução na atividade das variáveis analisadas, fenômeno que pode estar relacionado ao ciclo reprodutivo da planta. Na dose de 20 mg.L⁻¹ porém, o Se comprometeu o aparato fotossintético da planta, não podendo ser medida nenhuma variável fisiológica da planta, mesmo com o tempo mínimo de exposição conduzido neste trabalho, indicando que esta dose é letal para o jambu (Figura 6).

Figura 6 - Indicador fisiológico (If) do Jambu submetido a doses de Se.



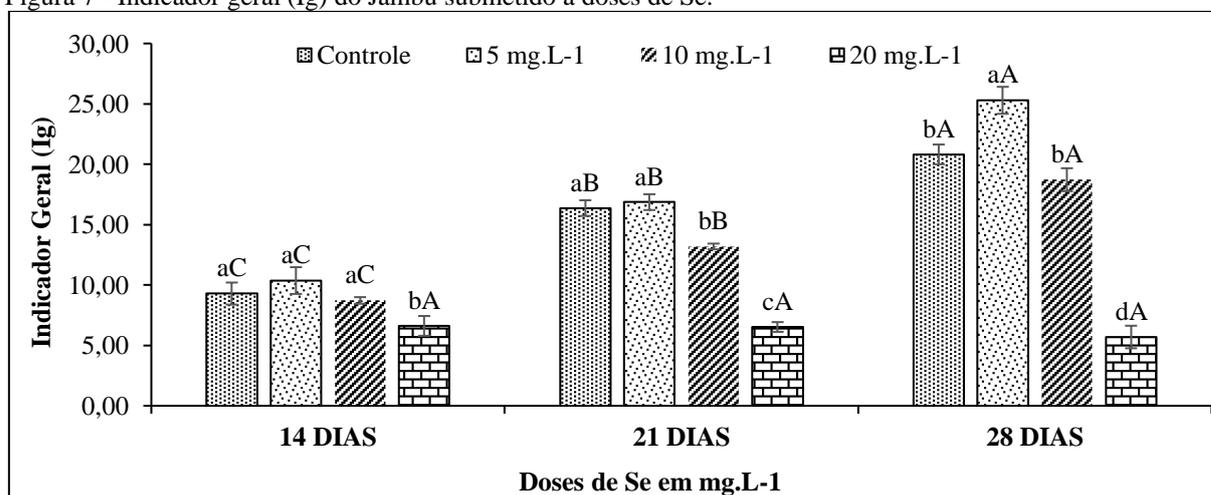
Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As barras representam o desvio-padrão. As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre tratamentos no mesmo período de cultivo; as letras maiúsculas apontam as diferenças significativas nos dias de cultivo para a mesma dose de Se, de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

O comportamento geral da planta demonstrado pelo Ig expõe a influência do Se em todas variáveis analisadas e mostra que somente na dose de 20 mg.L⁻¹, com 14 dias de tratamento, é que houve influência significativa no desempenho do jambu. Com 21 dias de tratamento somente a dose de 5 mg.L⁻¹, não alterou o comportamento do indicador, preservando resposta satisfatória das variáveis analisadas, porém com 28 dias de tratamento com o Se, percebe-se uma melhora no desempenho das plantas tratadas com 5 mg.L⁻¹ do elemento e uma perda de rendimento das mesmas variáveis nas doses maiores de 10 mg.L⁻¹ e 20 mg.L⁻¹, caracterizando assim efeito adverso do Se, a medida que se aumentou a dose e o tempo de exposição.

O Ig da planta não foi afetado pela dose de 5 mg.L⁻¹ de Se, destacadamente nas primeiras duas etapas do experimento (14 e 21 dias), não houve diferença significativa entre as doses de 5 e 10 mg.L⁻¹ de Se e o controle. Porém, a partir do 28 dia, o indicador mostra uma redução na atividade das variáveis analisadas, fenômeno que pode estar relacionado ao ciclo reprodutivo da planta. A dose de 20 mg.L⁻¹, porém pode ter consequências ao aparato fotossintético, mesmo com o tempo mínimo de exposição ao Se conduzido neste trabalho, indicando que esta dose é letal para o jambu (Figura 7).

Figura 7 - Indicador geral (Ig) do Jambu submetido a doses de Se.



Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As barras representam o desvio-padrão. As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre tratamentos no mesmo período de cultivo; as letras maiúsculas apontam as diferenças significativas nos dias de cultivo para a mesma dose de Se, de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

O indicador de crescimento (Ic), destacado na Figura 2, com comportamento polinomial evidenciado pela equação do Ic, exposta na Tabela 2, mostra que houve efeito benéfico do Se no desenvolvimento da planta. Com 28 dias de experimento, pode-se observar um crescimento significativo das plantas suplementadas com 5 mg.L⁻¹ do elemento. Percebe-

se, porém, que com 14 dias as doses de 10 mg.L⁻¹ e 20 mg.L⁻¹ já começam a prejudicar o crescimento do jambu, não apresentando o mesmo desempenho que as plantas expostas a 5 mg.L⁻¹ e ao controle. Esta tendência seguiu até o término do experimento, mostrando inclusive que o crescimento das plantas na dose de 20 mg.L⁻¹ não diferiram estatisticamente, indicando que com 21 e 28 dias de experimento o ritmo de crescimento da planta foi quase nulo.

Através de modelo polinomial calculado pelo Ic, a dose ideal para que a planta atinja seu máximo crescimento é de 2,89 mg.L⁻¹. O indicador de massa (Im), demonstrado através da figura 3, apresenta também comportamento polinomial, demonstrado pela equação Im (Tabela 2), com indicação através do modelo multivariado de dose ideal de 3,07 mg.L⁻¹ para que a planta atinja seu melhor ganho de massa.

Tabela 2 - Modelos de Regressão dos indicadores multivariados mostrando o comportamento do jambu e dose ideal para cada indicador.

Indicadores Multivariados	Equação de regressão dos indicadores	Concentração Ideal de Se em mg.L ⁻¹	R ² ajustado	p-Valor
Indicador de Crescimento (Ic)	$Ic = -0.06197D^{2*} + 0,3570D^{**} + 28,2985$	2,89	0.4254	<0,0001
Indicador de Massa (Im)	$Im = -0.00408D^{2*} + 0.01255D^{***} + 0,8217$	3,07	0.3067	<0,0001
Indicador Fisiológico (If)	$If = -0.03690D^{2***} + 0,3865D^{**} + 11,9237$	5,24	0.6662	<0,0001
Indicador Geral (Ig)	$Ig = -0,03510D^{2*} + 0,2070D^{**} + 15,9984$	2.95	0.4245	<0,0001

Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: ** significativo a 1% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade (teste F)

Apesar de também apresentar comportamento polinomial, indicado pela Figura 4 e demonstrado pela equação If (Tabela 2), o indicador fisiológico apresentou como melhor dose para as variáveis fisiológicas 5,24 mg.L⁻¹, podendo-se inferir que apesar do jambu ter uma queda crescimento e ganho de massa, o aparato fotossintético da planta ainda respondeu positivamente a maiores concentrações de Se.

Através do agrupamento de todas as variáveis explanatórias, foi possível propor uma equação geral que responde pelo comportamento da planta através do indicador que mostra o valor de 2,95 mg.L⁻¹ de Se na solução nutritiva para o melhor desempenho do jambu frente ao Se (Tabela 2). Doses acima deste valor a planta começará a perder rendimento, sendo que dose limite tolerável é de 10 mg.L⁻¹.

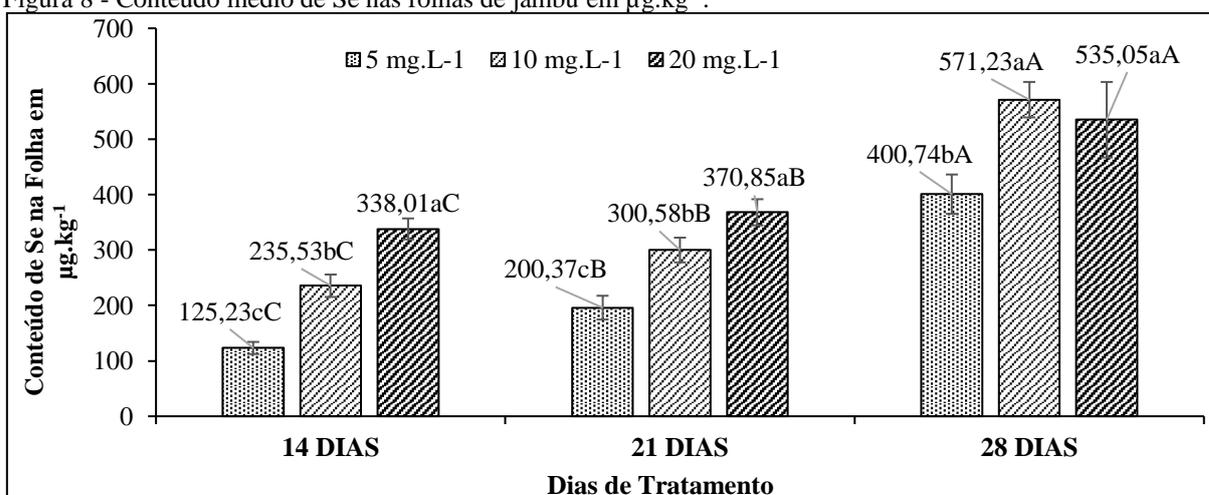
2.3.4 Conteúdo de Se e índice de Tolerância (It)

O conteúdo de Se nas folhas, caule e raiz do jambu estão demonstradas nas Figura 8, 9 e 10, respectivamente, as quais expressam a forma como o elemento foi captado e distribuído na planta ao longo do experimento. O aumento da concentração de Se na solução nutritiva promoveu uma assimilação significativa do elemento em todas as partes da planta, sobretudo nas folhas que apresentaram o maior conteúdo de Se ($400,17 \pm 35,50 \mu\text{g.kg}^{-1}$) na dose de 5 mg.L^{-1} com 28 dias de experimento.

Na dose de 10 mg.L^{-1} , aos 14 dias de experimento a planta absorveu $235,53 \pm 20,22 \mu\text{g.kg}^{-1}$ de Se. Com dias 21 de exposição a dose de 10 mg.L^{-1} , o conteúdo de Se na folha aumentou para $300 \pm 25,81 \mu\text{g.kg}^{-1}$, alcançando o valor máximo de $571,23 \pm 32,01 \mu\text{g.kg}^{-1}$. De forma análoga a dose que mais induziu a assimilação de Se nas folhas de jambu, foi de 20 mg.L^{-1} do elemento na solução nutritiva, aumentando significativamente o conteúdo de Se na folha de 14 para 21 dias e 28 ($338 \pm 01 \mu\text{g.kg}^{-1}$), ($370 \pm 25,85 \mu\text{g.kg}^{-1}$) e ($535 \pm 55,81 \mu\text{g.kg}^{-1}$) respectivamente.

Importante frisar que não houve diferença significativa no teor de Se nas folhas para as doses de 10 e 20 mg.L^{-1} com 28 dias de experimento, apontando para um limite na capacidade de captação do elemento (Figura 8). Assim como as folhas de jambu apresentaram crescimento significativo no conteúdo de Se com o aumento de doses do elemento na solução, o caule também mostrou o mesmo comportamento.

Figura 8 - Conteúdo médio de Se nas folhas de jambu em $\mu\text{g.kg}^{-1}$.

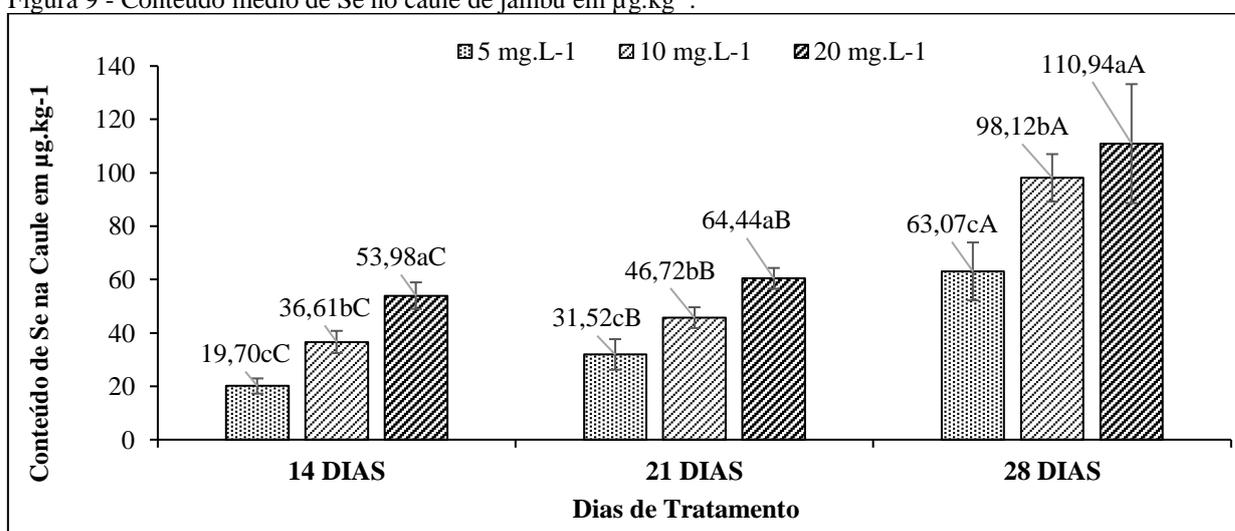


Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre tratamentos no mesmo período de cultivo; As letras maiúsculas apontam as diferenças significativas nos dias de cultivo para a mesma dose de Se, de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

À medida que foram adicionadas maiores concentração ao longo do experimento, o Se passou a ser absorvido pelo caule. A Figura 5 mostra que com 14 dias, a dose de 5 mg.L⁻¹ de Se propiciou a absorção de 19,70±3,39 µg.kg⁻¹ pelo caule do jambu e com 28 dias o total de Se no caule foi significativamente maior, da ordem de 63,05±10,85 µg.kg⁻¹. Este comportamento se repetiu para a dose de 10 mg.L⁻¹, apresentando maior valor de Se com 28 dia de experimento (98±12 µg.kg⁻¹) e para a dose de 20 o maior valor foi alcançado também com 28 dias de experimento (110±94µg.kg⁻¹), demonstrando que a planta absorveu mais Se a medida que este estava disponível na solução nutritiva (Figura 9).

Figura 9 - Conteúdo médio de Se no caule de jambu em µg.kg⁻¹.



Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

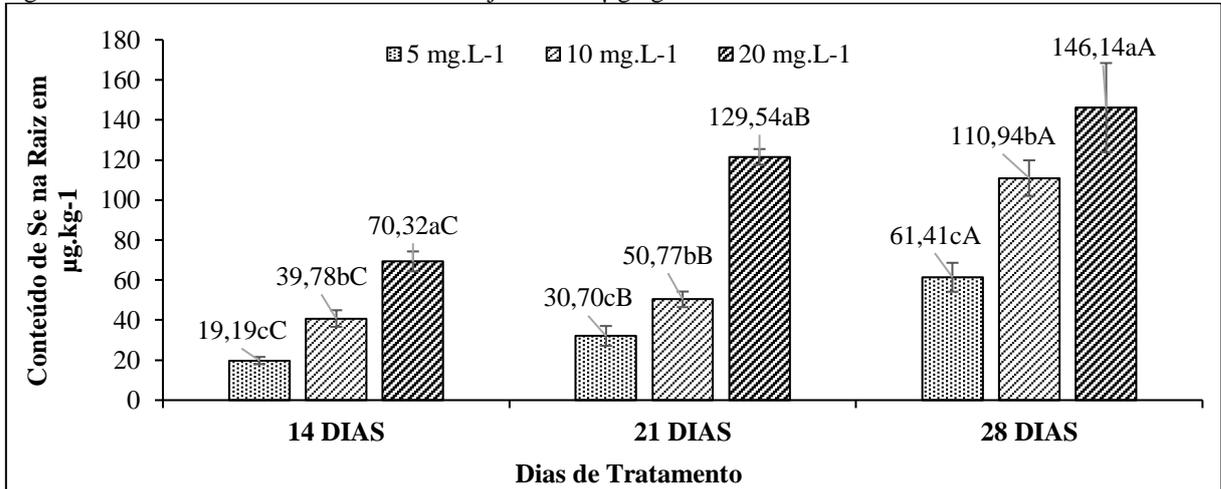
Nota: As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre tratamentos no mesmo período de cultivo; as letras maiúsculas apontam as diferenças significativas nos dias de cultivo para a mesma dose de Se, de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

Os valores de Se encontrados na raiz da planta, reportam a mesma tendencia de assimilação pelas folhas e caules, mostrando a capacidade do jambu e assimilar e particionar o elemento. Com 28 dias o conteúdo de Se na raiz para a dose de 5 mg.L⁻¹ foi de 61,±41 µg.kg⁻¹, 110±94 µg.kg⁻¹ para 10 mg.L⁻¹ e 146±14 µg.kg⁻¹ para 20 mg.L⁻¹. Crescimento significativo no conteúdo do elemento com o aumento das doses (Figura 10).

A folha, o caule e a inflorescência constituem a parte aérea do jambu é sua porção comestível. É de suma importância se analisar o conteúdo de Se na parte aérea, pois esta será a quantidade de Se que será ingerida através do jambu biofortificado. Com o aumento da concentração de Se na solução, a planta captou e translocou boa parte do Se para sua parte aérea, particionando o Se entre folha, caule e inflorescência. Nota-se que o conteúdo elemento com 14 e 21 dias foi maior nas doses de 10 e 20 mg.L⁻¹, com crescimento linear para as doses,

porém, com 28 dias o maior valor obtido para o conteúdo de Se foi na dose de 10 mg.L⁻¹, não mostrando diferença para a dose de 20 mg.L⁻¹, indicando que no final do experimento a planta não conseguiu absorver Se quando exposta a 20 mg.L⁻¹ (Figura 11).

Figura 10 - Conteúdo médio de Se na raiz de jambu em µg.kg⁻¹.

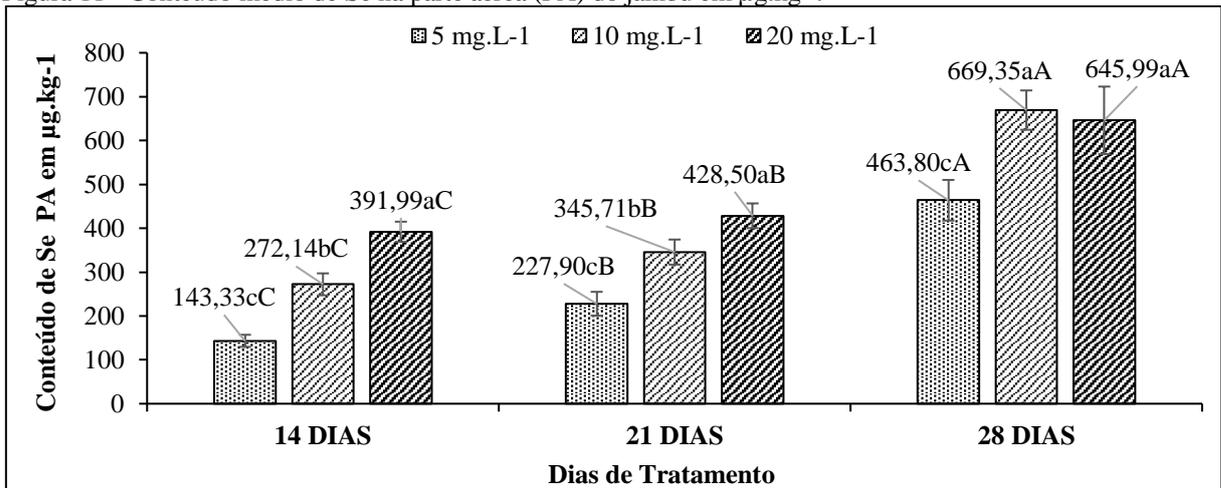


Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre tratamentos no mesmo período de cultivo; as letras maiúsculas apontam as diferenças significativas nos dias de cultivo para a mesma dose de Se, de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

A planta, apesar de mostrar sinais de toxidez, na dose de 10 mg. L⁻¹ continuou absorvendo Se, possivelmente pela alta disponibilidade do mesmo na solução.

Figura 11 - Conteúdo médio de Se na parte aérea (PA) do jambu em µg.kg⁻¹.

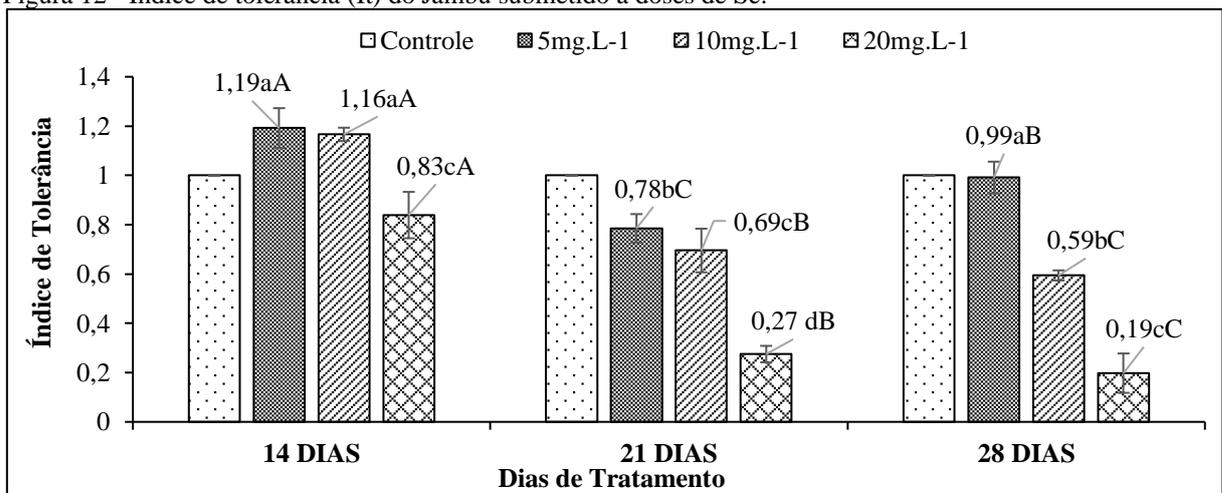


Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre tratamentos no mesmo período de cultivo; as letras maiúsculas apontam as diferenças significativas nos dias de cultivo para a mesma dose de Se, de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

Com base o índice de tolerância (It) pode-se inferir a relação da massa seca na dose de interesse com a massa seca das plantas controle. Observa-se que com 14 dias de tratamento o jambu mostra uma tolerância maior, com maior ganho de massa que as plantas controle, indicando que o Se nas doses de 5 e 10 mg.L⁻¹ não provocaram redução da massa seca da planta, porém o It apresenta uma redução na dose de 20 mg.L⁻¹, indicando que com o aumento da dose, a planta começa a expressar sinais de toxidez (Figura 12).

Figura 12 - Índice de tolerância (It) do Jambu submetido a doses de Se.



Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre tratamentos no mesmo período de cultivo; as letras maiúsculas apontam as diferenças significativas nos dias de cultivo para a mesma dose de Se, de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

Com 21 dias de tratamento, o jambu mostrou tendência de redução na produção da massa seca, fato comprovado pelo It exposto na Figura 8. Nota-se que em todas as doses, o It significativamente ficou abaixo do controle, correlacionado com o aumento do teor de Se, sobretudo nas folhas e caule, redução das atividades fisiológicas e de crescimento.

Todavia, com 28 dias a planta, sobretudo na dose de 5 mg.L⁻¹, mostrou sinais de recuperação em seu crescimento, com o It não diferindo significativamente do controle, fato que pode estar relacionado a um ajuste no sistema de defesa da planta frente a toxidez provocada pelo Se. Contudo, nas doses maiores, a planta não seguiu o mesmo desempenho, indicando que na dose de 5 mg.L⁻¹ o jambu consegue se desenvolver e promover ganho de massa e crescimento, porém a dose tolerável de Se em solução nutritiva com 28 dias de exposição é de 10 mg.L⁻¹. A dose de 20 mg.L⁻¹ foi letal para planta.

2.4 Discussões

Diversos estudos têm apontado para o uso de Selênio em plantas como estratégia de melhoramento genético, bem como o uso do elemento para fins de biofortificação. e pode ser em plantas comestíveis com a finalidade de minimizar a deficiência na ingestão do elemento (WHITE, 2016). Nascimento (2018) destaca que a inserção de Se na alimentação é uma alternativa promissora para o combate de deficiência de micronutrientes.

Este estudo é o primeiro a abordar os efeitos da adição de selênio em plantas de Jambu. Sendo que Hungria *et al.* (2019) destacam a tolerância do jambu em solo contaminado por cádmio. Muitos estudos evidenciaram o efeito benéfico de baixas doses de Se na produtividade de lavouras: Singh *et al.* (1980) concluíram que 0,5 mg.kg⁻¹ de Se no solo, estimulou o crescimento e biomassa de nabo indiano, Cartes *et al.* (2010) relatam a redução da toxidez de alumínio em azevém com presença do elemento; Kumar *et al.* (2012) mostraram que espécies reativas de oxigênio foram reduzidas em algas marinhas sob estresse de Cd, com aplicação de 4 mg.L⁻¹ de Se.

No presente estudo, os resultados indicam que o Se produziu efeito benéfico significativo no jambu exposto a dose de 5 mg.L⁻¹, possivelmente pela redução de espécies reativas de oxigênio (EROs) e aumento das atividades antioxidantes devido a presença de selenocisteína, fato também captado pelo índice de tolerância. Todavia, a partir da exposição a dose de 10 mg.L⁻¹ de Se em solução, a planta desenvolveu sinais de toxidez com clorose das folhas, redução dos indicadores de crescimento, massa e fisiológico e índice de tolerância, chegando a letalidade na dose extrema de 20 mg.L⁻¹. Esse efeito binário pode ocorrer possivelmente porque em pequenas doses, o Se inibe a produção de EROs, contudo em doses elevadas o Se interfere no metabolismo do S, substituindo aminoácidos sulfurados pelos seus análogos de Se. Esses aminoácidos de Se são podem ser incorporados a proteínas causando toxidez pela ausência do S que possivelmente foi suprimido, ficando retido na solução nutritiva (WHITE, 2016; PAUCHNER, 2014).

Portanto o efeito binário do Se no jambu, assim como em outras plantas, está relacionado como o elemento está disponível, bem como da concentração em solução nutritiva. Na forma de Selenato, como utilizado neste trabalho, utiliza os transportadores e canais de sulfato, presentes na membrana plasmática das raízes, como meio de absorção. Sob alta concentração de sulfato, a seletividade dos transportadores induzem uma maior absorção de S e reduzem a efetividade de captação de Se, além disto, a translocação do íon de Se ou molécula contendo elemento, vai depender da taxa de carregamento do xilema e da taxa de

transpiração. Todavia o aumento do Se na solução provoca a inibição da absorção do S e síntese de compostos sulfurados na planta (GUPTA; GUPTA, 2017).

Os indicadores multivariados expressam o comportamento geral do jambu enriquecido com Se. Para o maior crescimento da planta, o valor de Se na solução foi de 2,89 mg.L⁻¹, já para uma maior produção de biomassa, a dose indicada pela análise multivariada foi de 3,07 mg.L⁻¹ e segundo modelo fisiológico proposto neste trabalho, a dose de 5,24 mg.L⁻¹ seria a mais adequada para aumentar o desempenho do aparato fotossintético da planta. Nota-se faixa de concentração entre 2,89 a 5,24 mg.L⁻¹ de Se e a faixa ideal um melhor desempenho da planta. O intuito da construção de indicadores multivariados foi de facilitar a compreensão do comportamento da planta em relação ao Se, com isso o indicador geral vem contemplar essa lacuna, pois ele captou o comportamento de todas as variáveis em um único indicador, tendo expressado o valor de 2,95 mg.L⁻¹ como dose que reflete o maior desempenho jambu frente ao Se.

2.5 Conclusão

O Se até a dose de 5 mg.L⁻¹ na solução nutritiva, induziu efeito benéfico no jambu, provocando um maior desempenho fisiológico, crescimento e ganho de massa. Com a planta exposta a 5 mg.L⁻¹ por 28 dias, esta concentrou em sua parte aérea 462,15 µg.kg⁻¹ de Se. Todavia, a planta mostrou baixa tolerância ao elemento a partir da dose de 10 mg.L⁻¹, visto que apresentou redução no seu desenvolvimento na referida dose e letalidade na dose de 20 mg.L⁻¹.

Devido a forma como o Se é absorvido pelas plantas, a toxidez ao elemento pode estar relacionada a competição na absorção e substituição do S pelo Se nas cisteínas e metioninas, podendo provocar inibição de compostos sulfurados.

O Uso de indicadores multivariados, se mostrou adequado para captar de forma integrada o efeito de cada variável explanatória descrita neste estudo. Pois através destes indicadores foi possível compreender, de maneira sistêmica, a relação entre as doses de Se administradas na solução e o comportamento do jambu. Sobretudo com a possibilidade de se reduzir o grande número de variáveis descritoras do comportamento da planta em um número bem menor de indicadores, facilitando assim a compreensão da relação causa e efeito do Se no jambu.

Destaca-se neste sentido o indicador geral que mostra a dose 2,95 mg.L⁻¹ de Se em solução nutritiva como mais adequada para o melhor desempenho do jambu. Dose esta que deve ser baliza para futuros experimentos de biofortificação com a planta.

REFERÊNCIAS

BROADLEY, M.; BROWN, P.; CAKMAN, I.; MA, J. F.; RENGEL, Z.; ZHAO, F. Beneficial elements. 3.ed. *In*: MARSCHNER, P. (Org.). **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. Elsevier, 2012.

CAKMAK, I; HORST, W. Effect of aluminium on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). **Physiol. Plant.**, v. 83. p.463-468, 1991.

CARTES, P.; GIANFREDA, L.; PAREDES, C.; MORA, M.L. Selenium uptake and its antioxidant role in ryegrass cultivars as affected by selenite seed pelletization. **Journal of Soil Science and plant nutrition**, v. 11, p1-14, 2011.

CASTRO, G. L. S.; SILVA JR, D. D.; VIANA, R. G.; REGO, M. C. F. SILVA, G. B. Photosynthetic apparatus protection and drought effect mitigation in açai palm seedlings by rhizobacteria. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.41, n.163. p.1-12, 2019.

CASTRO, G. L.S.; SILVA JR. D. D.; BUENO, A. C. S. O.; SILVA, G. B. Anthracnose in açai palm leaves reduces leaf gas exchange and chlorophyll a fluorescence. **Trop. plant pathol.**, v.42. p.13-20, 2017.

DILLON, W. R.; GOLDSTEIN, M. **Multivariate analysis: methods and applications**. New York: John Wiley & Sons, 1984.

EVIEW. **Student Version Lite**. Version. 12.Irvine: QMS, 2012.

GUPTA, M.; GUPTA, S. An Overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. **Frontiers in Plant Science**, v.11, p.1-14, 2017.

HARTIKAINEN, H. Biogeochemistry of selenium and its impact on food chain quality and human health. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 18, p. 309-318, 2005.

HOAGLAND, D.R.; ARNON, D.I. The water-culture method for growing plants without soil. California Agricultural Experiment Station Circular 347. *In*: **College of Agriculture**. Berkeley: University of California, 1950.

HUNGRIA, L. C; OLIVEIRA, E.S; SAMPAIO, I.M; SOUZA, E.S.; FERNANDES, A. R. Tolerância de plantas de jambu (*Acmella olerácea*) cultivadas em solo contaminado por cádmio. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 5, n. 11, p. 26211-26219, 2019.

IBM. **SPSS Statistics version 25**. [S.l.]: IBM, 2018.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. New Jersey: Prentice-Hall, 2007. 773p

KHAN, M. I. R.; MOHD, F. N.; PER, A. T. S.; KHAN, N. A. Selenium and sulfur influence ethylene formation and alleviate cadmium-induced oxidative stress by improving proline and glutathione production in wheat. **Journal of Plant Physiology**, v.173, p.9-18, 2015.

KORNDÖRFER, G. H. Elementos benéficos. In: FERNADES, M. S. (Ed.) **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.355-374.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v.15, n. 3, p.259-263. 2006.

KUMAR M.; BIJO, A.J.; BAGHEL, R.S.; REDDY, C.R.K.; JHA, B. Selenium and spermine alleviate cadmium induced toxicity in the red seaweed *Gracilaria dura* by regulating antioxidants and DNA methylation, *Plant Physiology and Biochemistry*, v.51, p.129-138, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2011.10.016>

LATTIN, J.; CARROL, J. D.; GREEN, P. E. **Análise de dados multivariados**. Trad. AVRITSCHER, H. São Paulo. Ed. Cengage Learning. 455p. 2011.

LONGCHAMP, M; CASTREC-ROUELLE, M; BIRON, P; BARIAC, T . Variations in the accumulation, localization and rate of metabolization of selenium in mature Zea mays plants supplied with selenite or selenate. **Food Chemistry**, London, v. 182, n.1, p. 128-135, 2015.

MORAES, M.F.; WELCH, R.M.; NUTTI, M.R.; CARVALHO, J.L.V.; WATANABE, E. Evidences of selenium deficiency in Brazil: from soil to human nutrition. In: BANUELOS, G.R., LIN, Z.Q., YIN, X.B. (Eds). **First International Conference on Selenium in the Environment and Human Health**, 2009. Suzhou. Selenium: deficiency, toxicity and biofortification for human health. 116p. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009. p.73-74.

NASCIMENTO, C. S. **Biofortificação agrônômica da rúcula com selênio em sistema hidropônico**. 2018. 43f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP. 2018.

NAZ, F.S; YUSUF, M; KHAN, T.A; FARIDUDDIN, Q; AHMAD, A. Low level of selenium increases the efficacy of 24-epibrassinolide through altered physiological and biochemical traits of *Brassica juncea* plants. **Food Chemistry**, Barking, v.185, n.1, p. 441 – 448, 2015.

PEREIRA JUNIOR, J.B; DANTAS, K.G.F. Evaluation of inorganic elements in cat's claw teas using ICP OES and GF AAS. **Food Chemistry**, v.196, p.331–337, 2016.

PRAUCHNER, C. A. **A importância do selênio para a agropecuária e saúde humana**. Editora UFMS. Santa Maria. 2014. 377p.

PUCCINELLI, M.; F. MALORGIO, F.; I. ROSELLINI, I.; B. PEZZAROSSA, B. Uptake and partitioning of selenium in basil (*Ocimum basilicum* L.) plants grown in hydroponics. **Scientia Horticulturae**, v.225, p.271-276, 2017.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Version 3.5.1. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2018.

RAMOS, S. J.; FAQUIN, V.; ALMEIDA, H. J.; ÁVILA, F. W.; GUILHERME, L. R. G., BASTOS, E. A.; ÁVILA, P. A. Selenato e selenito na produção, nutrição mineral e biofortificação com selênio em cultivares de alface. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p.1347-1355, 2011.

RAMOS, S.J.; FAQUIN, V.; GUILHERME, L.R.G.; CASTRO, E.M.; ÁVILA, F.W.; CARVALHO, G.S.; BASTOS, C.E.A.; OLIVEIRA, C. Selenium biofortification and antioxidant activity in lettuce plants fed with selenate and selenite. *Plant Soil Environ.*, v.56, p.584-588. 2010. <https://doi.org/10.17221/113/2010-PSE>

RANI, N.; DHILLON, K.S.; DHILLON, S.K. Critical levels of selenium in different crops grown in an alkaline silty loam soil treated with selenite-Se. **Plant Soil**, Berlim (Alemanha), v. 277, p. 367-374, 2005.

REIS, A. R.; FURLANI JR, E.; MORAES, M. F.; MELO, S. P. Biofortificação agrônômica com selênio no Brasil como estratégia para aumentar a qualidade dos produtos agrícolas. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 8, n.2, p.128-138, 2014.

RIBAS, R. J.; VIEIRA, P. R. C. **Análise multivariada com o uso do SPSS**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2011. 272p.

RÍOS, J. J; BLASCO, B; LEYVA, R; SANCHEZ-RODRIGUES, E; RUBIO- WILHELMI, M.M; ROMERO, L; RUIZ, J.M. Nutritional balance changes in lettuce plant grown under different doses and forms of selenium. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.36, n.9, p.1344-1354, 2013.

SAMPAIO, I. M. G.; GUIMARÃES, M. A.; NETO, H. S. L; MAIA, C. L.; VIANA, C. S.; GUSMÃO, S. A. L. Pode o uso de mudas agrupadas e a maior densidade de plantio aumentar a produtividade de jambu? **Rev. Cienc. Agrar.**, v. 61, p1-8, 2018.

SAMPAIO, I. M. G.; SILVA JUNIOR, M. L.; CHAGAS, E. S.; BITTENCOURT, R. F. P. M.; COSTA, V. C. N.; SOUZA, D. L. SANTOS, W. A. S.; TEIXEIRA, B. J. B. Evaluation of the Non-destructive Method Efficiency of Estimating Nitrogen Content in Jambu Plants Grown in Hydroponic System. **Journal of Agricultural Studies**, v.8, n.2, p.466-479, 2020.

SAMPAIO, I.M.G.; GUIMARÃES, M. A.; LEMOS NETO, H. S.; MAIA, C. L.; VIANA, C. S.; GUSMÃO, S. A. L. Recipientes e densidades de semeadura combinadas com o tempo na produção de mudas de jambu. **Revista de Ciências Agrárias**, v.62, 2019.

SANTANA, A. C. **Elementos de economia, agronegócio e desenvolvimento local**. Belém: GTZ; TUD; UFRA, 2005.

SANTANA, A. C. **Métodos quantitativos em economia**: elementos e aplicações. Belém: UFRA, 2003.

SANTANA, A. C.; SANTANA, A. L. Mapeamento e análise de arranjos produtivos locais na Amazônia. **Teoria e Evidencia Econômica**, v.12, n.1, p.9-34, 2004.

SINGH, M.; SINGH, H.; BHANDARI, D.K. Interaction of selenium and sulphur on the growth and Chemical composition of raya. **Soil Science**. v. 129, p.238-244, 1980.

SWIADER, J.M.; CHYAN, Y.; FREIJI, F.G. Genotypic differences in nitrate uptake and utilization efficiency in pumpkin hybrids. **Journal of Plant Nutrition**, v.17, n.10, p.1687 - 1699, 1994.

VIARO, R. S.; VIARO, M. S.; FLECK, J. Importância bioquímica do selênio para o organismo humano. **Disciplinarum Scientia**, Série: Ciên. Biol. e da Saúde, Santa Maria, v.2, n.1, p.17-21, 2001.

WHITE, P.J. Selenium accumulation by plants. **Annals of Botany**, v.117, p.217-235, 2016.

3 BIOFORTIFICAÇÃO DE SELÊNIO EM PLANTAS DE JAMBU [*ACMELLA OLERACEA* (L.) R. K. JANSEN] CULTIVADAS EM HIDROPONIA

RESUMO

A biofortificação consiste no enriquecimento nutricional de alimentos para minimizar a deficiência de alguns nutrientes na dieta de seres humanos. Na prática, isto ocorre com o melhoramento genético ou através do manejo de culturas. Neste sentido a biofortificação com selênio em plantas adaptadas as condições de cada região pode ser uma alternativa promissora para reduzir a deficiência do elemento na dieta das populações, sobretudo em países em desenvolvimento. O objetivo deste capítulo é avaliar o potencial do jambu para a biofortificação a doses crescentes de selênio (Se). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com seis tratamentos e cinco repetições, totalizando 30 plantas, em hidroponia. Foram utilizadas cinco doses de Se na forma de selenato de sódio (1, 2, 3, 4 e 5 mg.L⁻¹), e o controle. Foram feitas análises biométricas, macro e micronutrientes, conteúdo e acúmulo de Se nas partes da planta, bem como calculados os índices de translocação (Tr), tolerância (It) e de uso eficiente de nutrientes (Uen). Os resultados foram submetidos à ANOVA e à análise de componentes principais para a construção de indicadores dimensões de crescimento, massa, concentração de nutrientes, acúmulo de nutrientes e geral para especificar os modelos de regressão. Os resultados biométricos e químicos mostraram que a planta obteve maior desempenho agrônômico quando submetida a dose 3mg.L⁻¹, com média na capacidade translocação em torno de Se 70% do Se da solução nutritiva para a parte aérea. Os índice de tolerância e uso eficiente de nutrientes também mostraram que o jambu teve seu crescimento otimizado com a dose 3 mg.L⁻¹ de Se. Os resultados obtidos a partir das equação de regressão dos indicadores multivariados de crescimento, massa, concentrações e acúmulo de nutrientes mostram uma variação na concentrações ideal de Se que vai de 2,77 a 3,36 mg.L⁻¹. Porém quando se utiliza o indicador geral que capta todo o comportamento do jambu, a concentração ideal para biofortificação da planta é de 2,98 mg.L⁻¹ de Se. O consumo diário de 100 g de jambu biofortificado com a dose indicada, irá fornecer conteúdo diário de 50,13 µg de Se, disponibilizando para a população quantidade necessária de Se para uma dieta equilibrada.

Palavras-chave: Translocação. Alternativas Nutricionais. Indicadores multivariados.

3 SELENIUM BIOFORTIFICATION IN JAMBU [*ACMELLA OLERACEA* (L.) R.K. JANSEN] PLANTS CULTIVATED IN HYDROPONIA

ABSTRACT

Biofortification is the nutritional enrichment of foods to minimize the deficiency of some nutrients in the diet of human beings. In practice, this occurs with genetic improvement or through crop management. In this sense, biofortification with selenium in plants adapted to the conditions of each region can be a promising alternative to reduce the deficiency of the element in the diet of populations, especially in developing countries. The aim of this chapter is to assess the potential of jambu for biofortification at increasing doses of selenium (Se). The experimental design was completely randomized with six treatments and five replications, totaling 30 plants, in hydroponics. Five doses of Se in the form of sodium selenate (1, 2, 3, 4 and 5 mg.L⁻¹) and the control were used (zero Se). Biometric analysis, macro and micronutrients, Se content and accumulation in the parts of the plant were performed, as well as calculated the indices of translocation (Tr), tolerance (It) and efficient use of nutrients (Uen). The results were submitted to ANOVA and principal component analysis for the construction of growth, mass, nutrient concentration, nutrient accumulation and general indicators to specify the regression models. The biometric and chemical results showed that the plant had better agronomic performance when subjected to a dose of 3mg.L⁻¹, with an average translocation capacity around 70% Se of the nutrient solution to the shoot. The tolerance index and efficient use of nutrients also showed that jambu had its growth optimized with the dose of 3 mg.L⁻¹ of Se. The results obtained from the regression equations of the multivariate indicators of growth, mass, concentrations and nutrient accumulation show a variation in the ideal Se concentrations ranging from 2.77 to 3.36 mg.L⁻¹. However, when using the general indicator that captures the entire behavior of jambu, the ideal concentration for plant biofortification is 2.98 mg.L⁻¹ of Se. The daily consumption of 100 g of biofortified jambu with the indicated dose will provide a daily content of 50.13 µg of Se, providing the population with the necessary amount of Se for a balanced diet.

Keywords: Translocation. Nutritional Alternatives. Multivariate Indicators.

3.1 Introdução

O Selênio (Se) é um micronutriente essencial aos seres humanos e animais, entretanto, verificam-se frequentemente alimentos pobres neste micronutriente. Tal deficiência de Se nos alimentos é atribuída principalmente aos baixos teores desse elemento nos solos agrícolas. Conforme Nascimento (2018) ressalta-se que uma dieta deficiente neste mineral resulta na maior suscetibilidade a uma série de doenças (dentre elas câncer, hipertireoidismo e doenças cardíacas), sendo que, de acordo com a instrução normativa Nº 28, de 26 de julho de 2018, da agência nacional de vigilância sanitária (ANVISA), a dose diária recomendada para adultos varia de no mínimo 8,25 a no máximo 319,75 $\mu\text{g}\cdot\text{dia}^{-1}$ de Se (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2018).

O Se é basicamente incorporado à nutrição humana via produtos agrícolas (JOY *et al.* 2015). Dentre as alternativas utilizadas para a inserção do Se na alimentação humana está a biofortificação de alimentos e dentre as possíveis soluções, a Biofortificação Agronômica é destacada como uma técnica relativamente barata e eficiente para o incremento da qualidade nutritiva em alimentos (INOCÊNCIO, 2014).

A biofortificação consiste no enriquecimento nutricional dos alimentos durante a produção no campo, podendo ser realizada por melhoramento genético (convencional ou transgenia) ou através do manejo da cultura (GRACIANO, 2019), sendo a segunda, denominado de Biofortificação Agronômica e consiste em enriquecer os alimentos com minerais, através de tratos culturais diferenciados (VERGÜTZ *et al.* 2016; GRACIANO, 2019). A biofortificação de alimentos é uma alternativa promissora para a inserção do Se na alimentação (NASCIMENTO, 2018), sendo justificado o uso desta técnica devido ao seu potencial no combate às deficiências por micronutrientes, que atingem grande parte da população mundial (MANOS; WILKINSON, 2016).

Berdejo e Azevedo (2008) evidenciam que a biofortificação é possível sem comprometer a produtividade da cultura, destacando que resultados positivos foram obtidos em análises sobre o custo-benefício da biofortificação, o que fortalece o uso da mesma no controle à deficiência de micronutrientes.

Segundo White (2016) cerca de um bilhão de pessoas no mundo apresentam deficiência deste mineral. Para Puccinelli *et al.* (2017) a biofortificação de culturas comestíveis com selênio pode representar um sistema alternativo para fornecer Se na dieta humana, via nutrição mineral de plantas. Essa técnica consiste na aplicação, via solo ou foliar, de fertilizantes contendo o mineral, aumentando desta forma sua concentração nos alimentos

(ALFTHAN *et al.*, 2015; NASCIMENTO, 2018). No campo da saúde pública as estratégias de biofortificação podem se basear no próprio alimento, e se aplica quando determinado nutriente é deficiente para um grande número de pessoas (COZZOLINO, 2007).

Os principais alimentos a serem biofortificados são aqueles que constituem a base da alimentação da população (INOCÊNCIO, 2014). Nesta perspectiva, o selênio (Se) é listado entre os 22 elementos minerais necessários à dieta humana por entrar na constituição de um conjunto de proteínas que participam ativamente do metabolismo humano, dentre elas a glutatona peroxidase (função antioxidante) e a iodotironina deiodinase (função no metabolismo do hormônio tireoidiano), segundo Duntas e Benvenga (2015) e Ferreira (2016).

No Brasil, em razão dos baixos teores no solo, a concentração de Se em alimentos de origem vegetal é considerada baixa, quando comparada aos padrões internacionais (FERREIRA *et al.*, 2002; NASCIMENTO, 2018). Portanto, estudar a dinâmica da absorção de Se pelas plantas é fundamental para controlar o teor do elemento, buscando reduzir riscos de toxicidade e de deficiência tanto para a planta como para o homem.

Sendo assim, o conhecimento da capacidade de absorção desse mineral pelas plantas é fundamental para fornecer *insights* sobre as dosagens de Se e método de suplementação, a fim de alcançar o teor de Se desejado nos tecidos vegetais, sobretudo na parte área de culturas agrônômicas (PUCCINELLI *et al.*, 2017).

Ensaio de biofortificação e fitoextração já foram realizados em hortaliças como alface, manjeriço e couve-flor, ambas vastamente consumidas no território nacional (MANO; WILKINSON, 2016; FERREIRA, 2016; KOLBERT *et al.*, 2018). Das hortaliças consumidas a nível regional, o jambu (*Acmella oleracea*) é uma planta tipicamente consumida na região amazônica. Caracterizada como uma espécie condimentar e medicinal com alto consumo principalmente na região Norte do Brasil, no preparo de comidas típicas e como fitoterápico, especialmente na culinária paraense, em pratos típicos como o tacacá, vatapá, pato no tucupi, dentre outros, onde são consumidas suas folhas e caule em abundância e ao longo de todo o ano (FARIAS *et al.*, 2010; GUSMÃO; GUSMÃO, 2013).

Homma *et al.* (2011) estimou que o consumo de jambu somente no almoço de domingo da festa religiosa do Círio de Nazaré gira em torno de 600 mil maços da planta. Porém, Homma *et al.* (2011) destacam que enquanto no passado o consumo de jambu ficava restrito a confecção de pratos típicos nas datas festivas como o círio e nas comemorações familiares ou como quitutes, atualmente o seu uso se popularizou também em restaurantes, com a utilização em novos pratos como arroz com jambu (arroz paraense), pizza de jambu, pastel de jambu, bem como na forma “*in natura*” em saladas cruas. Segundo Gusmão e

Gusmão (2013), a quantidade de jambu *in natura* em alguns pratos, pode variar de 30g até 600 g de jambu. Assim, é preponderante a necessidade de se investigar a capacidade desta planta de captar e distribuir selênio, visando à promoção de melhoramento no cultivo dessa hortaliça amazônica, através da inserção balanceada de espécies minerais essenciais para a população.

Nesse contexto, a pesquisa torna-se fundamental as surgir a seguinte questão: o jambu possui capacidade de absorver e translocar o selênio? E, sendo assim, esta planta pode ser biofortificada com doses crescentes do elemento? A hipótese que nasce dessa questão é de que o jambu pode ser biofortificado com doses crescentes de selênio e conseqüentemente possui capacidade de absorver e distribuir esse elemento. Diante o exposto, o objetivo deste capítulo de tese é avaliar o potencial do jambu de ser biofortificado com doses crescentes de selênio, por meio de índices tradicionais e por indicadores de desempenho multivariados das dimensões de crescimento, massa, acúmulo de nutrientes, concentração de nutrientes e indicador geral do comportamento do jambu suplementado com Se.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Procedimentos experimentais

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, localizada na Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), no período de fevereiro a março do ano de 2020 com plantas de Jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen), da variedade flor amarela.

O clima da área onde ocorreu o experimento é equatorial quente e úmido, enquadrado na categoria Af de Koopen (KOTTEK *et al.*, 2006). Durante a condução do experimento foram realizadas medições de umidade relativa do ar e temperatura por meio de termohigrômetro instalado na casa de vegetação. A média de umidade e temperatura foram de 70% e 30° C respectivamente.

Do banco de germoplasma da UFRA, foram obtidas as sementes do Jambu para o experimento. Estas sementes foram colocadas em bandejas de poliestireno de 128 células preenchidas com fibra de coco. Após germinação, as mudas foram regadas com solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) com 25% de força iônica, composta por 1 mL.L⁻¹ de NH₄NO₃, 4 mL.L⁻¹ de KNO₃, 5 mL.L⁻¹ de Ca(NO₃)₂, 2 mL.L⁻¹ de MgSO₄, 1 mL.L⁻¹ de Fe-EDDHA e 1 mL.L⁻¹ de Solução micronutrientes.

O desbaste das mudas foi realizado com 7 dias de germinação, permanecendo uma muda por célula. Passados 21 dias da germinação, as mudas foram transplantadas para vasos de contendo sílica moída inerte. Após o transplante as mudas foram submetidas a aclimação com solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) com 50% de força iônica colocada em cada vaso. Depois deste período de aclimação, as plantas foram submetidas aos tratamentos. Cada vaso, com capacidade de 2 L, permaneceu com uma planta até o final do experimento.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, composto por seis tratamentos, com cinco repetições, perfazendo um total de trinta plantas. Foram utilizadas cinco doses de selênio (1, 2, 3, 4 e 5 mg.L⁻¹), aplicadas na forma de selenato de sódio (Na₂SeO₄) e o controle (PUCCINELI *et al.*, 2017). Para manter a oxigenação das soluções nutritivas nos vasos, os mesmos foram drenados no final da tarde e a solução repostada no início da manhã. Este procedimento foi realizado diariamente até o final do experimento. A fim de preservar a concentração da solução nutritiva, foi monitorado pH de cada vaso com um phmetro modelo GroLine – HI98118 da marca HANNA. Semanalmente as soluções foram renovadas e a água perdida por evaporação resposta diariamente. Cinquenta dias após a germinação foi realizada a colheita de todas as plantas. Isto gerou a base de dados para a análise descritiva e modelagem estatística para gerar os resultados do trabalho.

3.2.2 Análises laboratoriais

3.2.2.1 Análise Biométrica

Após a colheita, foram medidas as seguintes variáveis biométricas: i) Altura das Plantas (AP) - utilizando régua milimetrada, medindo a partir do coleto até o ápice; ii) Diâmetro do Caule (DC) - utilizando paquímetro, medindo o caule a 0,5 cm do substrato e iii) Número de inflorescência (NI) - contagem das inflorescências totais emitidas pela planta.

Para a determinação das variáveis Massa Seca de Folha (MSF), Massa Seca de Caule (MSC), Massa Seca de Inflorescência (MSI) e Massa Seca de Raiz (MSR), as plantas foram limpas com água deionizada e secas. Posteriormente as partes das plantas foram separadas, colocadas em sacos de papel e levadas para a estufa a 65°C por 48 horas, até as plantas atingirem pesos constantes. Após as 48 horas as partes das plantas foram retiradas e pesadas em balança de precisão, conforme Sampaio *et al.* (2020).

3.2.2.2 Análises químicas

As amostras de folha, caule, inflorescência e raiz do jambu, após secagem foram moídas em gral de porcelana. Posteriormente foi retirada uma alíquota de 0,25 g de cada parte da planta e colocada em tubo de teflon a adicionado 4,0ml de HNO₃ a 7mol.L⁻¹, 2 ml de H₂O₂ (30% mm⁻¹) e 2 ml de água ultrapura, ficando a solução em repouso por uma hora.

Após o repouso, as amostras foram colocadas para digestão completa em um digestor de amostras por micro-ondas. A rampa de digestão consistiu em três passos: subida da temperatura de 0 a 180°C em 10 minutos a 800w, permanência da temperatura de 180°C por 20 minutos e ventilação por 50 minutos (PEREIRA JÚNIOR; DANTAS, 2016). Após a digestão as amostras foram filtradas e avolumadas para 50 ml com água deionizada.

O conteúdo de potássio (K), magnésio (Mg), cálcio (Ca), ferro (Fe), zinco (Zn) e Manganês (Mn) nas amostras de folha, caule, inflorescência e raiz do jambu foram determinadas por espectrofotometria de absorção atômica Agilent AA 200. O conteúdo de Selênio (Se) nas amostras de folha, caule, inflorescência e raiz do jambu foram determinadas por espectrofotometria de absorção atômica com forno de grafite Varian AA 240 Z, no laboratório de Qualidade de Águas da Amazônia da Universidade do Estado do Pará (UEPA).

3.2.3 Índice de translocação, tolerância e uso eficiente dos nutrientes

Para quantificar a habilidade de crescimento da *Acmella oleracea* na presença de Se, foram determinados os índices de translocação (Tr), tolerância (It), acúmulo (Ac) e Eficiência de uso do nutriente (Uen), segundo metodologias propostas por Siddiqui e Glass (1981) e Swiader, Chyan e Freiji (1994), utilizando as seguintes equações:

$$Ac = \frac{\text{Concentração do elemento na parte da planta (mg.kg}^{-1})}{\text{parte da planta (g)}} \times \text{Massa seca na parte da planta (g)} \quad (10)$$

$$Tr = \frac{\text{Acúmulo do elemento na parte da planta (g vaso}^{-1})}{\text{Acúmulo do elemento na parte da planta (g vaso}^{-1}).100} \quad (11)$$

$$IT = \frac{\text{Massa seca da planta na dose de interesse (g)}}{\text{Massa seca do controle (g)}} \quad (12)$$

$$Eun = \frac{(\text{Massa seca total produzida})^2}{\text{Conteúdo total de nutrientes na planta}} \quad (13)$$

Na construção dos indicadores representativos do conjunto das variáveis definidoras das dimensões: Concentração de Nutrientes – Icn incorporou as variáveis conteúdo de K, Mg, Ca, Fe, Zn e Mn), Acúmulo de Nutrientes – Ian (incorporou as variáveis acúmulo de K, Mg, Ca, Fe, Zn e Mn), crescimento da planta – Ic (captou o efeito das variáveis massa seca de folha, massa seca de caule, massa seca de inflorescência e massa seca de raiz) e acúmulo de massa da planta (Im) e Geral (Ig) da pesquisa, contemplando o conjunto de todas as variáveis explanatórias, todas as componentes foram consideradas para que fosse contemplada 100% da variância total da massa de dados. Os vetores de coeficientes associados a cada componente principal foram estimados com a aplicação do Software SPSS, versão 25 (IBM, 2018).

3.2.3.1.1 Construção dos Indicadores Estatísticos

Os indicados das dimensões ICn, IAn, Ic, Im e Ig, estimados conforme Santana e Santana (2004), diferentemente das análises tradicionais de experimentos, que trabalham com modelos individuais para cada variável dependente, ampliam o escopo da análise para incorporar todos os efeitos captados pelo conjunto de variáveis que representam cada dimensão analisada. Assim, na dimensão definida como crescimento da planta, ao invés de se observar parcialmente a influência das dosagens de selênio nas variáveis “altura da planta, diâmetro do caule e número de inflorescências”, construiu-se o indicador Ic para representar o comportamento das três variáveis no seu conjunto. Com isto, capta-se de forma completa os efeitos causados à planta, observados em cada variável.

Seguindo o modelo proposto por Santana e Santana (2004), os pesos associados ao conjunto de componentes relacionado às dimensões Conteúdo de nutrientes (seis componentes), acúmulo de nutrientes (seis componentes), de crescimento (três componentes) de acúmulo de massa (três componentes) e geral (18 componentes), foram estimados com a aplicação do software SPSS 25 (IBM, 2018), e obtidos da seguinte forma (SANTANA; SANTANA, 2004; SANTANA, 2005):

- i) estima-se o vetor com a participação relativa dos autovalores λ ($\lambda_{kj}/\sum\lambda_k$);
- ii) estimam-se os coeficientes da matriz de valores absolutos (a_{kj}) dos autovetores de cada componentes transformados;
- iii) estimam-se os coeficientes relativos da matriz de autovetores ($a_{kj}/\sum a_k$);
- iv) define-se a combinação linear das variáveis descritoras e faz-se a multiplicação matricial para estimar os pesos θ como nas Equações 16 e 17.

$$\theta_{j(kx1)} = \left(\frac{a_{kj}}{\sum a_k} \right)_{(kxk)} \cdot \left(\frac{\lambda_k}{\sum \lambda_k} \right)_{(kx1)} \quad (16)$$

Com

$$\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_p = 1 \quad (j = 1 - ICn, 2 - IAn, 3 - Ic, 4 - Im, 5 - Ig) \quad (17)$$

Onde k é o número de componentes de cada dimensão j.

Portanto, tem-se o modelo matemático utilizado para estimar os pesos associados às variáveis descritoras do comportamento da planta, tendo como referência as dimensões relacionadas à concentração de nutrientes, acúmulo de nutrientes, crescimento, acúmulo de massa e geral.

Por fim, cada indicador é obtido pela multiplicação do vetor de pesos θ pelos valores das variáveis explanatórias relacionadas aos aspectos fisiológicos, de crescimento, de acúmulo de massa e geral INc, IAn, Ic, Im e Ig.

3.2.3.2 A análise de regressão

A especificação do modelo de regressão múltipla utilizado para representar o fenômeno estudado nesta tese, envolvendo os efeitos das doses de selênio sobre o conteúdo e acúmulo de nutrientes, crescimento e acúmulo de massa nas plantas de jambu, e comportamento geral do jambu, foi definido no sistema de equações abaixo:

$$ICn = b_{10} + b_{11}D_s + b_{12}D_s^2 + u_1 \quad (18)$$

$$IAc = b_{20} + b_{21}D_s + b_{22}D_s^2 + u_2 \quad (19)$$

$$Ic = b_{30} + b_{31}D_s + b_{32}D_s^2 + u_3 \quad (20)$$

$$Im = b_{40} + b_{41}D_s + b_{42}D_s^2 + u_4 \quad (21)$$

$$Ig = b_{50} + b_{51}D_s + b_{52}D_s^2 + u_5 \quad (22)$$

Em que:

ICn é o Indicador conteúdo de nutrientes da planta;

IAn é o Indicador acúmulo nutrientes da planta;

Ic é o Indicador de crescimento da planta;

Im é o Indicador de massa da planta;

Ig é o Indicador geral da planta;

D_s representa as doses de selênio com resposta linear;

D_s^2 as doses de selênio com resposta quadrática (controle, 1mg.L^{-1} , 2mg.L^{-1} , 3mg.L^{-1} , 4mg.L^{-1} e 5mg.L^{-1});

b_{i0} são os interceptos das equações ($i = 9, 10, 11, 12, 13$);

b_{ij} são os parâmetros associados às variáveis das equações;

u_i são os termos de erro aleatórios das equações.

Os dados de conteúdo e acúmulo de Se (folha, caule, inflorescência, raiz e parte aérea), translocação, tolerância, uso eficiente de nutrientes, assim como os indicadores foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste Skott-Knott (SK), $p < 0,05$, com a utilização do software R versão 3.5.2 (R CORE TEAM, 2018).

3.3 Resultados

Os resultados do experimento de biofortificação do jambu por selênio mostram que o aumento das concentrações de Se na solução nutritiva induziu ao incremento no conteúdo de Se em todas as partes da planta. Os maiores valores de Se foram encontrados nas folhas de jambu ($400,74 \pm 35,50 \mu\text{g.kg}^{-1}$), quando submetidas a concentração de 5mg.L^{-1} na solução nutritiva, com diferença significativa para as demais doses (Tabela 3).

Destaca-se que houve aumento no conteúdo de Se absorvido pelo caule, inflorescência e raiz, porém menores estatisticamente que o selênio absorvido pelas folhas (Tabela 3).

Quando se soma os teores de Se na folha, caule e inflorescência obtém-se o teor de Se na parte aérea da planta. Esta variável é importante pois vai determinar conteúdo total do elemento que será consumido. Nota-se que na dose de 5mg.L^{-1} de Se em solução nutritiva a planta armazena $641,74 \pm 24,02 \mu\text{g.kg}^{-1}$ de Se na parte área, já a dose de 1mg.L^{-1} produziu conteúdo de $230 \pm 17,40 \mu\text{g.kg}^{-1}$ do elemento na parte aérea da planta.

Assim como nas folhas, o conteúdo de Se na parte aérea cresceu com o aumento das doses, mostrando diferença significativa no conteúdo do elemento na parte aérea da maior para a menor dose. Este comportamento indica a capacidade de captação de Se da solução nutritiva pela planta (Figura 13).

Tabela 3 - Conteúdo médio de selênio em plantas de jambu.

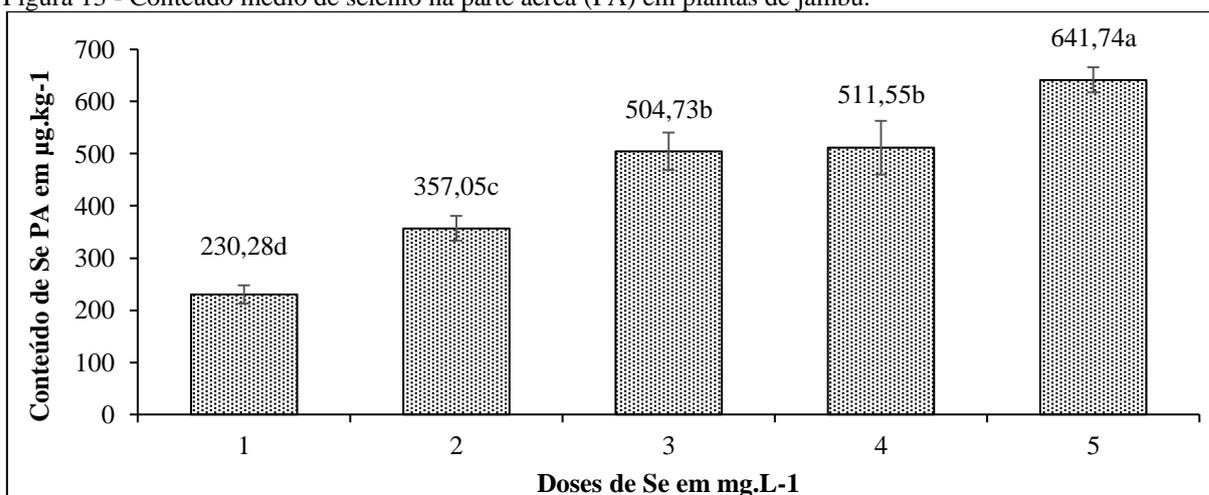
Conteúdo de Se em $\mu\text{g.kg}^{-1}$	Doses de Se em mg.L^{-1}				
	1	2	3	4	5
Folha	166,40 \pm 15,63dA	258,05 \pm 28,13cA	338,35 \pm 22,10bA	329,29 \pm 48,75bA	400,74 \pm 35,50aA
Caule	29,22 \pm 5,75cB	35,03 \pm 2,51cC	41,67 \pm 4,14bC	54,56 \pm 7,66aC	63,05 \pm 10,85aC
Inflorescência	34,66 \pm 7,86dB	63,97 \pm 14,00cB	124,40 \pm 18,45bB	127,68 \pm 11,80bB	177,94 \pm 5,84aB
Raiz	15,79 \pm 2,11dC	23,78 \pm 1,84cC	35,48 \pm 4,17bC	55,32 \pm 6,95aC	61,41 \pm 7,21aC

Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre as doses de Selênio; as letras maiúsculas apontam as diferenças significativas entre as partes da planta, de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

Comportamento similar ao conteúdo de Se pode ser notado em relação ao acúmulo do elemento na planta. Os maiores valores de acúmulo foram determinados nas folhas de jambu com $711,67\pm 67,69$ μg de Se por planta, na dose de 5 mg.L^{-1} de Se aplicado na solução, demonstrando que houve uma maior assimilação de Se a medida que a concentração do elemento foi maior.

Figura 13 - Conteúdo médio de selênio na parte aérea (PA) em plantas de jambu.



Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As barras representam o desvio-padrão; as letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre as doses de Selênio de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

Ainda neste contexto, a parte da planta que acumulou menor quantidade de Se foi a raiz em todas as concentrações administradas. O caule foi a segunda parte da planta que mais acumulou Se, seguido da inflorescência (Tabela 4).

Tabela 4 - Acúmulo médio de selênio em plantas de jambu.

Acúmulo de Se ($\mu\text{g.planta}^{-1}$)	Doses de Se em mg.L^{-1}				
	1	2	3	4	5
Se Folha	324,64 \pm 30,27cA	488,44 \pm 95,19bA	706,1 \pm 75,53aA	662,1 \pm 73,65aA	711,67 \pm 67,59aA
Se Caule	61,87 \pm 16,55cB	75,48 \pm 10,16cB	110,1 \pm 20,11bB	141,3 \pm 20,86aB	132,38 \pm 22,38aB
Se Inflorescência	20,40 \pm 6,99cC	38,46 \pm 10,36bB	73,79 \pm 11,23aB	72,74 \pm 7,38aC	72,65 \pm 9,11aC
Se Raiz	20,96 \pm 3,09bC	28,52 \pm 2,80bB	51,07 \pm 6,42aB	58,32 \pm 11,65aC	53,43 \pm 9,86aC

Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre as doses de Selênio; as letras maiúsculas apontam as diferenças significativas entre as partes da planta, de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

3.3.1 Índice de Translocação (Tr)

A relação, em porcentagem, entre o acúmulo de Se nas partes do jambu e o acúmulo total na planta se dá pelo índice de translocação (Tr). Como mostra a tabela 5, houve grande eficiência na translocação do Se da raiz para a parte área da planta, sobretudo nas folhas que tiveram a capacidade de translocar mais de 75% do Se absorvido, sobretudo na dose de 2 mg.L^{-1} . Em todas as concentrações de Se administradas na solução nutritiva, ocorreu forte translocação, porém deve-se destacar as doses de 1, 2 e 3 mg.L^{-1} foram as responsáveis pela maior mobilidade de Se da raiz para a folha, com diferença significativa para as doses de 4 e 5 mg.L^{-1} . O caule, por sua vez, foi a parte do jambu depois da folha, que mais translocou Se com valor máximo de 15,16 \pm 2,30 % na dose de 4 mg.L^{-1} . Acompanhado a translocação de Se no caule, a inflorescência mostrou valor máximo na dose de 3 mg.L^{-1} , todavia não diferindo estatisticamente das doses de 4 e 5 mg.L^{-1} para esta parte da planta. A raiz por sua vez não obteve diferença significativa na translocação de Se com o aumento das doses, porem em relação as partes da planta, foi a que obteve menor valor no índice de translocação.

3.3.2 Índice de tolerância (It)

O índice de tolerância relaciona a massa seca da planta na dose de interesse com a massa seca do controle. Neste caso os resultados apontam para um aumento do significativo da tolerância do jambu frente ao Se até a dose de 3 mg.L^{-1} (1,49 \pm 0,24 g.planta^{-1}), demonstrando que houve um ganho de massa seca em relação ao controle (1,00 g.planta^{-1}). A planta, todavia começa a mostrar sinais de redução na produção de massa seca a partir da dose de 4 mg.L^{-1} (1,37 \pm 0,10 g.planta^{-1}), com diferença significativa para a dose de 3 mg.L^{-1} . Na dose de 5 mg.L^{-1} o índice de tolerância se mostrou menor que em todas demais dose, mas ainda assim maior que o controle, demonstrando que em 5 mg.L^{-1} (1,13 \pm 0,08 g.planta^{-1}) a

planta ainda oferece maior ganho de massa com a suplementação de Se. Porém é importante destacar que em 3 mg.L⁻¹ a planta mostrou seu maior desempenho (Figura 14).

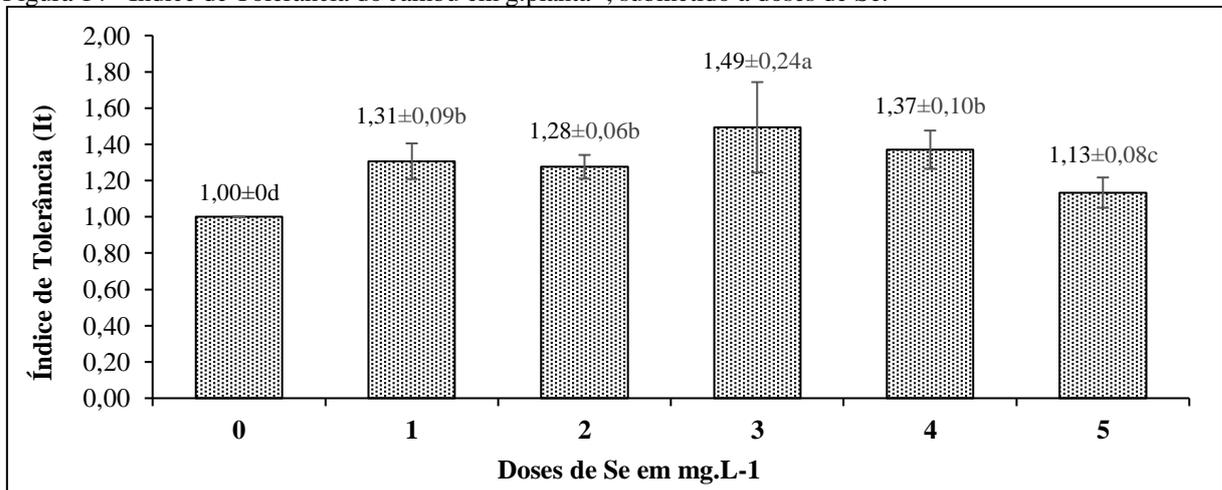
Tabela 5 - Índice de Translocação Se em plantas de jambu.

(Tr) de Se (em %)	Doses de Se em mg.L ⁻¹				
	1	2	3	4	5
Folha	75,84±2,49aA	77,09±3,72aA	75,03±1,30aA	70,75±3,80bA	73,29±3,90bA
Caule	14,41±3,47aB	12,05±2,02bB	11,62±1,10bB	15,16±2,30aB	13,64±2,05aB
Inflorescência	4,83±1,86bC	6,26±2,09bC	7,86±1,10aC	7,82±1,00aC	7,52±1,13aC
Raiz	4,90±0,69aC	4,57±0,67aC	5,46±0,81aC	6,25±1,32aC	5,52±1,14aC

Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre as doses de Selênio; as letras maiúsculas apontam as diferenças significativas entre as partes da planta, de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

Figura 14 - Índice de Tolerância do Jambu em g.planta⁻¹, submetido a doses de Se.



Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As barras representam o desvio-padrão. As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre as doses de Selênio de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

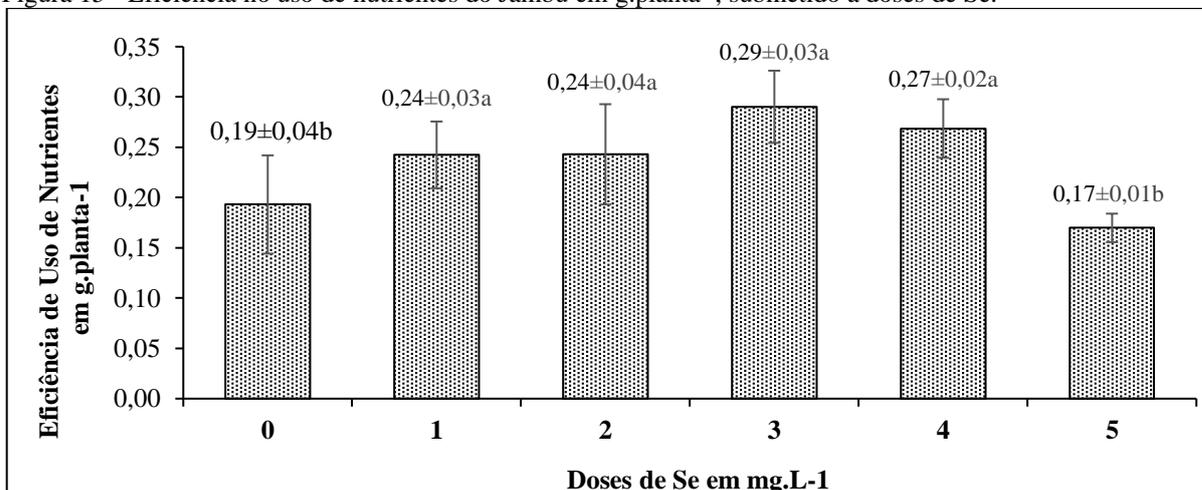
3.3.3 Índice do uso eficiente dos nutrientes

Quando se analisa o uso eficiente de nutrientes, se relaciona a massa seca total produzida pela planta em relação ao conteúdo total de nutrientes. Neste estudo, pode-se observar que à medida que se implementou as doses de Se na solução nutritiva, ocorreu uma maior eficiência na absorção de nutrientes com concomitante aumento do ganho de massa (Figura 15).

Esse comportamento foi detectado nas doses de 1 ($0,24±0,03$ g.planta⁻¹), 2 ($0,24±0,04$ g.planta⁻¹), 3 ($0,29±0,03$ g.planta⁻¹) e 4 mg.L⁻¹ ($0,27±0,02$ g.planta⁻¹), não havendo diferença significativa no uso eficiente de nutrientes entre as doses, porém estas diferindo do controle ($0,19±0,04$ g.planta⁻¹). No entanto, a dose de 5 mg.L⁻¹ mostrou menor eficiência no uso de

nutrientes com $0,17 \pm 0,01 \text{ g.planta}^{-1}$, diferindo das demais doses e do controle, indicando uma redução significativa do uso de eficiente de nutrientes a partir de 5 mg.L^{-1} na solução nutritiva.

Figura 15 - Eficiência no uso de nutrientes do Jambu em g.planta^{-1} , submetido a doses de Se.



Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

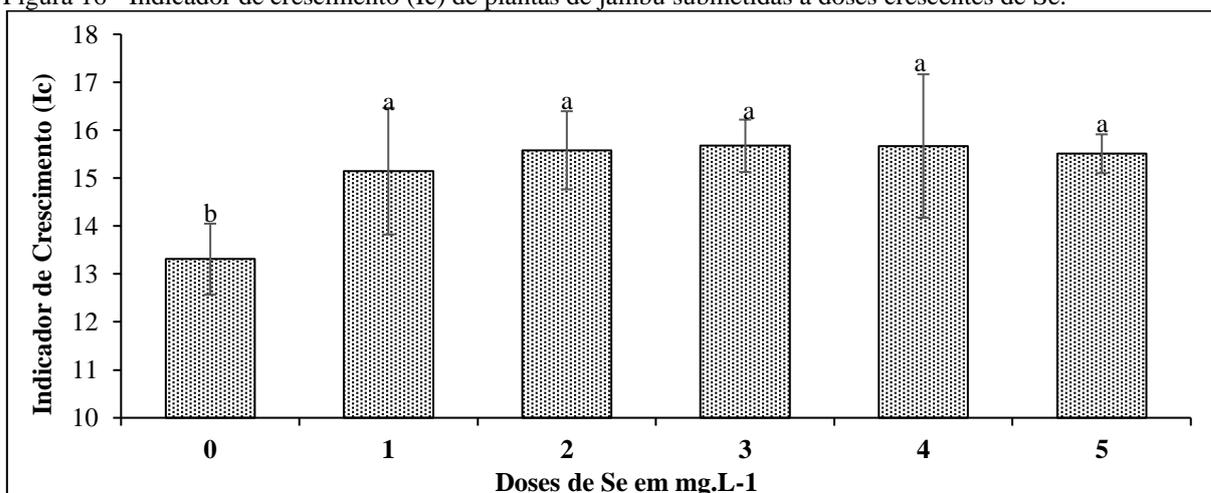
Nota: As barras representam o desvio-padrão; as letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre as doses de Selênio de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

3.3.4 Indicadores multivariados

Os indicadores multivariados conseguem captar de forma integrada o comportamento geral da planta quando submetida a doses crescentes de Se, relacionado causa e efeito no comportamento geral da planta.

O indicador de crescimento (Ic) agrupa as variáveis altura, diâmetro do caule e número de inflorescência e mostra que as plantas suplementadas com Se cresceram significativamente em relação as plantas controle, evidenciando que a presença do elemento na solução nutritiva foi indutor do aumento das variáveis estudadas e benéfico para o crescimento da planta. Todavia ao se observar conjuntamente as variáveis de crescimento, estas não mostram efeito significativo entre as doses de Se, somente em relação ao controle (Figura 16).

Figura 16 - Indicador de crescimento (Ic) de plantas de jambu submetidas a doses crescentes de Se.



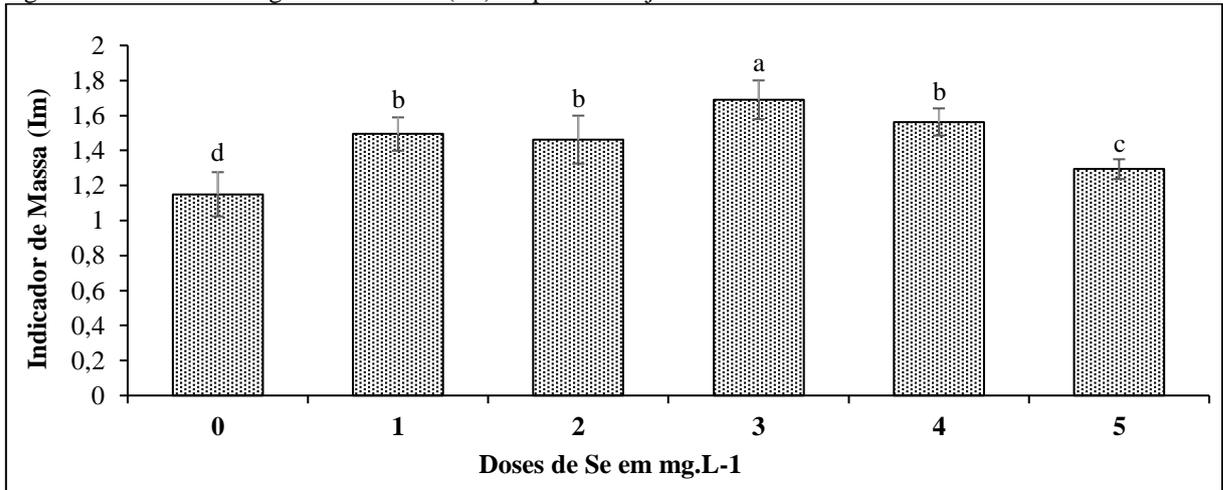
Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As barras correspondem ao desvio padrão, letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre as doses de Selênio de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

O Indicador de ganho de massa (Im) traz informações a respeito das variáveis massa seca de folha, caule, inflorescência e raiz. Pode-se observar que a dose de 3 mg.L⁻¹ foi a que provocou maior ganho de massa no jambu, com diferença significativa para as demais doses e para o controle.

As doses de 1, 2 e 4 mg.L⁻¹ não mostraram diferença significativa entre si, mas diferiram da dose de 5 mg.L⁻¹ e do controle. A dose de 5 mg.L⁻¹ apresentou menor ganho de massa em relação as demais doses, porém maior que o controle (Figura 17). O comportamento do indicador mostra que houve um incremento no ganho de massa do jambu com o aumento das doses de Se até 3 mg.L⁻¹. Posteriormente o comportamento da planta é de redução gradativa do ganho de massa a medida que se aumenta a concentração de Se na solução nutritiva.

Figura 17 - Indicador de ganho de massa (Im) de plantas de jambu submetidas a doses crescentes de Se.



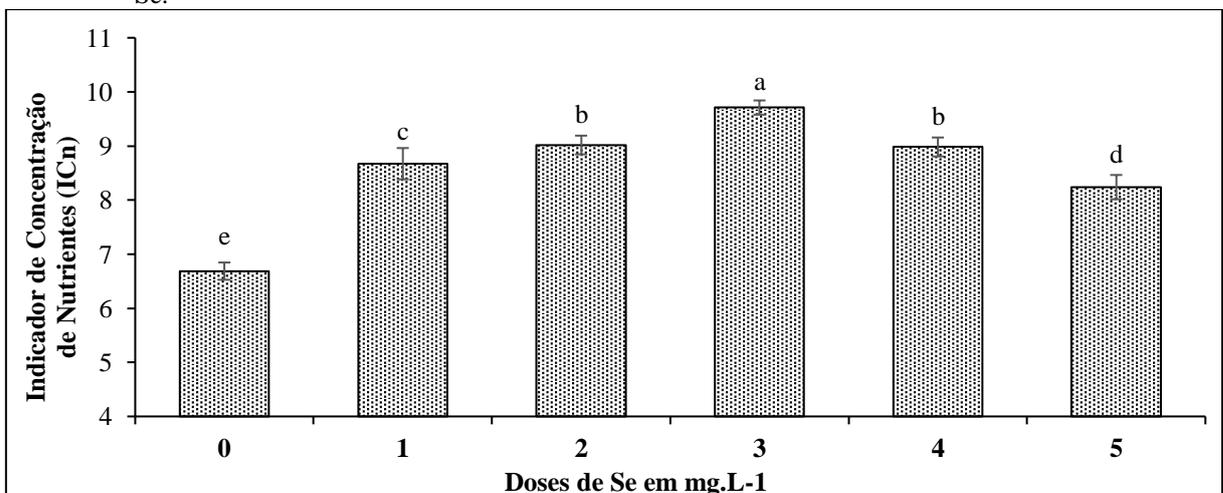
Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As barras correspondem ao desvio padrão, letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre as doses de Selênio de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

Para captar a concentração de K, Mg, Ca, Fe, Zn e Mn foi construído o indicador da concentração de nutrientes (ICn), o qual mostra o mesmo comportamento do indicador de ganho de massa, com planta demonstrando maior eficiência quando submetida a dose de 3 mg.L⁻¹ de Se, havendo redução na concentração de nutrientes com o aumento das doses.

Destaca-se que o valor do indicador na dose de 5 mg.L⁻¹ foi maior significativamente que o controle, demonstrando que apesar da planta reduzir a concentração de nutrientes em seus tecidos, esta dose ainda promove maior valor no indicador e por conseguinte maior conteúdo de nutrientes absorvidos que plantas não suplementadas com 5 mg.L⁻¹ (Figura 18).

Figura 18 - Indicador de concentração de nutrientes (ICn) de plantas de jambu submetidas a doses crescentes de Se.

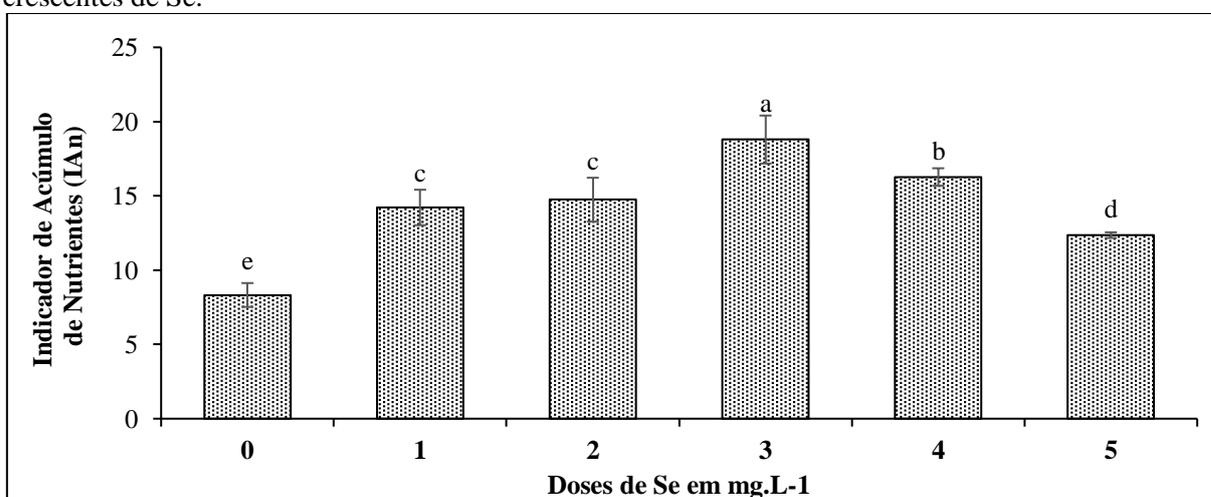


Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As barras correspondem ao desvio padrão, letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre as doses de Selênio de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

O comportamento das plantas de jambu frente ao acúmulo dos nutrientes K, Mg, Ca, Fe, Zn e Mn foi obtido através do indicador de acúmulo de nutrientes (IAN). Este indicador, assim como o ICn mostra que a dose de 3 mg.L⁻¹ foi a que promoveu maior acúmulo de nutrientes na planta, havendo redução do acúmulo a medida que as doses maiores foram fornecidas para planta. Salienta-se, porém, a dose de 5 mg.L⁻¹ obteve maior valor para o IAN que o controle, demonstrando que mesmo nesta dose a planta apresenta maior desempenho no acúmulo de nutrientes que plantas não suplementadas com Se (Figura 19).

Figura 19 - Indicador de acúmulo de nutrientes (IAN) de plantas de jambu submetidas a doses crescentes de Se.

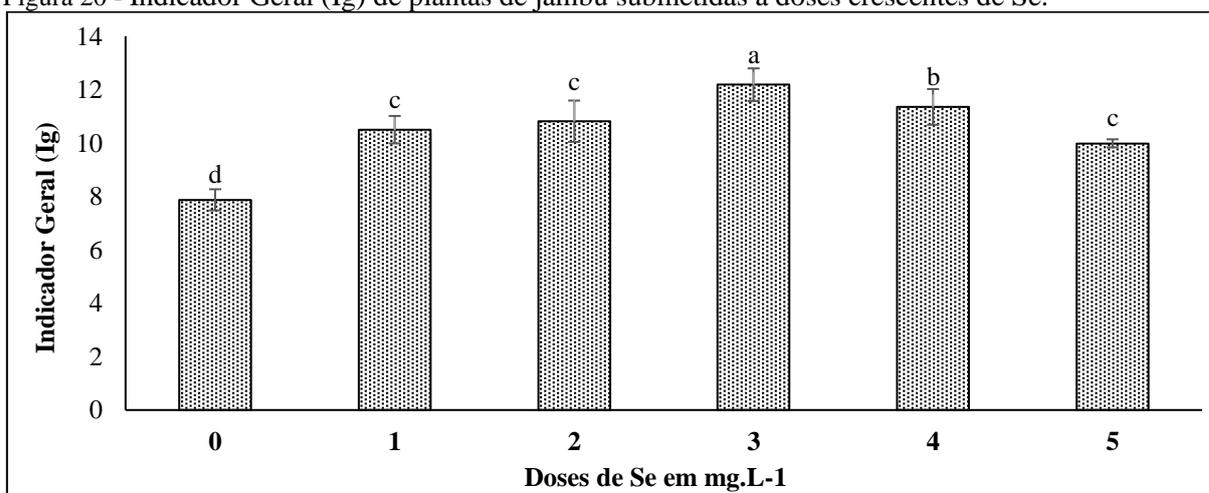


Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As barras correspondem ao desvio padrão, letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre as doses de Selênio de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

Deve-se destacar o comportamento geral do jambu ao ser biofortificado com Se, captado pelo indicador geral (Ig). Assim como os demais indicadores mostraram a maior eficiência da planta na dose de 3mgL⁻¹, o Ig evidencia a diferença significativa do conjunto de todas as variáveis explanatórias estimuladas pelo Se e demonstra o modelo adequado de biofortificação desta hortaliça. Não obstante, à medida que seu aumentou a dose do elemento na solução, houve perda de rendimento nas variáveis estudadas, indicando assim, a redução de rendimento e um possível limite de otimização das variáveis estudadas induzido pelo Se (Figura 20).

Figura 20 - Indicador Geral (Ig) de plantas de jambu submetidas a doses crescentes de Se.



Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As barras correspondem ao desvio padrão, letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre as doses de Selênio de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

Com o intuito de calcular a concentração ideal biofortificação do jambu com Se, foi realizada a análise de regressão para cada indicador multivariado e estes resultados estão expressos na tabela 6. Como pode ser observado, a dose ideal para o indicador de crescimento foi de 3,36 mg.L⁻¹ de Se, já para o máximo potencial de ganho de massa a dose adequada, segundo o modelo de regressão foi de 2,77 mg.L⁻¹.

Quanto a concentração de nutrientes valores da ordem de 2,92 mg.L⁻¹ suplementados na solução nutritiva garantiriam uma maior resposta para o indicador e o indicador de acúmulo de nutrientes mostrou seu ponto máximo em 2,90 mg.L⁻¹ de Se. Nota-se que para todos modelos obtidos, o comportamento dos dados se ajustou ao modelo polinomial de 2ª ordem com ponto de inflexão entre 2,77 a 3,36 mg.L⁻¹, indicando um comportamento binário da planta, com o Se provocando efeito benéfico até a dose de aproximadamente 3 mg.L⁻¹ e posteriormente o desempenho da planta começa a sofrer redução.

Tabela 6 - Análise de regressão dos indicadores multivariados do experimento de biofortificação.

Indicadores Multivariados	Equação de regressão dos indicadores	Concentração ideal de Se em mg.L ⁻¹	R ² ajustado	p-Valor
Indicador de Crescimento (Ic)	$Ic = -0.2098D^2 + 1.4108D + 13.5439$	3.36	0.4073	<0,0003
Indicador de Massa (Im)	$Im = -0.0615D^2 + 0.3408D + 1.1543$	2,77	0.6482	<0,0001
Indicador de Concentração de Nutrientes (ICn)	$ICn = -0.3204D^2 + 1.8703D + 6.8124$	2.92	0.9152	<0,0001
Indicador de Acúmulo de Nutrientes (IAN)	$IAN = -1.0929D^2 + 6.3319D + 8.3066$	2.90	0.8210	<0,0001
Indicador Geral (Ig)	$Ig = -0.4383D^2 + 2.6058D + 7.9565$	2,98	0,8142	<0,0001

Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: ** significativo a 1% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade (teste F); D=dose; D²=dose ao quadrado.

Esse efeito binário também é captado pelo indicador geral (Ig) que mostra o comportamento agrupado de todas as variáveis explanatórias analisadas e traduz de forma sinérgica o comportamento do jambu biofortificado (Figura 20). Percebe-se que a planta tem seu desenvolvimento otimizado até a concentração de $2,98 \text{ mg.L}^{-1}$, valor obtido através do modelo matemático do indicador geral (Tabela 6). Notadamente o jambu começa a reduzir seu desempenho à medida que o Se aumenta na solução, indicando que doses maiores que $2,98 \text{ mg.L}^{-1}$ começam a afetar desenvolvimento da planta.

3.4 Discussões

Os resultados mostraram que o teor de Se na planta, sobretudo na folha, inflorescência e caule (parte aérea) foi maior à medida que se aumentou as doses solução nutritiva, corroborando com os resultados expostos por Ramos *et al.* (2011) que mostra a influência significativa no teor e transporte de Se por cultivares de alface submetidas doses crescentes de Se na forma de selenato e Puccinelli *et al.* (2017) que destaca a eficiência na absorção e translocação de Se em plantas de manjeriço.

Analogamente ao aumento crescente do teor de Se na planta, o acúmulo do elemento também foi maior à medida que se aumentou as doses na solução nutritiva, fato que pode estar relacionado com a eficácia no enriquecimento de Se em plantas quando submetidas a biofortificação com selenado, como evidenciam também as pesquisas realizadas por Sindelárova *et al.* (2015) em brócolis e Silva *et al.* (2020) em rabanete.

O índice de translocação (Tr) mostrou grande eficiência para avaliar a captação e partição do elemento no jambu, com as folhas armazenando mais de 70% do selênio absorvido nas primeiras doses aplicadas. Todavia nas doses maiores, o Tr mostrou que a planta apresentou redução no seu potencial de translocação. Segundo White (2016), o Se e o S possuem grande similaridade química, competindo por rotas de absorção. Em baixas concentrações, o Se atua positivamente nas enzimas oxido-redutase com glutathione peroxidase, catalase, superóxido dismutase e ascorbato peroxidase, reduzindo as atividades de espécies reativas de oxigênio (WHITE *et al.*, 2004).

Supõe-se que, com o aumento da concentração de Se na solução nutritiva, este pode ter promovido uma menor absorção do S, substituindo o mesmo em aminoácidos sulfurados, glutathione e outros compostos do grupo sulfidrílica, provocando a redução à produção de massa seca e o crescimento da planta, como percebido neste estudo. Este comportamento foi descrito

por White (2016), e mostra a redução na capacidade de translocação em algumas plantas com o aumento da concentração de Se no meio. Segundo Epstein e Bloom (2006), a deficiência de S provoca a redução e lentidão no crescimento da planta, sintomas detectados neste estudo, quando observadas as plantas suplementadas com 5 mg.L^{-1} de Se.

A presença de Se em doses acima do que uma determinada cultura pode suportar, sobretudo em espécies não acumuladoras do metal, pode influenciar no balanço nutricional de plantas, afetando o crescimento e produção. Através do índice tolerância (It), este estudo mostra que o jambu tolera até 5 mg.L^{-1} de Se na solução nutritiva, porém já mostra sinais de redução do uso eficiente de nutrientes (Uen), sendo a dose ideal de $2,98 \text{ mg.L}^{-1}$ calculada pelo indicador geral (Ig). Como destacado anteriormente o Se e o S competem pela mesma rota de absorção e dependendo da concentração de Se na solução nutritiva, este vai ser mais absorvido, substituindo o S na cisteína e metionina, formando selenocisteína e selenometionina, alterando a síntese e função de aminoácidos e proteínas (ZHU *et al.*, 2009; RIOS *et al.*, 2008). Portanto este estudo mostra efetivamente que o jambu irá obter maior eficiência nutricional com Uen na ordem de $0,29 \pm 0,03 \text{ g.planta}^{-1}$ e um It na ordem de $1,49 \pm 0,24 \text{ g.planta}^{-1}$ com $2,98 \text{ mg.L}^{-1}$ de Se em solução.

As plantas ao serem submetidas a presença de substância, quer sejam nutrientes, elementos benéficos ou tóxicos, responderão de acordo com o nível de exposição e forma de assimilação a essas substâncias. Diversas variáveis são normalmente são determinadas para indicar o efeito benéfico ou deletério de substância em plantas, dentre eles pode-se citar variáveis biométricas, fisiológicas, bioquímicas, químicas, entre outras, porém em muitos estudos, estas variáveis são compartimentalizadas para individualmente se avaliar cada condição da planta. Neste estudo além de se analisar variáveis de forma compartimentalizada, procurou-se entender o comportamento global do jambu frente ao selênio e qual melhor dose do elemento em solução nutritiva através de análise multivariada, com a criação de indicadores.

Assim como os índices de Translocação (Tr), Tolerância (It) e Uso eficiente de nutrientes (Uen), o comportamento do indicador de crescimento (Ic) mostrou que a presença do Se induziu uma melhora nas variáveis que o compõe, apontando para um comportamento polinomial da curva de crescimento com melhor dose ajustada para $3,36 \text{ mg.L}^{-1}$ de Se na solução nutritiva. De acordo com o modelo matemático proposto para este indicador, o crescimento do jambu será mais bem otimizado na referida dose, porém em doses superiores haverá redução na capacidade de crescimento da planta, fato que estar relacionado a um duplo efeito do Se que em pequenas doses ajuda no combate espécies reativas de oxigênio, mas em

doses elevadas interfere no metalismo do S e na substituição de aminoácidos e síntese proteica (WHITE *et al.*, 2004; WHITE, 2016).

O indicador de massa (Im) mostra claramente como as doses de Se influenciaram no ganho de massa seca da planta. Assim como o Ic, o Im apresentou comportamento binário, com aumento na eficiência de ganho de massa até a dose de $2,77 \text{ mg.L}^{-1}$ de Se. Com o aumento da concentração do elemento na solução, ocorreu a redução de eficiência no ganho de massa, indicando possivelmente efeito tóxico para a planta. Esse comportamento pode estar relacionado com a capacidade que o jambu possui de captar os nutrientes na solução. Como visto anteriormente pelo índice Uen, doses próximas de 3 mg.L^{-1} de Se produzem maior absorção de nutrientes, fato corroborado pelos indicadores de concentração (ICn) e acúmulo de nutrientes (IAN) que mostram valores de $2,90 \text{ mg.L}^{-1}$ e $2,92 \text{ mg.L}^{-1}$ respectivamente como doses ideais para a maior concentração e acúmulo de nutrientes. Ainda de forma análoga aos índices de Uen e It, bem como aos indicadores de crescimento e massa, os indicadores ICn e IAN apresentam comportamento polinomial, redução na concentração e acúmulo de nutrientes à medida que se aumenta as doses de Se.

Ainda no tange a avaliação dos indicadores, o indicador geral (Ig), apresenta comportamento similar aos demais indicadores e índices e mostra que a dose ideal para o melhor desenvolvimento do jambu frente ao selênio é $2,98 \text{ mg.L}^{-1}$. Valores acima deste podem fazer com que a planta reduza seu potencial de crescimento.

De forma análoga a este estudo, tem-se a pesquisa desenvolvida por Kolbert *et al.* (2018) e mostra que a maioria das culturas tolera no máximo de 5 mg.kg^{-1} de Se em seus tecidos. Ainda segundo este autor, os principais efeitos tóxicos do Se é a peroxidação lipídica e modificação no potencial redox da célula. Em algumas culturas, aumento até 100 mg.L^{-1} em solução nutritiva provocou a drástica redução de clorofila, carotenóides e na biomassa seca em mudas de arroz e redução de 90% da concentração de clorofila e carotenoides em feijão caupi (MOSTOFA *et al.*, 2017; REIS *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2018). No caso do estudo em tela, os modelos multivariados e os índices mostram que a faixa de biortificação para o jambu vai de $2,77 \text{ mg.L}^{-1}$ a $3,36 \text{ mg.L}^{-1}$, com valor ideal de suplementação por Se na ordem de $2,98 \text{ mg.L}^{-1}$ em solução nutritiva.

É importante salientar que o Se é um elemento essencial no metalismo humano e o consumo de alimentos fortificados pode exercer papel de suavizar efeitos de intoxicação por metais pesados, além de atuar para prevenir câncer e doenças cardiovasculares (PRAUCHNER, 2014; NEWMAN, *et al.* 2019). Todavia o Se pode vir a ser tóxico em concentrações acima da exigência nutricional de humanos. Para a dieta humana o

recomendado é de $40\mu\text{g}\cdot\text{dia}^{-1}$ podendo se ingerir até $400\mu\text{g}\cdot\text{dia}^{-1}$. Valores abaixo de $40\mu\text{g}\cdot\text{dia}^{-1}$ são considerados deficientes e acima de $400\mu\text{g}\cdot\text{dia}^{-1}$ pode causar toxidez (FORDYCE, 2007; GIERUS, 2007).

O jambu normalmente é consumido com folhas, caule e raiz frescos, portanto, para se calcular o conteúdo de Se a ser fornecido pelo jambu, foi utilizada a massa fresca da parte aérea. Segundo Homma *et al.* (2011) em média o consumo de jambu varia entre 80 a 100 $\text{g}\cdot\text{pessoal}^{-1}\cdot\text{dia}^{-1}$, então considerando o consumo diário de 100 g de jambu e de acordo com o experimento realizado neste estudo, uma de $2,98\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ irá fornecer $50,13\mu\text{g}\cdot\text{dia}^{-1}$ de Se, valor acima do mínimo recomendado e bem distante o valor limite permitido para a dieta de humanos.

3.5 Conclusão

O trabalho mostrou que o jambu pode ser biofortificado com pequenas doses de Se em solução nutritiva, pois a presença do elemento aumentou a capacidade na produção de massa seca, crescimento e assimilação de nutrientes da planta.

Houve aumento na capacidade de translocação e partição do Se em sua parte aérea, com o aumento das doses de Se, resultando no aumento do teor e acúmulo do elemento.

O modelo de indicadores multivariados se mostrou adequado para se entender o comportamento da planta frente a exposição ao Se, podendo-se inferir, através de equações, qual melhor dose/resposta para o comportamento do jambu.

A dose de $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de Se foi a que produziu maior eficiência agrônômica, respondendo pelo maior desempenho da planta, porém de acordo com os modelos matemáticos oriundos dos indicadores multivariados, sobretudo do indicador geral, a dose ideal de Se em solução nutritiva é de $2,98\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, devendo ser utilizada como baliza se produzir plantas de jambu biofortificadas e seguras para o consumo humano.

Considerando os dados produzidos neste estudo, o consumo diário de 100 g de jambu biofortificado com $2,98\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de Se em solução nutritiva, irá fornecer um conteúdo diário de $50,13\mu\text{g}$ de Se, disponibilizando para a população quantidade de Se necessária para uma dieta equilibrada.

REFERÊNCIAS

- ALFTHAN, G.; EUROLA, M.; EKHOLM, P.; *et al.* Effects of nationwide addition of selenium to fertilizers on foods, and animal and human health in Finland: From deficiency to optimal selenium status of the population. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v.31, p.142-147, 2015.
- BERDEJO, B. D. A.; AZEVEDO, R. A. **Biofortificação: estratégias e avanços**. Departamento de Genética. Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas. *In: Anais ... Seminários em Genética e Melhoramento de Plantas (LGN 5799)*. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-Universidade de São Paulo. Piracicaba- SP: ESALQ-USP, 2008.
- COSTA, V.C.N.; SILVA JUNIOR, M.L.; SAMPAIO, I.M.G.; BITTENCOURTH, R. F. P.M.; FIGUEIREDO, S.P.; SANTOS, G.A.M.; SOUZA, L.R.; OLIVEIRA, E.S. Nitrogen fertilization and liming improves growth, production, gas exchange and post-harvest quality of yellow flower jambu. **Journal of Agricultural Studies**, n.3, v.8, p556-774, 2020.
- COZZOLINO, S. M. F. Deficiências de minerais. **Estudos Avançados**, v.21, n.60, 2007.
- DILLON, W. R.; GOLDSTEIN, M. **Multivariate analysis: methods and applications**. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- DUNTAS, L. H.; BENVENGA, S. Selenium: an element for life. **Endocrine**, v.48, p.756-775, 2015.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina. Ed. Planta. 2 Ed. 2006. 403p.
- FARIAS, V. D. S.; *et al.* Densidade de plantio: efeitos no cultivo do jambu (*Acmella oleracea*) - variedade Nazaré. **Horticultura Brasileira**, v. 28, p. S1327-S1331, 2010.
- FERREIRA, K. S.; *et al.* Concentrações de selênio em alimentos consumidos no Brasil. **Revista Panamericana de Salud Pública**, Washington, v. 11, n. 3, p. 172-177, 2002.
- FERREIRA, R. L. C. **Biofortificação e toxicidade de selênio na cultura da alface em solução nutritiva**. 2016. 37f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências Agrárias e veterinárias. Jaboticabal, SP, 2016.
- FORDYCE, F. Selenium geochemistry and health. **Ambio**, Washington (EUA), v. 36, p. 94-97, 2007.
- GIERUS, M. Fontes orgânicas e inorgânicas de selênio na nutrição de vacas leiteiras: digestão, absorção, metabolismo e exigências. **Ciência rural**, Santa Maria (RS), v. 37, p. 1212-1220, 2007.

GOURLEY, C.J.P.; ALLAN, D.L.; RUSSELLE, M.P. Plant nutrient efficiency: A comparison of definitions and suggested improvement. **Plant Soil**, n.158, p.29–37, 1994.

GRACIANO, P. D. **Biofortificação agronômica com zinco em cultivares de alface crespa**. 2019. 44f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia-MG: UFU, 2019. Disponível em: repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/25094/1/Biofortifica%C3%A7%C3%A3oAgron%C3%B4micaZinco.pdf. Acesso: 21 jan. 2020.

GUSMÃO, M. T. A.; GUSMÃO, S. A. L. **Jambu da Amazônia**. Características gerais, cultivo convencional, orgânico e hidropônico. Editora Edufra. Belém-PA. 2013. 135p.

HOAGLAND, D.R.; ARNON, D.I. The water–culture method for growing plants without soil. California Agricultural Experiment Station Circular 347. *In: College of Agriculture*, University of California, Berkeley, 1950.

HOMMA, A. K. O; SANCHE, R. S; DE MENEZES, A. J. E. A; DE GUSMÃO, S. A. L. Etnocultivo do jambu para abastecimento da cidade de Belém, estado do Pará. **Amazônia: Ci. & Desenv.**, Belém, v. 6, n. 12, jan./jun., 2011.

IBM. **SPSS Statistics version 25**. [S.l.]: IBM, 2018.

INOCÊNCIO, M. F. **Frações de zinco no solo e biofortificação agronômica com selênio, ferro e zinco em soja e trigo**. 2014. 89f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal de Lavras. Lavras: UFLA, 2014.

JOY, E. J. M; *et al.* Soil type influences crop mineral composition in Malawi. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 505, n.1, p. 587–595, 2015.

KOLBERT, Z.; MOLNÁR, Á.; FEIGL, G. VAN HOEWYK, D. Plant selenium toxicity: Proteome in the crosshairs. **Journal of Plant Physiology**, n 232, p.291-300, 2018.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v.15, n. 3, p.259-263, 2006.

MANOS, M. G. L., WILKINSON, J. Mapeamento de Controvérsias Sociotécnicas: o Caso da Biofortificação de Alimentos Básicos no Brasil. *In: Atas do 5º Congresso Ibero-Americano em investigação qualitativa*. Porto: CIAIQ; 2016.

MINISTÉRIO DA SAÚDE - AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Instrução Normativa Nº 28, que Estabelece as listas de constituintes, de limites de uso, de alegações e de rotulagem complementar dos suplementos alimentares. **Diário Oficial da União**, 27 jul. 2018, edição: 144, seção: 1, p. 141, 2018.

MOSTOFA, M.G.; HOSSAIN, M.A.; SIDDIQUI, M.N.; FUJITA, M.; TRAN, L.S.P. Phenotypical: physiological and biochemical analyses provide insight into selenium-induced phytotoxicity in rice plants. **Chemosphere**, Oxford, v. 178, p. 212–223, 2017.

NASCIMENTO, C. S. **Biofortificação agrônômica da rúcula com selênio em sistema hidropônico**. 2018. 43f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP. 2018.

NEWMAN, R.; WATERLAND, N.; MOON, Y.; TOU, J. C. Selenium biofortification of agricultural crops and effects on plant nutrients and bioactive compounds important for human health and disease prevention – a Review. **Plant Foods for Human Nutrition**, n.74, p.449-460, 2019.

PEREIRA JUNIOR, J.B; DANTAS, K.G.F. Evaluation of inorganic elements in cat's claw teas using ICP OES and GF AAS. **Food Chemistry**, v.196, p.331-337, 2016.

PRAUCHNER, C. A. **A importância do selênio para a agropecuária e saúde humana**. Santa Maria. Ed. UFSM. 2014. 376p.

PUCCINELLI, M.; F. MALORGIO, F.; I. ROSELLINI, I.; B. PEZZAROSSA, B. Uptake and partitioning of selenium in basil (*Ocimum basilicum* L.) plants grown in hydroponics. **Scientia Horticulturae**, v.225, p.271-276, 2017.

RAMOS, S. J.; FAQUIN, V.; DE ALMEIDA, H. J.; AVILA, F. W.; GUIMARAES GUILHERME, L. R.; ALVES BASTOS, C. E.; AVILA, P. A. Selenato e selenito na produção, nutrição mineral e biofortificação com selênio em cultivares de alface. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 1347–1355, 2011.

REIS, A.R.; EL-RAMADY, H.; SANTOS, E.F.; GRATÃO, P.L.; SCHOMBURG, L. Overview of Selenium Deficiency and Toxicity Worldwide: Affected Areas, Selenium-Related Health Issues, and Case Studies. In: PILON-SMITS E.; WINKEL L.; LIN ZQ. (eds) Selenium in plants. **Plant Ecophysiology**, v. 11, Springer, Cham, 2017.

RIOS, J.J; ROSALES, M.A.; BLASCO, B.; CERVILHA, L.M.; ROMERO, J.; RUIZ, J.M. Biofortification of Se and induction of the antioxidante capacity in lettuce plants. **Scientia Horticulturae**, v. 116, p. 227-342, 2008.

SAMPAIO, I. M. G.; GUIMARÃES, M. A.; NETO, H. S. L.; MAIA, C. L.; VIANA, C. S.; GUSMÃO, S. A. L. Pode o uso de mudas agrupadas e a maior densidade de plantio aumentar a produtividade de jambu? **Rev. Cienc. Agrar.**, v. 61. p1-8. 2018.

SAMPAIO, I. M. G.; SILVA JUNIOR, M. L.; CHAGAS, E. S.; BITTENCOURT, R. F. P. M.; COSTA, V. C. N.; SOUZA, D. L. SANTOS, W. A. S.; TEIXEIRA, B. J. B. Evaluation of the Non-destructive Method Efficiency of Estimating Nitrogen Content in Jambu Plants Grown in Hydroponic System. **Journal of Agricultural Studies**, v.8, n.2, p.466-479, 2020.

SANTANA, A. C. **Elementos de economia, agronegócio e desenvolvimento local**. Belém: GTZ; TUD; UFRA, 2005.

SANTANA, A. C. **Métodos quantitativos em economia: elementos e aplicações**. Belém: UFRA, 2003.

SANTANA, A. C.; SANTANA, A. L. Mapeamento e análise de arranjos produtivos locais na Amazônia. **Teoria e Evidencia Econômica**, v.12, n.1, p.9-34, 2004.

SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D.M. Utilization index: A modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 4, n.3, p.289-302, 1981.

SILVA, D. F.; CIPRIANO, P. E.; SOUZA, R. R.; SIUEIA, M.; FAQUIN, V.; SILVA, M. L. S.; GUILHERME, L. R. G. Biofortification with selenium and implications in the absorption of macronutrients in *Raphanus sativus* L., **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 86, 2020.

SILVA, V.M.; BOLETA, E.H.M.; LANZA, M.G.D.B.; LAVRES, J.; MARTINS, J.T.; SANTOS, E.F.; SANTOS, F.L.M.; PUTTI, F.F.; FURLANI JUNIOR, E.; WHITE, P.J.; BROADLEY M.R.; CARVALHO, H.W.P.; REIS, A.R. Physiological, biochemical, and ultrastructural characterization of selenium toxicity in cowpea plants. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 150, p. 172-182, 2018.

SINDELÁROVÁ, K.; SZÁKOVÁ, J.; TREMLÓVÁ, J.; MESTEK, O.; PRAUS, L.; KANA, A.; NAJMANOVÁ, J.; TLUSTOS, P. The response of broccoli (*Brassica oleracea* convar. *italica*) varieties on foliar application of selenium: uptake, translocation, and speciation. **Food Additives & Contaminants: Part A**, Abingdon, v. 32, n. 12, p. 2015.

SWIADER, J.M.; CHYAN, Y.; FREIJI, F.G. Genotypic differences in nitrate uptake and utilization efficiency in pumpkin hybrids. **Journal of Plant Nutrition**, v.17, n.10, p.1687 - 1699, 1994.

TEAM, R. CORE. **R Foundation for statistical computing**, Vienna, Austria. R: A Language and Environment for Statistical Computing, 2015.

VERGÜTZ, L.; *et al.* Biofortificação de alimentos: saúde ao alcance de todos. **Boletim Informativo da SBCS**, v. 42, n. 2, p. 20-23, 2016.

WHITE, P. J. Selenium accumulation by plants (Review). **Annals of Botany**, Oxford, v. 117, p. 213-235, 2016.

WHITE, P. J.; BOWEN, H. C.; PARMAGURU, P.; FRITZ, M.; SPRACKLEN, W. P.; SPIBY, R. E.; MEACHAM, M. C.; MEAD, A.; HARRIMAN, M.; TRUEMAN, L. J.; SMITH, B. M.; THOMAS, B.; BROADLEY, M. R. Interactions between selenium and sulphur nutrition in *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 55, n. 404, p. 1927–1937, 2004.

Efeito hormético de Cd em *Acmella oleracea* (L.) R. K. Jansen, cultivada em solução nutritiva

RESUMO

O intenso uso dos recursos naturais, relacionado com atividades de exploração de combustíveis fósseis, atividades industriais e o uso de fertilizantes, têm trazido incremento de elementos-traço, alguns deles metais pesados, ao ambiente. Concomitante a isso, o uso de técnicas para recuperar áreas poluídas tem mostrado grande evolução, principalmente com a aplicação de plantas fitoextratoras, com capacidade de absorver substâncias tóxicas do solo, dentre estas pode-se destacar algumas da família *Asteraceae*, como girassol. No contexto amazônico, surge o jambu, planta herbácea, amplamente utilizada na culinária regional e pertencente à *Asteraceae*, pode apresentar capacidade extrair, tolerar e acumular metais pesados nos seus tecidos. O objetivo deste estudo é analisar a capacidade fitoextratora do jambu para o elemento traço cádmio (Cd). Este experimento foi composto por um delineamento experimental inteiramente casualizado com cinco tratamentos e cinco repetições, em hidroponia. Foram utilizadas quatro doses de Cd na forma de cloreto de cádmio (1, 3, 6 e 9 mg.L⁻¹), e mais controle (zero Cd). Ao término do experimento foram realizadas medidas biométricas, trocas gasosas, análises de macro e micronutrientes, bem como análise do conteúdo de cádmio nas partes da planta. Os resultados foram submetidos à ANOVA, cálculo dos índices de translocação, tolerância, uso eficiente de nutrientes e análise de componentes principais para a construção de indicadores das dimensões de crescimento, massa, fisiológica, concentração de nutrientes e geral com especificação dos modelos de regressão. Os dados mostram que o Cd em pequenas doses (1 a 3 mg.L⁻¹), promoveu efeito benéfico ao jambu, com aumento de crescimento, massa e trocas gasosas. Com 6 mg.L⁻¹ a planta mostra sinais de toxidez com redução da atividade fisiológica e por conseguinte redução no crescimento e ganho de massa. Com 9 mg.L⁻¹ os sinais de toxidez são mais evidentes. O jambu submetido a 1 mg.L⁻¹ de Cd absorveu em sua parte aérea 1,35mg.kg⁻¹, ultrapassando em mais de 6 vezes ao limite máximo permitido pela ANVISA para hortaliças folhosas que é de 0,2 mg.kg⁻¹ de Cd. Os indicadores multivariados se mostraram extremamente adequados como nova proposta metodológica para analisar de forma integrada com comportamento do jambu. Através do indicador geral foi possível estimar o efeito hormético do Cd na planta, indicando a concentração de 2,37 mg.L⁻¹ de Cd na solução como dose máxima para o efeito estimulante do metal na planta. Em suma o jambu não é uma planta hiperacumuladora, mas é tolerante ao Cd e possui capacidade de fitoextração do metal.

Palavras-chave: Hormese. Indicadores multivariados. Efeito benéfico.

4 HORMETIC EFFECT OF Cd IN *ACMELLA OLERACEA* (L.) R.K. JANSEN, CULTIVATED IN NUTRITIVE SOLUTION

ABSTRACT

The intense use of natural resources, related to fossil fuel exploration activities, industrial activities and the use of fertilizers, has brought an increase in trace elements, some of them heavy metals, to the environment. Concomitantly, the use of techniques to recover polluted areas has shown great evolution, especially with the application of phytoextractor plants, with the capacity to absorb toxic substances from the soil, among which some of the *Asteraceae* family can be highlighted, such as sunflower. In the Amazon context, the jambu, a herbaceous plant, is widely used in regional cuisine and because it belongs to the *Asteraceae* family, it can be capable of extracting, tolerating and accumulating heavy metals in its tissues. The aim of this study is to analyze the phytoextractor capacity of jambu for the trace element cadmium. This experiment consisted of a completely randomized experimental design with five treatments and five replications, in hydroponics. Four doses of cadmium in the form of cadmium chloride (1, 3, 6 and 9 mg.L⁻¹) and more control (zero Cd) were used. At the end of the experiment, biometric measurements, gas exchange, analysis of macro and micronutrients, as well as analysis of the cadmium content in the parts of the plant were carried out. The results were submitted to ANOVA, calculation of translocation indices, tolerance, efficient use of nutrients and analysis of principal components for the construction of indicators of the dimensions of growth, mass, physiological, nutrient concentration and general with specification of the regression models. The data show that Cd in small doses (1 to 3 mg.L⁻¹), promoted a beneficial effect to jambu, with increased growth, mass and gas exchange. With 6 mg.L⁻¹ the plant shows signs of toxicity with a reduction in physiological activity and, consequently, a reduction in growth and mass gain. With 9 mg.L⁻¹ the signs of toxicity are more evident. The jambu submitted to 1 mg.L⁻¹ of Cd absorbed 1.35mg.kg⁻¹ in its aerial part, exceeding by more than 6 times the maximum limit allowed by ANVISA for leafy vegetables, which is 0.2 mg.kg⁻¹ of Cd. The multivariate indicators proved to be extremely suitable as a new methodological proposal to analyze in an integrated way with the behavior of the jambu. Through the general indicator it was possible to estimate the hormetic effect of Cd in the plant, indicating the concentration of 2.37 mg.L⁻¹ of Cd in the solution as the maximum dose for the stimulating effect of the metal in the plant. In short, jambu is not a hyperaccumulative plant, but it is tolerant to Cd and has metal phytoextraction capacity.

Keywords: Hormesis, multivariate indicators, beneficial effect.

3.6 Introdução

O aumento da concentração de metais pesados, também chamados de elementos-traço é uma consequência do crescimento da atividade antrópica como mineração, queima de combustíveis fósseis, atividades industriais e uso de fertilizantes e outras atividades agrícolas. Isto proporciona a elevação da toxicidade destes metais, particularmente em solos próximos a áreas industriais e agrícolas (RAI *et al.*, 2019). Este incremento de poluentes ao longo dos anos vem afetando a fertilidade do solo e o rendimento de biomassa das plantas (BHARGAVA *et al.*, 2012).

Os metais pesados, sendo essenciais ou não, podem ser considerados tóxicos para os seres humanos a depender da concentração a que são expostos, notadamente, quanto estes elementos estão presentes na dieta alimentar (MARSCHNER, 2012). Dentre as principais fontes potenciais de metais pesados que contaminam os alimentos, pode-se destacar áreas com concentrações geológicas/geogênicas elevadas, altas taxas de fertilização e impureza nos fertilizantes, uso de lodo de esgoto na agricultura, uso de pesticidas a base de metais, deposição atmosférica, tratamento inadequado de resíduos de efluentes e contaminação antrópica de solos (ALLOWAY, 2013; HANAHAM, 2013; RAI *et al.*, 2019).

Entre os elementos contaminantes que merecem mais atenção pelos seus efeitos em plantas e humanos é o cádmio (Cd). Sua concentração na crosta varia de 0,1-0,2 mg.kg⁻¹, encontrado em minerais como a greenoquita e monteponita, ocorrendo também associado a sulfetos de Zinco (Zn) e Chumbo (Pb). Por produzir diversos efeitos adversos em humanos, animais e plantas, é considerado um dos metais mais tóxicos existentes (KABATA-PENDIAS, 2010).

Sua aplicação está relacionada principalmente a confecção de baterias de Ni-Cd e Ag-Cd, porém sua maior fonte é refino do Zn, sendo que o Cd é encontrado como subproduto. Todavia, o Cd também é utilizado na fabricação de pigmentos e plásticos, placas de circuitos eletrônicos, produção de fertilizantes e defensivos, além da presença do metal em combustíveis fósseis (GUIMARÃES *et al.*, 2008).

De acordo com Smolders e Mertens (2013) as concentrações atuais de Cd nos solos são maiores que os valores geogênicos, devido a deposição atmosférica e uso de fertilizantes fosfatados. A média nos solos é de 0,1-1 mg.kg⁻¹ de Cd, valor que em princípio parece não afetar os processos geoquímicos do solo, porém pode interagir com os ecossistemas mesmo em níveis traço, pois este metal possui elevada toxicidade.

Na maioria dos solos, o Cd está ligado a substâncias coloidais na forma de Cd^{2+} , podendo participar de íons complexos e quelatos orgânicos. Desta maneira, sua biodisponibilidade está relacionada com reações de oxidação e redução. Em condições de pH baixo (4-4,7), o metal compete com outros íons metálicos pelos sítios de adsorção dos colóides, tornando-o mais disponível na solução do solo. Em pH mais alcalino, o Cd torna-se menos disponível principalmente pela precipitação na forma de sulfetos (KABATA-PENDIAS, 2010).

Assim sendo, em solos ácidos, como os solos amazônicos, existe a maior probabilidade do Cd tornar-se disponível na solução do solo e ser assimilado pelo sistema radicular das plantas. Obviamente, a disponibilidade do metal não está relacionada somente às condições biogeoquímicas locais, mas também ao *input* antropogênico do mesmo no sistema solo/planta. Em áreas de maior atividade humana, com presença de indústrias e emissão de material particulado, com intensa atividade agrícola com uso de fertilizantes fosfatados, uso de lodo de esgoto em solos, água residuárias usadas em irrigação, entre outras fontes, pode acarretar a maior disponibilidade do Cd nos solos e em plantas cultivadas, que, se tiverem capacidade de acumulação, podem fornecer este metal na dieta da população destas áreas (KABATA-PENDIAS, 2010; SHANMUGARAJ; MALLA; RAMALINGAM, 2019; HUSSAIN *et al.*, 2019).

Sabe-se que a exposição de plantas ao Cd pode provocar retardo no crescimento, clorose, necrose, danos ao aparato fotossintético, entre outros efeitos (SHANMUGARAJ; MALLA; RAMALINGAM, 2019; QIN *et al.*, 2020). Contudo, em pequenas doses, o Cd provoca efeito indutor de crescimento sobre algumas espécies de plantas. Este fenômeno é conhecido como hormese e se caracteriza pelo efeito binário, com resposta estimulatória e inibitória dos organismos (RAY; FARRIS; HARTMANN, 2014; PINCELLI-SOUZA *et al.*, 2020).

Muitas dessas plantas tolerantes a metais pesados como o Cd, pertencem a família de plantas ditas acumuladoras e hiperacumuladoras de metais. Existem atualmente mais de 400 espécies de plantas descritas como hiperacumuladoras de metais, como o *Helianthus annuus* (girassol), da família *Asteraceae*, *Brassica juncea* (mostarda-india) e *Brassica napus* (canola) da família *Brassicaceae*, entre outras (ANDRADE; TAVARES; MAHLER, 2014; SYTAR *et al.*, 2016).

Neste contexto, Hungria *et al.* (2019) avaliaram o potencial fitorremediador de uma hortaliça da família *Asteraceae*, típica da região amazônica denominada de *Acmella oleracea*, mais conhecida como Jambu. Segundo os autores, o jambu submetido a um solo contaminado

com 9 mg.kg^{-1} , mostrou baixa sensibilidade ao metal, sem indícios de toxidez. Todavia, mesmo em espécies chamadas de tolerantes, podem apresentar redução de crescimento e deficiência nutricional quando expostas ao Cd (ZARE *et al.*, 2018; NOGUEIROL *et al.*, 2018).

O jambu é utilizado de diversas formas na culinária, como cosmético e inclusive na medicina (ANDRADE; TAVARES; MAHLER, 2014). Essa possível capacidade de acumular metais pesados, aliada ao fato de seu alto consumo ao longo de todo o ano, traz a preocupação e a necessidade de se investigar a capacidade desta planta de absorção e acúmulo de metais pesados. Nessa perspectiva busca-se responder a seguinte questão: o jambu possui capacidade de captar, tolerar e acumular cádmio?

Presume-se que por ser da mesma família do girassol (*Asteraceae*) o jambu seja capaz de extrair e acumular o elemento-traço cádmio em seus tecidos, ao se confirmar essa hipótese, abre-se horizontes para estudos com outros metais pesados. Sendo assim, essa pesquisa pretende analisar a capacidade de captação, tolerância, acúmulo e efeito hormético do jambu frente ao cádmio (Cd).

3.7 Material e métodos

3.7.1 Procedimentos experimentais

O experimento foi conduzido nos meses de fevereiro a março de 2020, em casa de vegetação do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA ($1^{\circ} 27' 13,70''$ Sul e $48^{\circ} 26' 32,65''$ Oeste de Greenwich). Com altitude em torno de 14 metros, a área onde foi o experimento possui clima equatorial quente e úmido, categoria Af de Koppen (KOTTEK *et al.*, 2006).

A temperatura e umidade ao longo do experimento foram medidas através de Termo-higrômetro instalado na casa de vegetação. Os valores médios de temperatura variaram de 35°C para máximas de temperaturas e 28°C para mínimas. A umidade média no período do experimento foi em torno de 70%.

3.7.2 Sistema de Cultivo

O sistema de cultivo utilizado foi por hidroponia com substrato inerte em vasos de 2,0 L, utilizando solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950). Os vasos foram preenchidos com sílica moída pré-lavada (substrato inerte), revestidos de papel alumínio para evitar a incidência de radiação solar e perfurados na base, com introdução de tubo de silicone, para facilitar a recirculação da solução nutritiva. Durante todo o experimento a solução nutritiva foi oxigenada através de drenagem no final da tarde e reposição no início da manhã (BEZERRA NETO; BARRETO, 2012; SAMPAIO *et al.*, 2020).

3.7.3 Produção de Mudanças

As sementes de Jambu (*Acmella oleracea*), colhidas no banco de sementes da UFRA, foram semeadas na segunda semana de fevereiro 2020 em bandejas de poliestireno com 128 células, preenchidas fibra de coco. Em cada célula foi colocada de 10 a 15 sementes da variedade regional de jambu flor amarela. Após a germinação as mudas foram regadas com solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) em 25% da força iônica (SAMPALIO *et al.*, 2020). Com 10 dias de germinação, foi feito o desbaste das plantas menores, deixando uma plântula por célula.

Depois de 21 dias, as mudas com quatro folhas expandidas, foram retiradas das da bandeja de poliestireno, suas raízes foram lavadas com água destilada e em seguida transplantadas para os vasos contendo sílica inerte e solução nutritiva a 50% da força iônica para facilitar a adaptação, permanecendo assim por sete dias. A solução nutritiva foi composta por 1 mL.L⁻¹ de NH₄NO₃, 4 mL.L⁻¹ de KNO₃, 5 mL.L⁻¹ de Ca(NO₃)₂, 2 mL.L⁻¹ de MgSO₄, 1 mL.L⁻¹ de Fe-EDDHA e 1 mL.L⁻¹ de Solução micronutrientes. Diariamente, durante todo o experimento, foram monitorados o pH e a condutividade elétrica da solução nutritiva. O pH foi mantido na faixa de 5,5, a 6,5 e a condutividade elétrica na faixa de 1,0 – 1,8 µs.cm⁻¹.

3.7.4 Delineamento Experimental

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com cinco tratamentos, seis repetições por tratamento, perfazendo um total de 25 plantas, sendo uma planta por vaso. Foram utilizadas quatro doses de cádmio (1, 3, 6 e 9 mg.kg⁻¹), aplicadas na forma de cloreto de cádmio (CdCl₂) e mais o controle (HUNGRIA *et al.*, 2019). A cada sete dias a solução

nutritiva foi renovada, bem como as doses de Cd foram repostas para manter a concentração do elemento até o final do experimento. A água evaporada ao longo do dia foi repostada com o uso de água destilada.

Para mensurar a capacidade de absorção de cádmio (Cd), potencial de acúmulo, translocação, tolerância e seus efeitos sobre o jambu, foi realizada a colheita das plantas ao final do ciclo de crescimento, 40 dias após o transplantio.

3.7.5 Procedimentos Analíticos laboratoriais

4.2.5.1 Análise Biométrica

Após a colheita, foram medidas as seguintes variáveis biométricas: i) *Altura das Plantas (AP)* - utilizando régua milimetrada, medindo a partir da superfície do solo até o ápice; ii) *Diâmetro do Caule (DC)* - utilizando paquímetro, medindo o caule a 0,5 cm do substrato; iii) *Número de Inflorescência (NI)* - contagem das inflorescências emitidas pela planta; *Massa Seca de Folha (MSF)* - pesagem das folhas da planta em balança analítica de precisão, secas por 48 horas em estufa a 70°C; *Massa Seca de Caule (MSC)* - pesagem do caule da planta em balança analítica de precisão, secas por 48 horas em estufa a 70°C; *Massa Seca de Inflorescência (MSI)* - pesagem da inflorescência da planta em balança analítica de precisão, secas por 48 horas em estufa a 70°C; *Massa Seca de Raiz (MSR)* - pesagem da raiz da planta em balança analítica de precisão, secas por 48 horas em estufa a 70°C (COSTA *et al.*, 2020; SAMPAIO *et al.*, 2020).

4.2.5.2 Troca gasosa em folhas

As variáveis de trocas gasosas foram medidas na primeira folha expandida do ápice até a base da planta. As plantas foram avaliadas 15 dias após a primeira contaminação com cádmio. A taxa de assimilação líquida de CO₂ (*A*), a condutância estomática ao vapor de água (*g_s*), carbono interno (*C_i*) e a taxa de transpiração (*E*), foram medidas entre as 11:00 e 13:00 h usando um sistema de troca gasosa de fluxo aberto portátil (LI -6400XT, LI-COR, Lincoln, NE) sob uma concentração externa de CO₂ de 400 μmol mol⁻¹ de ar e PAR artificial de 1.000 μmol de fótons m⁻²s⁻¹, de acordo com Castro *et al.* (2017) e Sampaio *et al.* (2018).

O intervalo de medição foi ajustado através da obtenção de curva diurna de trocas gasosas para o jambu.

4.2.5.3 Análises Químicas

As amostras de folha, caule, inflorescência e raiz do jambu, após secagem foram moídas em gral de porcelana. Posteriormente foi retirada uma alíquota de 0,25 g de cada parte da planta foi colocada em tubo de teflon a adicionado 4,0ml de HNO₃ a 7mol.L⁻¹, 2 ml de H₂O₂ (30% mm⁻¹) e 2 ml de água ultrapura, ficando a solução em repouso por uma hora. Após o repouso, as amostras foram colocadas para digestão completa em forno micro-ondas. A rampa de digestão consistiu em três passos: subida da temperatura de 0 a 180°C em 10 minutos a 800w, permanência da temperatura de 180°C por 20 minutos e ventilação por 50 minutos (PEREIRA JR.; DANTAS, 2016). Após a digestão as amostras foram filtradas e avolumadas para 50 ml com água deionizada.

O conteúdo de potássio (K), magnésio (Mg), cálcio (Ca), ferro (Fe), zinco (Zn), Manganês (Mn) e cobre (Cu) nas amostras de folha, caule, inflorescência e raiz do jambu foi determinado por espectrofotometria de absorção atômica Agilent AA 200 e o conteúdo de cádmio (Cd), por espectrofotometria de absorção atômica com forno de grafite Varian AA 240 Z, no laboratório de Qualidade de Águas da Amazônia da Universidade do Estado do Pará (UEPA).

3.7.6 Índice de Translocação, Tolerância e Uso Eficiente de Nutrientes

Para quantificar a habilidade de crescimento da *Acmella oleracea* na presença de Cd, foram determinados os índices de translocação (Tr), tolerância (It), acúmulo (Ac) e Eficiência de uso do nutriente (Eun), segundo metodologias propostas por Siddiqui; Glass (1981) e Swiader, Chyan e Freiji (1994), utilizando as seguintes equações:

$$Ac = \frac{\text{Concentração do elemento na parte da planta (mg.kg}^{-1}\text{)}}{\text{Concentração do elemento na parte da planta (mg.kg}^{-1}\text{)}} \times \frac{\text{Massa seca na parte da planta (g)}}{\text{Massa seca na parte da planta (g)}} \quad (23)$$

$$Tr = \frac{\text{Acúmulo do elemento na parte da planta (g vaso}^{-1}\text{)}}{\text{Acúmulo do elemento na parte da planta (g vaso}^{-1}\text{)}.100} \quad (24)$$

$$IT = \frac{\text{Massa seca da planta na dose de interesse(g)}}{\text{Massa seca do controle (g)}} \quad (25)$$

$$Eun = \frac{(\text{Massa seca total produzida})^2}{\text{Conteúdo total de nutrientes na planta}} \quad (26)$$

valores absolutos das magnitudes dos eixos das componentes, para gerar o vetor de pesos utilizada na construção de cada indicador.

Na construção dos indicadores representativos do conjunto das variáveis definidoras das dimensões: Concentração de Nutrientes – ICn (incorporou as variáveis conteúdo de *K, Mg, Ca, Fe, Zn, Mn e Cu*), crescimento da planta – Ic (captou o efeito das variáveis altura da planta, diâmetro do caule e número de inflorescência), acúmulo de massa da planta – Im (captou o efeito das variáveis *massa seca de folha, massa seca de caule, massa seca de inflorescência e massa seca de raiz*), fisiológico – If (taxa de assimilação líquida de CO₂, condutância estomática, carbono interno e transpiração) e Geral (Ig) da pesquisa, contemplando o conjunto de todas as variáveis explanatórias, todas as componentes foram consideradas para que fosse contemplada 100% da variância total da massa de dados. Os vetores de coeficientes associados a cada componente principal foram estimados com a aplicação do Software SPSS, versão 25 (IBM, 2018).

3.7.7.1.1 Construção dos Indicadores Estatísticos

Os indicadores das dimensões ICn, Ic, Im, If e Ig, estimados conforme Santana e Santana (2004), diferentemente das análises tradicionais de experimentos, que trabalham com modelos individuais para cada variável dependente, ampliam o escopo da análise para incorporar todos os efeitos captados pelo conjunto de variáveis que representam cada dimensão analisada. Assim, na dimensão definida como crescimento da planta, ao invés de se observar parcialmente a influência das dosagens de selênio nas variáveis “altura da planta, diâmetro do caule e número de inflorescências”, construiu-se o indicador Ic para representar o comportamento das três variáveis no seu conjunto. Com isto, capta-se de forma completa os efeitos causados à planta, observados em cada variável.

Seguindo o modelo proposto por Santana e Santana (2004), os pesos associados ao conjunto de componentes relacionado às dimensões Conteúdo de nutrientes (sete componentes), fisiológico (quatro componentes), de crescimento (três componentes) de acúmulo de massa (três componentes) e geral (17 componentes), foram estimados com a aplicação do software SPSS 25 (IBM, 2018), e obtidos da seguinte forma (SANTANA; SANTANA, 2004; SANTANA, 2005):

- v) estima-se o vetor com a participação relativa dos autovalores λ ($\lambda_{kj}/\sum \lambda_k$);
- vi) estimam-se os coeficientes da matriz de valores absolutos (a_{kj}) dos autovetores de cada componentes transformados;

- vii) estimam-se os coeficientes relativos da matriz de autovetores ($a_{kj}/\Sigma a_k$);
- viii) define-se a combinação linear das variáveis descritoras e faz-se a multiplicação matricial para estimar os pesos Θ como nas Equações 29 e 30.

$$\Theta_{j(kx1)} = \left(\frac{a_{kj}}{\Sigma a_k} \right)_{(kxk)} \cdot \left(\frac{\lambda_k}{\Sigma \lambda_k} \right)_{(kx1)} \quad (29)$$

Com

$$\Theta_1 + \Theta_2 + \dots + \Theta_p = 1 \quad (j = 1 - ICn, 2 - If, 3 - Ic, 4-Im, 5-Ig) \quad (30)$$

Onde k é o número de componentes de cada dimensão j.

Portanto, tem-se o modelo matemático utilizado para estimar os pesos associados às variáveis descritoras do comportamento da planta, tendo como referência as dimensões relacionadas à concentração de nutrientes, fisiologia, crescimento, acúmulo de massa e geral.

Por fim, cada indicador é obtido pela multiplicação do vetor de pesos Θ pelos valores das variáveis explanatórias relacionadas aos aspectos fisiológicos, de crescimento, de acúmulo de massa e geral INc, Ic, Im, If e Ig.

3.7.7.2 A análise de regressão

A especificação do modelo de regressão múltipla utilizado para representar o fenômeno estudado nesta tese, envolvendo os efeitos das doses de selênio sobre o conteúdo e acúmulo de nutrientes, crescimento e acúmulo de massa nas plantas de jambu, e comportamento geral do jambu, foi definido no sistema de equações abaixo:

$$INc = b_{10} + b_{11}D_s + b_{12}D_s^2 + u_1 \quad (31)$$

$$If = b_{20} + b_{21}D_s + b_{22}D_s^2 + u_2 \quad (32)$$

$$Ic = b_{30} + b_{31}D_s + b_{32}D_s^2 + u_3 \quad (33)$$

$$Im = b_{40} + b_{41}D_s + b_{42}D_s^2 + u_4 \quad (34)$$

$$Ig = b_{50} + b_{51}D_s + b_{52}D_s^2 + u_5 \quad (35)$$

Em que:

INc é o Indicador conteúdo de nutrientes da planta; If é o Indicador fisiológico da planta; Ic é o Indicador de crescimento da planta; Im é o Indicador de massa da planta; Ig é o Indicador geral da planta; D_s representa as doses de cádmio com resposta linear; D_s^2 as doses de cádmio com resposta quadrática (controle, 1mg.L^{-1} , 3mg.L^{-1} , 6mg.L^{-1} e 9mg.L^{-1}); b_{i0} são

os interceptos das equações ($i = 9, 10, 11, 12, 13$); b_{ij} são os parâmetros associados às variáveis das equações; u_i são os termos de erro aleatórios das equações.

Os dados biométricos, fisiológicos, conteúdo e acúmulo de Cd (folha, caule, inflorescência, raiz e parte aérea), conteúdo e acúmulo de nutrientes, translocação, tolerância, uso eficiente de nutrientes, assim como os indicadores foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste Skott-Knott (SK), $p < 0,05$, com a utilização do software R versão 3.5.2 (R CORE TEAM, 2018).

3.8 Resultados

3.8.1 Massa e Crescimento

Todas as variáveis biométricas estudadas, mostraram crescimento nas doses de 1 e 3 mg.L⁻¹ de Cd em relação ao controle. Notadamente na dose de 1 mg.L⁻¹, as variáveis biométricas expressaram seus maiores valores. Destaca-se que as variáveis altura, NI, DC, MSF e MSR não mostrara diferenças significativas na dose de 3 mg.L⁻¹ em relação ao controle, já as variáveis MSC e MSI, na dose de 3 mg.L⁻¹, se destacam em relação ao controle, com diferença significativa. A partir da dose de 6 mg.L⁻¹, todas as variáveis mostraram decréscimo, sendo que na dose de 9 mg.L⁻¹, foram encontrados os menores valores para todas as variáveis biométricas (Tabela 7)

Tabela 7 - Resultado das variáveis biométricas do jambu exposto ao Cd e cultivado em hidroponia.

Variáveis	Doses de Cd em mg.L ⁻¹				
	Controle	1	3	6	9
Altura	18,96±0,94 b	23,48±1,07 a	19,61±1,95b	13,53±0,97 c	7,59±1,14 d
NI	8,67±1,21 b	11,50±0,83 a	9,33±0,51 b	5,67±0,81 c	2,50±0,54 d
DC	5,21±0,28 b	6,06±0,24 a	5,11±0,35 b	3,60±0,25 c	1,73±0,30 d
MSF	1,82±0,11 b	2,05±0,11 a	1,81±0,06 b	1,20±0,09 c	0,40±0,11 d
MSC	1,31±0,14 c	1,68±0,05 a	1,45±0,08 b	0,94±0,08 d	0,38±0,05 e
MSI	0,26±0,03 c	0,33±0,02 a	0,30±0,01 b	0,18±0,03 d	0,04±0,007 e
MSR	1,02±0,10 b	1,12±0,05 a	0,99±0,06 b	0,68±0,07 c	0,16±0,04 d

Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: Legenda: NF - Número de Folhas; NI - Número de Inflorescência; DC - Diâmetro do Caule (mm); AP - Altura da Planta (cm); MSF - Massa Seca de Folha (g.planta⁻¹); MSR - Massa Seca de Raiz (g.planta⁻¹); MSC - Massa Seca de Caule (g.planta⁻¹); MSI - Massa Seca de Inflorescência (g.planta⁻¹). As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre tratamentos, de acordo com o teste Scott-Knott ($p < 0,05$).

3.8.2 Trocas Gasosas

Os resultados das trocas gasosas do jambu submetidas ao tratamento com Cd, estão expressos na Tabela 8 e mostram que a taxa de assimilação fotossintética (A), foi maior nas plantas submetidas a dose de 1 mg.L^{-1} ($16,02 \pm 0,95 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$) em relação ao controle ($14,03 \pm 0,75 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$). As plantas expostas a 3 mg.L^{-1} de Cd ($13,31 \pm 0,75 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$) também não mostraram variação, sendo semelhantes estatisticamente as plantas controle. Para as doses de 6 e 9 mg.L^{-1} de Cd ($9,35 \pm 0,93 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$) e ($3,11 \pm 0,77 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$) respectivamente, ocorreu redução na taxa de assimilação fotossintética.

Tabela 8 - Resultado das variáveis fisiológicas do jambu exposto ao Cd e cultivado em hidroponia.

Variáveis	Doses de Cd em mg.L^{-1}				
	Controle	1	3	6	9
A	$14,03 \pm 0,75 \text{ b}$	$16,02 \pm 0,95 \text{ a}$	$13,31 \pm 0,75 \text{ b}$	$9,35 \pm 0,93 \text{ c}$	$3,11 \pm 0,77 \text{ d}$
g_s	$0,122 \pm 0,012 \text{ b}$	$0,152 \pm 0,005 \text{ a}$	$0,121 \pm 0,005 \text{ b}$	$0,079 \pm 0,006 \text{ c}$	$0,021 \pm 0,004 \text{ d}$
C_i	$364,08 \pm 2,91 \text{ b}$	$366,30 \pm 2,48 \text{ b}$	$367,52 \pm 3,98 \text{ b}$	$370,92 \pm 5,58 \text{ b}$	$378,27 \pm 7,39 \text{ a}$
E	$3,98 \pm 0,28 \text{ b}$	$4,56 \pm 0,33 \text{ a}$	$3,75 \pm 0,32 \text{ b}$	$2,52 \pm 0,24 \text{ c}$	$0,45 \pm 0,21 \text{ d}$

Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Legenda: A – Taxa de assimilação de CO_2 ($\mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$); g_s – Condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$); E – Transpiração ($\text{mmol m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$); C_i – Carbono interno ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$). As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre tratamentos de acordo com o teste Scott-Knott ($p < 0,05$).

A condutância estomática (g_s) nas plantas de jambu expostas ao Cd, assim como a A , mostrou crescimento na dose de 1 mg.L^{-1} do metal ($0,152 \pm 0,005 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$), com valores acima do controle ($0,122 \pm 0,012 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$). Já as plantas com 3 mg.L^{-1} de Cd ($0,121 \pm 0,005 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$), mostraram redução em reação a dose de 1 mg.L^{-1} e não mostraram diferença em relação ao controle, destacando uma tendencia de queda nos valores da g_s . Esta tendencia se manteve nas doses mais altas do metal, sendo que menor valor encontrado para g_s foi de $0,021 \pm 0,004 \text{ (mol H}_2\text{O m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1})$ na dose de 9 mg.L^{-1} de Cd (Tabela 8).

Diferente das variáveis A e g_s , o carbono interno (C_i) mostrou crescimento com o aumento das doses de Cd. Não houve diferença significativa entre as doses de 1 ($366,30 \pm 2,48 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$), 3 ($367,52 \pm 3,98 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$) e 6 mg.L^{-1} ($370,92 \pm 5,58 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$) e o controle ($364,08 \pm 2,91 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$), porém na dose de 9 mg.L^{-1} do metal ($378,27 \pm 7,39 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$), a planta mostra maior acumulação de carbono em relação as demais doses e ao controle.

Assim como a A e g_s , a transpiração (E) também expressou maior magnitude na dose de 1 mg.L^{-1} ($4,56 \pm 0,33 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$), com diferença significativa em relação as demais

doses e ao controle ($3,98 \pm 0,28 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$). A partir de 3 mg.L^{-1} , a planta mostra uma redução da E com queda até o menor valor para esta variável na dose de 9 mg.L^{-1} .

3.8.3 Conteúdo de Cádmio

O conteúdo de Cd encontrado no jambu em contato com solução nutritiva contaminada com o metal pode ser observado na Tabela 9. A concentração de Cd na folha foi maior na dose de 3 mg.L^{-1} ($0,68 \pm 0,06 \text{ mg.kg}^{-1}$) e menor na dose de 9 mg.L^{-1} ($0,36 \pm 0,03 \text{ mg.kg}^{-1}$). No caule a dose de 3 mg.L^{-1} ($0,76 \pm 0,07 \text{ mg.kg}^{-1}$) apresentou maior conteúdo e mostrou diferença significativa das demais. A dose de 1 mg.L^{-1} ($0,39 \pm 0,04 \text{ mg.kg}^{-1}$) foi a que apresentou menor conteúdo. Enquanto, na raiz e inflorescência o comportamento foi o mesmo, mostrando crescimento no conteúdo de Cd com o aumento das doses.

A parte da planta que apresentou maior conteúdo foi a raiz na dose de 9 mg.L^{-1} , seguido da inflorescência, caule e folha. Comportamento similar foi observado nas doses de 6 e 3 mg.L^{-1} , porém na dose de 1 mg.L^{-1} , o conteúdo de Cd se deu primeiramente na raiz e posteriormente folha, inflorescência e caule. Indicando que na dose de 1 mg.L^{-1} a distribuição do metal diferiu das demais doses.

Tabela 9 - Conteúdo de Cd em jambu cultivado em hidroponia (mg.kg^{-1} .)

Conteúdo de Cd em mg.kg^{-1}	Doses de Cádmio em mg.L^{-1}			
	1	3	6	9
Folha	$0,52 \pm 0,06$ bB	$0,68 \pm 0,06$ aB	$0,43 \pm 0,05$ cC	$0,36 \pm 0,03$ dD
Caule	$0,39 \pm 0,04$ cC	$0,76 \pm 0,07$ aB	$0,70 \pm 0,02$ bC	$0,66 \pm 0,04$ bC
Inflorescência	$0,44 \pm 0,02$ dC	$0,62 \pm 0,06$ cB	$1,06 \pm 0,09$ bB	$2,07 \pm 0,22$ aB
Raiz	$0,60 \pm 0,04$ dA	$2,21 \pm 0,17$ cA	$2,77 \pm 0,6$ bA	$4,02 \pm 0,30$ aA

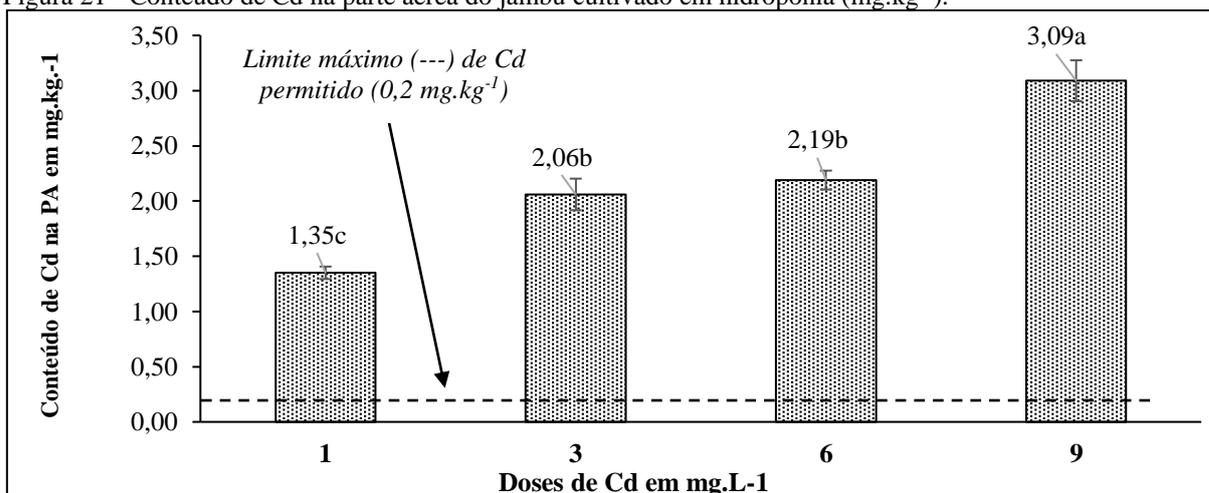
Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre as doses de cádmio. As letras maiúsculas apontam as diferenças significativas entre as partes da planta, de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

Ao se analisar o conteúdo de Cd contido na porção comestível do jambu (folha, caule e inflorescência), quantifica-se o quanto de Cd a planta translocou e particionou em sua parte aérea. Estes resultados estão expressos na Figura 21 e mostram que na dose de 1 mg.L^{-1} de Cd a planta concentrou cerca de $1,35 \text{ mg.kg}^{-1}$ do metal, a mediada que a concentração do elemento aumentou na solução nutritiva, a captação e distribuição do Cd também aumento, principalmente na dose de 9 mg.L^{-1} , que concentrou na parte aérea do jambu $3,09 \text{ mg.kg}^{-1}$ do metal.

Importante salientar que o limite máximo tolerado pela Instrução Normativa N°88, de 26 de março de 2021 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) é de $0,2 \text{ mg.kg}^{-1}$ para hortaliças folhosas (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2021), como o caso do jambu, sendo que o mesmo absorveu, quando exposto a menor dose de Cd, 6,8 vezes mais que o máximo permitido e na maior dose 15 vezes mais que o máximo tolerado pela ANVISA (Figura 21).

Figura 21 - Conteúdo de Cd na parte aérea do jambu cultivado em hidroponia (mg.kg^{-1}).



Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As barras representam o desvio-padrão; as letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre as doses de cádmio de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

3.8.4 Conteúdo de Nutrientes

A forma como o Cd influenciou a absorção de nutrientes pelo jambu estão expostas na tabela 10. De forma geral as doses de 1 e 3 mg.L^{-1} , promoveram uma maior absorção de nutrientes pela planta e nas doses de 6 e 9 mg.L^{-1} , ocorrem reduções na concentração em relação ao controle, porém para alguns elementos, esta tendência não se manteve. Estes comportamentos serão descritos a seguir.

A concentração de K na folha foi maior de 6 mg.L^{-1} ($40,96 \pm 1,88 \text{ mg.kg}^{-1}$) e menor concentração na dose de 9 mg.L^{-1} ($28,00 \pm 1,33 \text{ mg.kg}^{-1}$), porém ambas ainda foram maiores estatisticamente que a dose controle ($25,62 \pm 2,14 \text{ mg.kg}^{-1}$). No caule, as maiores concentrações de K foram nas doses de 1 e 3 mg.L^{-1} ($41,72 \pm 2,55 \text{ mg.kg}^{-1}$) e ($42,12 \pm 2,02 \text{ mg.kg}^{-1}$), respectivamente, e menor na dose de 9 mg.L^{-1} ($10,44 \pm 1,87 \text{ mg.kg}^{-1}$) em relação ao controle ($36,71 \pm 2,13 \text{ mg.kg}^{-1}$).

Na inflorescência a dose de 1 mg.L^{-1} ($32,32 \pm 3,09 \text{ mg.kg}^{-1}$) foi a que se destacou com concentração de K e as doses de 6 e 9 mg.L^{-1} ($4,55 \pm 0,45 \text{ mg.kg}^{-1}$) e ($4,67 \pm 0,13 \text{ mg.kg}^{-1}$), respectivamente, foram as que apresentaram menor concentração do nutriente em relação ao

controle. Na raiz somente a dose de 9 mg.L⁻¹ se mostrou estatisticamente menor que as demais doses e o controle. Destaca-se ainda que nas doses de 1 e 3 mg.L⁻¹ o K se concentrou mais no caule. Com o aumento das doses do metal para 6 e 9 mg.L⁻¹ o nutriente se concentrou mais nas folhas.

O Mg, assim como o K mostrou maior absorção nas concentrações entre 1 e 3 mg.L⁻¹ de Cd na solução nutritiva. Na folha, destaca-se respectivamente as doses de 3 e 6 mg.L⁻¹ (11,10±0,67 mg.kg⁻¹) e (11,76±1,17 mg.kg⁻¹), como as que não apresentaram diferença entre si, porém, foram maiores estatisticamente que as demais doses e o controle (8,79±0,55 mg.kg⁻¹). No caule não houve diferença nas doses de 1 e 3 mg.L⁻¹ (4,30±0,49 mg.kg⁻¹) e (4,63±0,25 mg.kg⁻¹), todavia estas doses se destacam das demais como as que apresentaram maior absorção de Mg. A dose de 9 mg.L⁻¹ foi a que apresentou menor absorção em relação ao controle (3,05±0,31 mg.kg⁻¹).

Essa tendência na absorção do Mg pelo jambu se mostrou também na inflorescência e na raiz, com a dose de 1 mg.L⁻¹ promovendo a maior concentração de Mg na inflorescência (10,99±0,20 mg.kg⁻¹). Na raiz as doses de 1 a 6 mg.L⁻¹ se destacaram por não apresentarem diferença significativa entre si na concentração de Mg, mas foram significativamente diferentes do controle e da dose 9 mg.L⁻¹ para absorção do nutriente. Outro ponto a destacar é que à medida que as concentrações de Cd aumentaram na solução nutritiva o Mg se concentrou mais nas folhas em relação as outras partes da planta.

O comportamento do Ca frente ao Cd na folha, mostrou uma maior capacidade de absorção na dose de 9 mg.L⁻¹ (7,52±1,01 mg.kg⁻¹) do metal, diferindo das demais doses e do controle (1,56±0,10 mg.kg⁻¹). No caule e na inflorescência, a maior concentração do nutriente foi na dose de 6 mg.L⁻¹ (1,61±0,29 mg.kg⁻¹) e (2,70±0,09 mg.kg⁻¹) respectivamente, destacando-se do controle e das doses de 1 e 9 mg.L⁻¹ que não diferiram entre si. A absorção de Ca pela raiz mostrou comportamento diferente das demais partes da planta com a maior concentração de Ca na dose de 1 mg.L⁻¹ (3,85±0,32 mg.kg⁻¹), diferindo do controle (1,73±0,54 mg.kg⁻¹) e das demais doses e mostrando uma tendência que queda na concentração de Ca com o aumento das doses de Cd. Importante frisar que nas doses de 1 e 3 mg.L⁻¹ de Cd o Ca se concentrou mais na raiz do Jambu, e posteriormente na folha. Já nas doses de 6 e 9 mg.L⁻¹, as maiores concentrações de Ca foram encontradas nas folhas e inflorescência.

Quando se analisa o nutriente Fe nas folhas do jambu frente às dose de Cd, observa-se que houve maior concentração nas doses de 3 e 6 mg.L⁻¹ (0,79±0,05 mg.kg⁻¹) (0,76±0,06 mg.kg⁻¹) respectivamente e que não diferiram do controle (0,72±0,03 mg.kg⁻¹), mas se

mostraram diferentes estatisticamente em relação as doses de 1 e 9 mg.L⁻¹. Já no caule, inflorescência e raiz a maior concentração de Fe foi na dose de 9 mg.L⁻¹. Vale destacar que na dose de 1 mg.L⁻¹, não houve diferença significativa entre folha, inflorescência e raiz, somente o caule mostrou menor concentração do nutriente. Com 3, 6 e 9 mg.L⁻¹ de Cd o Fe se concentrou mais na inflorescência em segundo lugar na raiz, folha e caule (Tabela 10).

O Zn na folha obteve maior concentração nas de 1 e 3 mg.L⁻¹ de Cd na solução (0,91±0,03 mg.kg⁻¹) e (0,91±0,06 mg.kg⁻¹) respectivamente, diferindo do controle (0,80±0,06) e das demais doses. No caule não houve diferença significativa entre as doses, porém em relação à inflorescência e raiz a dose de 9 mg.L⁻¹ de Cd promoveu a maior concentração de Zn, com diferença significativa em relação ao controle e demais doses.

Ressalta-se que na dose de 1 e 3 mg.L⁻¹ o Zn se concentrou mais na folha e nas doses de 6 e 9 mg.L⁻¹ as maiores concentrações foram encontradas na inflorescência (Tabela 10). As doses de 1 e 3 mg.L⁻¹ de Cd provocaram maior concentração de Mn na folha, caule, raiz e inflorescência. Destaca-se ainda que as maiores concentrações de Mn foram encontradas na folha em detrimento as outras partes da planta.

Diferente do Mn o Cu apresentou maior concentração para folha, caule, inflorescência e raiz na dose de 9 mg.L⁻¹ de Cd em relação ao controle. Quando se analisa as partes da planta em relação a concentração de Cu frente ao Cd, nota-se que foi na inflorescência que houve maior concentração do nutriente (Tabela 10).

Tabela 10 - Conteúdo de nutrientes em jambu exposto ao Cd e cultivado em hidroponia (mg.kg⁻¹).

Conteúdo de Nutrientes em mg.kg ⁻¹	Doses de Cádmio em mg.L ⁻¹				
	Controle	1	3	6	9
K Folha	25,62±2,14 eB	32,51±0,53 cB	36,70±2,49 bB	40,96±1,88 aA	28,00±1,33 dA
K Caule	36,71±2,13 bA	41,72±2,55 aA	42,12±2,02 aA	27,44±2,94 cB	10,44±1,87 dB
K Inflorescência	9,92±0,48 bC	32,32±3,09 aB	11,06±0,73 bB	4,55±0,45 cC	4,67±0,13 cD
K Raiz	25,8±1,44 aB	29,38±2,81 aC	32,88±5,64 aB	30,78±10,02 aB	8,66±0,95 bC
Mg Folha	8,79±0,55 cA	10,32±0,31 bB	11,10±0,67 aA	11,76±1,17 aA	6,74±0,08 dA
Mg Caule	3,05±0,31 cD	4,30±0,49 aC	4,63±0,25 aB	3,97±0,07 bC	1,75±0,06 dC
Mg Inflorescência	7,76±0,17 bB	10,99±0,20 aA	5,18±0,07 cB	5,27±0,14 cB	1,54±0,06 dD
Mg Raiz	3,79±0,09 bC	4,57±0,44 aC	4,80±0,17 aB	4,88±0,69 aB	3,81±0,21 bB
Ca Folha	1,56±0,10 cA	1,77±0,12 cB	2,11±0,15 cB	3,65±0,13 bA	7,52±1,01 aA
Ca Caule	0,72±0,17 bB	0,81±0,28 bC	0,85±0,12 bC	1,61±0,29 aC	0,74±0,06 bC
Ca Inflorescência	0,70±0,08 cB	0,73±0,08 cC	1,82±0,01 bB	2,70±0,09 aB	1,75±0,23 bB
Ca Raiz	1,73±0,54 cA	3,85±0,32 aA	2,46±0,42 bA	2,31±0,50 bB	0,98±0,09 dC

(Continua).

Tabela 10 - Conteúdo de nutrientes em jambu exposto ao Cd e cultivado em hidroponia (mg.kg⁻¹) (Continua).

Conteúdo de Nutrientes em mg.kg ⁻¹	Doses de Cádmio em mg.L ⁻¹				
	Controle	1	3	6	9
Fe Folha	0,72±0,03 aA	0,68±0,03 bA	0,79±0,05 aB	0,76±0,06 aB	0,60±0,05 cC
Fe Caule	0,61±0,05 bB	0,55±0,02 cB	0,59±0,01 bC	0,62±0,02 bB	0,70±0,04 aC
Fe Inflorescência	0,68±0,03 dA	0,72±0,05 dA	1,01±0,03 cA	1,13±0,03 bA	1,52±0,03 aA
Fe Raiz	0,64±0,04 bB	0,67±0,05 bA	0,80±0,11 aB	0,70±0,13 bB	0,93±0,05 aB
Zn Folha	0,80±0,06 bA	0,91±0,03 aA	0,91±0,06 aA	0,66±0,03 dC	0,72±0,04 cD
Zn Caule	0,78±0,07 aA	0,83±0,05 aB	0,86±0,06 aA	0,88±0,06 aB	0,83±0,01 aC
Zn Inflorescência	0,82±0,03 dA	0,83±0,05 dB	0,91±0,09 cA	1,18±0,06 bA	1,98±0,09 aA
Zn Raiz	0,83±0,07 bA	0,74±0,03 cC	0,53±0,06 dB	0,59±0,10 dC	0,97±0,07 aB
Mn Folha	0,120±0,02 bA	0,144±0,01 aA	0,156±0,01 aA	0,114±0,02 bA	0,101±0,008 bA
Mn Caule	0,04±0,01 bC	0,059±0,001 aD	0,059±0,008 aD	0,048±0,008 bC	0,029±0,004 cD
Mn Inflorescência	0,055±0,005 cC	0,078±0,006 aC	0,072±0,003 bC	0,055±0,002 cC	0,039±0,005 dC
Mn Raiz	0,084±0,006 bB	0,093±0,008 aB	0,089±0,004 aB	0,082±0,007 bB	0,093±0,004 aB
Cu Folha	0,031±0,013 cC	0,055±0,006 bC	0,062±0,006 aD	0,065±0,005 aC	0,069±0,003 aD
Cu Caule	0,088±0,007 bB	0,086±0,003 bB	0,099±0,006 aB	0,091±0,007 aB	0,096±0,006 aB
Cu Inflorescência	0,103±0,004 cA	0,106±0,010 cA	0,11±0,003 bA	0,137±0,007 aA	0,133±0,003 aA
Cu Raiz	0,084±0,006 bB	0,093±0,008 aB	0,089±0,004 aC	0,082±0,007 bB	0,090±0,004 aC

Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre as doses de cádmio; as letras maiúsculas apontam as diferenças significativas entre as partes da planta, de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

3.8.5 Índice de Acúmulo de Cádmio

O índice de acúmulo está expresso na Tabela 11 e mostra relação da concentração do cádmio na parte da planta e a massa seca na parte da planta, e traduz o quanto do metal ficou acumulado ao longo do experimento.

Tabela 11 - Acúmulo de cádmio em jambu cultivado em hidroponia (g.planta⁻¹).

Acúmulo de Cádmio (g.planta ⁻¹)	Doses de Cádmio em mg.L ⁻¹			
	1	3	6	9
Folha	1,08±0,17 bA	1,23±0,09 aB	0,52±0,07 cB	0,14±0,05 dC
Caule	0,66±0,08 bB	1,10±0,08 aB	0,65±0,05 bB	0,25±0,03 cB
Inflorescência	0,14±0,007 bC	0,18±0,01 aC	0,18±0,04 aC	0,07±0,02 cC
Raiz	0,67±0,07 cB	2,19±0,26 aA	1,85±0,42 bA	0,65±0,19 cA

Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre as doses de cádmio; as letras maiúsculas apontam as diferenças significativas entre as partes da planta, de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

A quantidade acumulada de Cd nas folhas de jambu aumentou significativamente entre as doses de 1 mg.L⁻¹ (1,08±0,17 g.planta⁻¹) e 3 mg.L⁻¹ (1,23±0,09 g.planta⁻¹), apresentado, porém, tendência de queda entre as doses de 6 mg.L⁻¹ (0,52±0,07 g.planta⁻¹) e 9 mg.L⁻¹ (0,14±0,05 g.planta⁻¹). Quando se analisa o comportamento do metal nas doses isoladas, tem-

se que em 1 mg.L^{-1} o acúmulo maior foi na folha, sendo o no caule e raiz não mostraram diferença estatística. A partir de 3 mg.L^{-1} a maior parte do metal ficou acumulada na raiz, mostrando uma baixa distribuição do Cd a medida que se aumento a dose na solução nutritiva.

3.8.6 Índice de Acúmulo de Nutrientes

A quantidade acumulada de nutrientes em relação as doses de Cd está demonstrada na Tabela 12 e é expressa em g.planta^{-1} . Nos resultados de acúmulo de nutrientes pode-se observar que as doses de 1 e 3 mg.L^{-1} foram as que provocaram maior acúmulo de nutrientes, fato relacionado ao maior acúmulo de massa nestas doses, já descrito anteriormente.

O acúmulo de K ($66,65 \pm 4,19 \text{ g.planta}^{-1}$) e Mg ($21,18 \pm 1,75 \text{ g.planta}^{-1}$) na folha de jambu foi semelhante, mostrando que nas dose de 1 e 3 mg.L^{-1} houve aumento significativo destes dois nutrientes em relação ao controle. Comportamento semelhante foi observado para o caule, inflorescência e raiz em relação a estes dois nutrientes (Tabela 12).

Destaca-se que o acúmulo de K e Mg em todas as doses de Cd foi maior na folha, posteriormente Caule, Raiz e menor na inflorescência.

O Ca porém, já mostra certa diferença em relação ao K e Mg, pois seu maior acúmulo na folha se deu na dose de 6 mg.L^{-1} ($4,38 \pm 0,29 \text{ g.planta}^{-1}$), valor este que difere estatisticamente das demais doses e do controle. No caule o menor valor do de acúmulo nutriente foi encontrado na dose de 9 mg.L^{-1} ($0,27 \pm 0,04 \text{ g.planta}^{-1}$), destacando-se inclusive do controle. As demais doses de Cd não provocaram diferença significativa no acúmulo de Ca no caule do Jambu. A inflorescência apresentou maior valor relacionado a dose de 3 mg.L^{-1} ($0,53 \pm 0,02 \text{ g.planta}^{-1}$) e a raiz na dose de 1 mg.L^{-1} de Cd ($4,30 \pm 0,30 \text{ g.planta}^{-1}$) em relação ao controle. Importante ressaltar que somente na dose de 1 mg.L^{-1} acúmulo de Ca foi maior na raiz da planta. Nas demais doses, o Ca se acumulou majoritariamente na folha.

Para os micronutrientes Fe, Zn, Mn e Cu, o efeito da exposição ao Cd provocou maior acúmulo nas doses de 1 e 3 mg.L^{-1} , sendo que este acúmulo ocorreu principalmente na folha e caule da planta (Tabela 12).

Tabela 12 - Acúmulo de nutrientes em jambu exposto com Cd em g.planta⁻¹ cultivado em hidroponia.

Acúmulo de Nutrientes (g.planta ⁻¹)	Doses de Cádmiu em mg.L ⁻¹				
	Controle	1	3	6	9
K Folha	46,63±4,76 bA	66,65±4,19 aA	66,45±4,24 aA	49,32±5,26 bA	11,10±3,11 cA
K Caule	48,20±6,77 cA	69,98±6,22 aA	61,22±5,84 bA	25,63±2,31 dB	3,91±0,86 eB
K Inflorescência	2,56±0,32 cC	10,69±1,26 aC	3,26±0,27 bC	0,79±0,16 dC	0,16±0,04 eC
K Raiz	26,31±2,60 bB	32,89±3,93 aB	32,59±5,70 aB	20,95±7,77 cB	1,38±0,37 dC
Mg Folha	15,97±1,31 bA	21,18±1,75 aA	20,10±1,22 aA	14,12±1,46 cA	2,68±0,79 dA
Mg Caule	4,02±0,74 bB	7,21±0,83 aB	6,72±0,50 aB	3,72±0,28 bB	0,65±0,09 cB
Mg Inflorescência	2,01±0,27 bC	3,63±0,21 aD	1,53±0,10 cD	0,92±0,18 dC	0,05±0,01 eC
Mg Raiz	3,86±0,41 bB	5,10±0,39 aC	4,76±0,27 aC	3,28±0,53 cB	0,62±0,18 dB
Ca Folha	2,85±0,28 cA	3,63±0,26 bB	3,84±0,39 bA	4,38±0,29 aA	2,90±0,75 cA
Ca Caule	0,95±0,24 aC	1,36±0,47 aC	1,23±0,18 aC	1,18±0,30 aB	0,27±0,04 bB
Ca Inflorescência	0,18±0,03 cD	0,24±0,02 cD	0,53±0,02 aD	0,47±0,10 bC	0,06±0,01 dB
Ca Raiz	1,80±0,72 cB	4,30±0,30 aA	2,45±0,50 bB	1,57±0,43 cB	0,16±0,05 dB
Fe Folha	1,31±0,08 aA	1,40±0,08 aA	1,43±0,11 aA	0,91±0,05 bA	0,24±0,08 cA
Fe Caule	0,80±0,12 aB	0,92±0,03 aB	0,86±0,06 aB	0,59±0,07 bB	0,26±0,03 cA
Fe Inflorescência	0,17±0,03 cD	0,24±0,02 bD	0,30±0,01 aC	0,19±0,03 cD	0,05±0,01 dC
Fe Raiz	0,66±0,09 aC	0,75±0,09 aC	0,80±0,13 aB	0,46±0,07 bC	0,15±0,05 cB
Zn Folha	1,45±0,09 cA	1,87±0,07 aA	1,66±0,09 bA	0,80±0,07 dA	0,28±0,07 eA
Zn Caule	1,02±0,13 cB	1,39±0,09 aB	1,26±0,13 bB	0,82±0,05 dA	0,31±0,04 eA
Zn Inflorescência	0,21±0,03 bD	0,27±0,02 aD	0,27±0,02 aD	0,20±0,04 bC	0,07±0,01 cC
Zn Raiz	0,85±0,155 aC	0,84±0,08 aC	0,53±0,06 bC	0,40±0,10 cB	0,15±0,04 dB
Mn Folha	0,21±0,03 bA	0,29±0,05 aA	0,28±0,02 aA	0,13±0,03 cA	0,04±0,01 dA
Mn Caule	0,05±0,01 bC	0,10±0,01 aB	0,08±0,01 aB	0,04±0,008 bB	0,01±0,002 cB
Mn Inflorescência	0,01±0,002 cD	0,02±0,001 aC	0,02±0,001 bC	0,009±0,001 dB	0,001±0,0003 eC
Mn Raiz	0,08±0,007 bB	0,10±0,01 aB	0,08±0,007 bB	0,05±0,008 cC	0,01±0,004 dB
Cu Folha	0,05±0,02 cB	0,11±0,01 aB	0,11±0,008 aB	0,07±0,007 bA	0,02±0,007 dB
Cu Caule	0,11±0,01 bA	0,14±0,006 aA	0,14±0,005 aA	0,08±0,01 cA	0,03±0,004 dA
Cu Inflorescência	0,02±0,003 bD	0,03±0,002 aD	0,03±0,001 aD	0,02±0,004 bC	0,004±0,0009 cD
Cu Raiz	0,08±0,007 bC	0,10±0,01 aB	0,08±0,007 bC	0,05±0,008 cD	0,01±0,004 dC

Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre as doses de cádmio; as letras maiúsculas apontam as diferenças significativas entre as partes da planta, de acordo com o teste Scott-Knott (p = 0,05).

3.8.7 Índice de Translocação (Tr) do Cádmiu

O índice de translocação do Cd mede a relação entre o acúmulo do metal nas partes da planta e o acúmulo na planta e estão expressos na Tabela 13. Na dose de 1 mg.L⁻¹ de Cd houve maior mobilidade do metal na planta, com 26,32±2,65% de Cd retido na raiz, 25,96±3,13 % foi para o caule, 42,05±4,84 % ficou retido na folha e 5,66±0,57 % foi translocado para a inflorescência. Com 3 mg.L⁻¹ Cd na solução, a maior parte do metal (46,42±2,86 %), ficou retido na raiz, 23,46±0,72% translocou para o caule, 26,20±2,37 % foi para a folha e 5,44±0,41 % para a flor. A medida que a concentração de Cd na solução aumentou para 6 mg.L⁻¹, 5,80±1,11 % do metal foi translocado para a flor, 16,44±3,29 % para

a folha, $20,69 \pm 3,19$ % ficou no caule e $57,05 \pm 5,20$ % do Cd ficou retido na raiz. Este comportamento se repetiu na dose de 9 mg.L^{-1} , com $56,95 \pm 11,18$ % do metal retido na raiz e $23,007 \pm 7,08$ % no caule, somente $13,40 \pm 5,23$ % foram translocados para a folha e $6,63 \pm 1,63$ % para a flor.

O comportamento do Cd no caule e na inflorescência quase não sofreu variação com o aumento das doses. Já na folha, em doses menores (1 e 3 mg.L^{-1}) a planta apresentou maior capacidade de translocação, todavia a medida que a concentração de Cd aumentou na solução nutritiva (6 e 9 mg.L^{-1}), mais de 50% do metal ficou retido na raiz e menos de 20% foi translocado para a folha.

Tabela 13 - Índice de translocação (Tr em %) de cádmio em jambu.

(Tr) de Cádmio (em %)	Doses de Cádmio em mg.L^{-1}			
	1	3	6	9
Folha	$42,05 \pm 4,84$ aA	$26,20 \pm 2,37$ bB	$16,44 \pm 3,29$ cB	$13,40 \pm 5,23$ cC
Caule	$25,96 \pm 3,13$ aB	$23,46 \pm 0,72$ aC	$20,69 \pm 3,19$ aB	$23,007 \pm 7,08$ aB
Inflorescência	$5,66 \pm 0,57$ aC	$5,44 \pm 0,41$ bD	$5,80 \pm 1,11$ aC	$6,63 \pm 1,63$ aC
Raiz	$26,32 \pm 2,65$ cB	$46,42 \pm 2,86$ bA	$57,05 \pm 5,20$ aA	$56,95 \pm 11,18$ aA

Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre as doses de cádmio; as letras maiúsculas apontam as diferenças significativas entre as partes da planta, de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

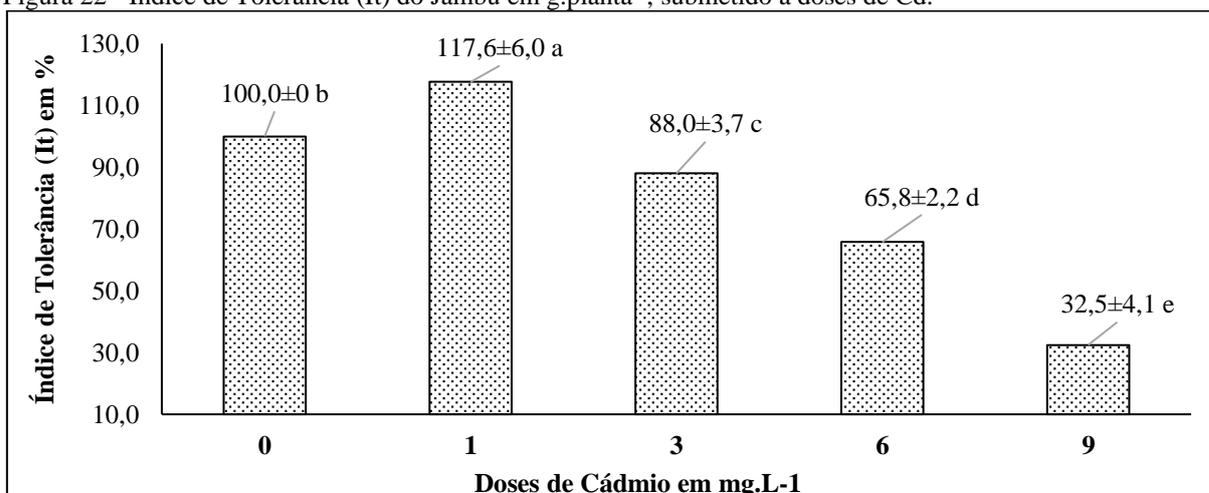
3.8.8 Índices de Tolerância (It) e Uso eficiente de Nutrientes (Uen)

O índice de tolerância (It), expressa a relação entre a quantidade de massa seca total (folha, caule, inflorescência e raiz) do jambu cultivado em solução nutritiva contaminada com Cd e a massa seca total da planta em solução nutritiva sem Cd.

Ao se analisar os dados, observa-se que houve diferença significativa entre as plantas contaminadas com Cd e as plantas controle. Destaca-se principalmente o resultado do It na dose de 1 mg.L^{-1} de Cd, onde a planta mostrou capacidade de tolerância ao metal maior que das plantas controle. Nas doses subsequentes, o It do Jambu foi gradativamente reduzindo, à medida que se aumentou as doses de Cd na solução nutritiva, mostrando um comportamento quadrático na evolução dos dados. Tendo o jambu mostrando menor capacidade de tolerância frente ao Cd na dose de 9 mg.L^{-1} do metal (Figura 22).

Quanto à eficiência na utilização de nutrientes, nota-se que o jambu contaminado com 1 mg.L^{-1} de Cd, obteve a mesma eficiência que as plantas, sem contaminação, não havendo diferença significativa entre a dose de 1 mg.L^{-1} e o controle.

Figura 22 - Índice de Tolerância (It) do Jambu em g.planta⁻¹, submetido a doses de Cd.

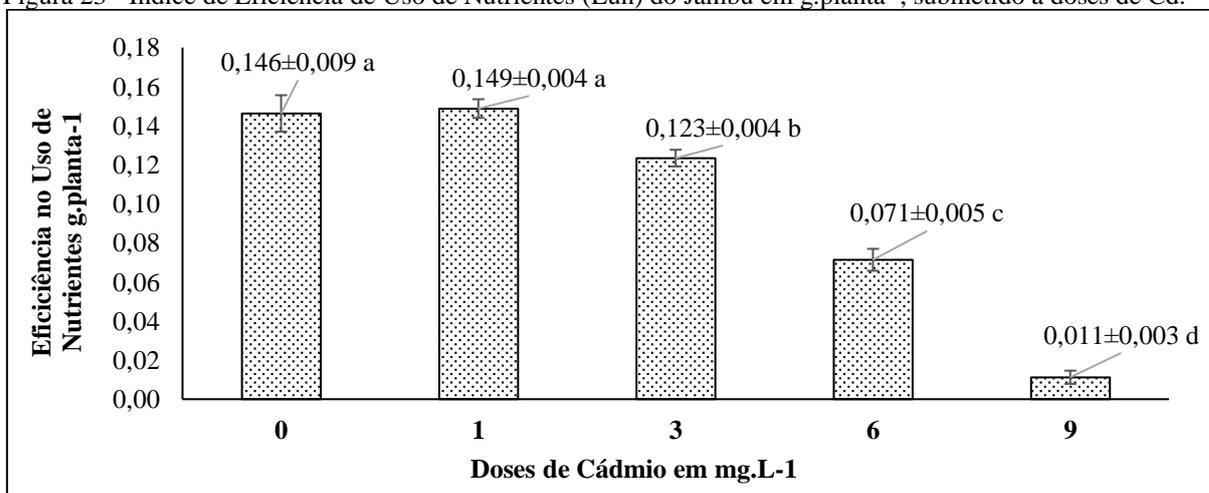


Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre as doses de Cd de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

Todavia, com o aumento da concentração do metal na solução nutritiva, ocorre uma redução significativa, de forma quadrática, na eficiência do uso dos nutrientes, culminando com a menor eficiência na dose de 9 mg.L⁻¹ de Cd (Figura 23).

Figura 23 - Índice de Eficiência de Uso de Nutrientes (Eun) do Jambu em g.planta⁻¹, submetido a doses de Cd.



Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre as doses de Cd de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

4.3.9 Indicadores Multivariados

Os resultados dos indicadores multivariados estão expressos na Tabela 14 e mostram a dinâmica das variáveis nutricionais, fisiológicas e biométricas frente às doses de Cd. A absorção de nutrientes, representada pelo indicador (ICn), mostrou diferença significativa à

medida que se aumentou as doses de Cd. As doses de 1 mg.L^{-1} ($10,28 \pm 0,30$) e 3 mg.L^{-1} ($10,52 \pm 0,27$) de Cd provocaram absorção semelhante de nutrientes, porém maiores que o controle ($8,38 \pm 0,39$). À medida que se procedeu o aumento da dose, passando para 6 mg.L^{-1} de Cd, a absorção de nutrientes passou a ser menor ($9,63 \pm 0,42$), todavia ainda se manteve maior que o controle. Este comportamento polinomial com tendencia de aumento dos valores do indicador nas doses menores e de nas doses maiores, prosseguiu até a dose de 9 mg.L^{-1} ($5,66 \pm 0,20$), com redução significativa frente ao controle (Tabela 14).

Através da equação de regressão para o indicador ICn (Tabela 14), pode-se perceber um comportamento polinomial com a concentração de $3,38 \text{ mg.L}^{-1}$ induzindo a máxima absorção de nutrientes, com queda na redução com o aumento da concentração do metal.

O indicador fisiológico (If) agrupa o comportamento das variáveis explanatórias taxa de assimilação de CO_2 , condutância estomática, carbono interno e transpiração e demonstra de forma integrada como se dá a interação do cádmio com o aparato fotossintético da planta. O indicador fotossintético (If) mostrou que para a dose de 1 mg.L^{-1} de Cd ($11,81 \pm 0,50$), houve aumento significativo das condições de assimilação de CO_2 , abertura estomática, concentração de carbono, bem como transpiração em relação ao controle ($10,70 \pm 0,41$). O If para a dose de 3 mg.L^{-1} ($10,34 \pm 0,42$), não diferiu do controle, mostrando uma tendencia de queda no valor do indicador. Este comportamento fica evidente quando se analisa o If para as doses de 6 mg.L^{-1} ($8,21 \pm 0,50$) e 9 mg.L^{-1} de Cd ($4,87 \pm 0,42$) e mostra redução significativa no valor do indicador em relação ao controle.

Nota-se, portanto, que a dose de 1 mg.L^{-1} de Cd provocou um aumento significativo nas variáveis que compõem o indicador If, e à medida que a concentração de Cd aumentou para 3 mg.L^{-1} , houve uma redução na resposta fisiológica da planta e tal redução ficou mais acentuada a medida que a concentração de Cd na solução nutritiva aumentou (Tabela 14).

Destaca-se para este indicador a concentração máxima de Cd na solução na ordem de $1,03 \text{ mg.L}^{-1}$, calculada pelo modelo de regressão (Tabela 15). Valores maiores de Cd poderão provocar, de acordo com modelo proposto, redução na atividade fotossintética do jambu.

Os indicadores de Massa (Im) e Crescimento (Ic), que agrupam respectivamente as variáveis de massa seca de folha, caule, inflorescência e raiz e altura da planta, diâmetro do caule e número de inflorescência, demonstram comportamento similar ao indicador fisiológico (If), com aumento significativo dos indicadores Im e Ic na dose de 1 mg.L^{-1} ($1,31 \pm 0,03$) e ($14,30 \pm 0,51$) respectivamente, frente aos valores controle ($1,12 \pm 0,04$) e ($11,39 \pm 0,63$). A partir de 3 mg.L^{-1} de Cd na solução, os valores dos indicadores Im

(1,15±0,03) e Ic (11,85±0,84) apresentaram redução em relação aos indicadores na dose de 1 mg.L⁻¹ de Cd e não mostraram diferença em relação aos controles.

Os valores de Im (0,76±0,01) e Ic (7,92±0,63) para a dose de 6 mg.L⁻¹, bem como os valores de Im (0,24±0,03) e Ic (4,12±0,49) para a dose de 9 mg.L⁻¹ mostram redução significativa, assim como o indicador fisiológico (If), apresentando o mesmo comportamento de queda no valor dos indicadores com o aumento das doses, demonstrando perda na produção de massa seca e no crescimento da planta (Tabela 14).

Tabela 14 - Análise de variância dos indicadores multivariados do jambu exposto ao Cd.

Indicadores	Doses de cádmio em mg.L ⁻¹				
	Controle	1	3	6	9
ICn	8,38±0,39 c	10,28±0,30 a	10,52±0,27 a	9,63±0,42 b	5,66±0,20 d
If	10,70±0,41 b	11,81±0,50 a	10,34±0,42 b	8,21±0,50 c	4,87±0,42 d
Im	1,12±0,04 b	1,31±0,03 a	1,15±0,03 b	0,76±0,01 c	0,24±0,03 d
Ic	11,39±0,63 b	14,30±0,51 a	11,85±0,84 b	7,92±0,63 c	4,12±0,49 d
Ig	15,34±0,96 c	20,73±0,93 a	19,26±0,52 b	13,26±0,61 d	4,96±0,29 e

Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: As letras minúsculas apontam as diferenças significativas entre as doses de Cd de acordo com o teste Scott-Knott ($p = 0,05$).

Assim como os indicadores ICn e If, os indicadores Ic e Im, mostraram comportamento polinomial com valores máximos de Cd sem causar toxidez no jambu na ordem de 0,87 e 0,85 mg.L⁻¹ respectivamente para os indicadores de Ic e Im. A planta, porém, apresentou redução das variáveis explanatórias que compõem os indicadores a medida que a concentração de Cd aumentou. Este comportamento é análogo aos demais indicadores de reforça a premissa de um feito binário do Cd no jambu (Tabela 15).

Para se analisar o comportamento de todas as variáveis explanatórias de forma de forma integrada e assim poder se observar o comportamento do jambu de forma ampla, foi criado o indicador geral, que agrupa o comportamento de todos os indicadores nutricionais, fisiológicos, de massa e crescimento.

De modo análogo aos demais indicadores, principalmente aos indicadores fisiológicos, crescimento, massa e de nutrientes, o indicador geral (Ig), apresentou a mesma tendência de desempenho para a planta, destacando sempre a dose de 1 mg.L⁻¹ de Cd com valores maiores significativamente que o controle. A medida que se aumentou a concentração do metal na solução, o desempenho da planta começou a reduzir de forma quadrática, com menor valor do indicador para a dose de 9 mg.L⁻¹ (Tabela 15).

Este indicador vem ratificar o comportamento binário da planta. Com ponto de inflexão da curva do indicador na ordem de 2,37 mg.L⁻¹ (Tabela 15), ou seja, nesta a planta de

forma geral atingiria seu máximo desempenho e então com o aumento da concentração de Cd, o jambu irá apresentar sinais de diminuição de seu desenvolvimento.

Tabela 15 - Modelos de Regressão dos indicadores multivariados mostrando o comportamento do jambu contaminadas com Cd.

Indicadores	Equação de regressão dos indicadores	Dose máxima Cd em mg.L ⁻¹ sem efeito de toxidez	R ² ajustado	p-Valor
ICn	ICn=-0,1607D ² **+1,0884D**+8.7966	3,38	0.9337	<0,0001
If	If=-0.0922D ² **+0,1888D+1.0418	1,03	0.8168	<0,0001
Im	Im=-0.0149D ² **+0,0253D+1.2048	0,85	0.9620	<0,0001
Ic	Ic=-0.1256D ² **+0,2161D+11,9908	0,87	0.8189	<0,0001
Ig	Ig=-0.3324D ² **+1,5743D+17,1710	2,37	0.9095	<0,0001

Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor.

Nota: ** significativo a 1% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade (teste F); D=dose; D²=dose ao quadrado.

3.9 Discussões

O comportamento do jambu submetida a doses crescentes de Cd nessa pesquisa, evidenciou um efeito singular ainda pouco revelado em estudos dessa natureza: o chamado efeito hormético, ou hormeses.

O Cd afeta negativamente o crescimento da planta. O estresse ao metal reduziu o comprimento das raízes e a parte aérea de pimentas cultivadas em hidroponia e submetidas à exposição ao Cd (HUSSAIN *et al.*, 2019). Segundo Rizwan *et al.* (2017), o Cd afeta a fotossíntese, produção, qualidade e rendimento de biomassa por sua elevada toxicidade em plantas.

Nas raízes de plantas expostas ao metal, ocorre o escurecimento, amolecimento, redução de comprimento, aumento do diâmetro e redução da matéria seca. O estresse no sistema radicular da maioria das plantas cultivadas deve-se ao aumento do tamanho das células parenquimatosas e expansão do tecido cortical (HUSSAIN *et al.*, 2019).

De acordo com Solis-Dominguez *et al.* (2007) o teor de Cd normal nas folhas da maioria das plantas varia de 0,05-0,2 mg.kg⁻¹, sendo que valores acima destes podem provocar clorose, ressecamento e necrose das folhas. Além disso, a presença do metal causa redução no uso da água, taxa fotossintética líquida, redução da atividade enzimática e proteica com quebra das ligações de dissulfeto dos grupos sulfidril, desnaturando as proteínas e reduzindo a atividade enzimática, além da substituição de nutrientes como o Zn por Cd em metaloenzimas (GUIMARÃES *et al.*, 2008).

Estudos como o de Kurdizel, Prasad e Strzalka (2004) mostram que em algumas plantas, o Cd substituiu o Mg na Rubisco, modificando assim sua estrutura. Ainda segundo Kurdizel, Prasad e Strzalka (2004), a presença do metal reduz a fotossíntese, pois inibe a cadeia de transporte de elétrons do cloroplasto. Com a redução da taxa fotossintética, a abertura estomática também é reduzida, esta redução pode estar ligada as alterações nas relações hídricas ou pela competição do Cd com as substâncias minerais. Perfus-Barbeoch *et al.* (2002), relatam em seu estudo com *Arabidopsis thaliana* L. que o metal pode induzir a liberação de Ca do retículo endoplasmático e vacúolos, aumentando o nível de citosol, conduzindo a uma menor abertura estomática. Como resultado, ocorreu inibição do crescimento e translação de nutrientes como o Mn e Cu.

Entretanto, no presente estudo, o efeito do Cd provocou melhor desempenho no jambu em pequenas doses (1 e 3 mg.L⁻¹), estimulando maior ganho de massa seca, aumento no diâmetro do caule e altura da planta até a dose de 3 mg.L⁻¹ do metal, outrossim, as mesmas doses estimularam uma melhor taxa de assimilação de CO₂, condutância estomática e transpiração do jambu. Em similaridade a estes resultados encontram-se os estudos como o de Poschenrieder *et al.* (2013); Jia *et al.* (2013; 2015) em *Lonicera japonica* Thunb demonstraram que a planta exposta a 10 mg.kg⁻¹ de Cd durante 90 dias aumentou sua biomassa e capacidade de assimilação de CO₂. Estes autores evidenciam que uma baixa concentração do metal induziu a um efeito benéfico no sistema fotossintético da planta. O mesmo resultado foi demonstrado por Ying *et al.* (2010) ao estudarem o estresse induzido por Cd em *Picris divaricata*, os resultados dessa pesquisa reportam que houve aumento na taxa de assimilação de CO₂, condutância e transpiração, com curva em forma U invertido, indicando efeito hormético provocado pelo metal. Ainda segundo estes autores, em baixas doses de Cd não houve diferença significativa na atividade da Rubisco em relação ao controle, indicando não haver dano provocado pelo Cd no aparato fotossintético.

No jambu, a partir da dose de 6 mg.L⁻¹, percebeu-se a redução de crescimento e ganho de massa, bem como da atividade fisiológica da planta.

Aliada a estas informações tem-se que a concentração e acúmulo de nutrientes pela planta demonstrou uma melhor assimilação, sobretudo de K, Mg, Ca e Fe estimulada pelo efeito do Cd nas concentrações de 1, 3 e 6 mg.L⁻¹. O Mg nas folhas e o Fe na inflorescência apresentaram maiores teores em relação ao controle, corroborando com maior atividade fotossintética nas referidas doses, fato também demonstrado por Khan *et al.* (2016) em pesquisa de avaliação dos efeitos dos metais pesados em espécies de batatas, tomate e alface.

É fundamental frisar que o jambu, na menor dose administrada, concentrou em sua parte aérea (comestível), 1,35 mg.kg⁻¹ de Cd, teor 6,5 vezes maior que o permitido pela resolução RDC N°42/2013, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária, que estipula o valor de 0,2 mg.kg⁻¹ como limite máximo permitido de Cd em folhas de hortaliças (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2013).

O índice de translocação mostra que na dose de 1 mg. L⁻¹ de Cd na solução, o jambu teve capacidade de translocar 42,05% de Cd para as folhas, 25,96% para o caule e 5,66% para a inflorescência, ficando somente 26,32% do total do metal no sistema radicular da planta. Quando se analisa a parte aérea, tem-se que 73,68% do Cd em solução foi particionado pela planta, sobretudo nas folhas. Este comportamento demonstrado neste trabalho, é um contraponto a maioria dos trabalhos que estudam o efeito do Cd em plantas, sobretudo as agrônomicas, pois quando submetidas a presença do metal acionam seu sistemas de defesa produzindo fitoquelatinas e fixando boa parte do Cd na solução nutritiva e no sistema radicular, o que não ocorreu neste trabalho, sobretudo quando o jambu foi exposto a pequenas doses metal. Nascimento *et al.* (2020) destacam que o jambu possui vários compostos com propriedades antioxidantes como flavanóides, aminoácidos (triptofano) e amidas polifenólicas que agem como reguladores de crescimento e defesa de patógenos. Estes compostos podem ter reduzido o efeito do Cd no jambu e promovido uma resposta fisiológica da planta aumentando seu crescimento.

Todavia, com o aumento das doses de Cd percebe-se que a capacidade do jambu em translocar o Cd foi reduzindo, possivelmente pelo sistema de defesa da planta liberando compostos para quelatar o metal (AHMAD *et al.* 2019; JIA *et al.*, 2015).

Os índices de tolerância e eficiência no uso de nutrientes vêm reforçar os dados ora discutidos, demonstrando o comportamento binário do jambu frente ao Cd, que em pequenas doses provoca efeito benéfico na planta e doses elevadas reduz a atividade de uso eficiente de nutrientes, bem como reduz a capacidade de tolerar o metal.

Apesar da exposição de plantas ao Cd provocarem efeitos adversos, sobretudo no aparato fotossintético e absorção de nutrientes, alguns estudos têm demonstrado que o metal em pequenas doses possui efeito indutor no crescimento de algumas plantas. Este conceito é denominado de Hormesis, e ocorre quando há um comportamento bifásico na curva dose-resposta. No momento em que um organismo é submetido a doses crescentes de um agente de estresse, por exemplo, um metal pesado, ele produz uma resposta estimulatória e uma resposta inibitória (RAY; FARRIS; HARTMANN, 2014; PINCELLI-SOUZA *et al.* 2020; CALABRESE; BLAIN, 2009).

Este comportamento também é bem delineado por Ray, Farris e Hartmann (2014) ao demonstrarem o fenômeno da Hormesis. Os autores mostraram que este comportamento é caracterizado por uma curva em U invertido, com uma zona hormética, zona na qual o valor das variáveis estudadas, está acima do valor das mesmas variáveis nas plantas controle. Fenômeno este demonstrado pelo jambu frente a pequenas doses de Cd.

Não obstante ao que já foi demonstrado no presente estudo e trazendo uma nova forma de abordagem para se entender e identificar a Hormesis em plantas, o uso de indicadores multivariados (Ic, Im, If, ICn e Ig), demonstrou que o jambu apresenta efeito de dose/resposta binário, com o Cd em pequenas doses (1 e 3 mg.L⁻¹), induzindo o maior crescimento, ganho de massa, melhor resposta fisiológica e assimilação de nutrientes que as plantas não expostas ao metal. Sobretudo o Ig captou de forma geral o comportamento da planta frente ao cádmio e serviu como instrumento de detecção do fenômeno de Hormese no jambu, indicando que o limiar entre efeito estimulante e inibitório foi de 2,37 mg.L⁻¹ de Cd na solução nutritiva.

3.10 Conclusão

O Cd, em pequenas doses na solução nutritiva, promoveu efeito benéfico no jambu aumentando sua biomassa e seu crescimento, sem comprometer o aparato fotossintético da planta. Em doses acima de 6 mg.L⁻¹, o jambu expressa sinais de toxidez.

O jambu exposto a doses da ordem de 1 a 3 mg.L⁻¹, apresentou alta capacidade de translocação de partição do metal da raiz e acumulação em sua parte aérea. Quando submetido a 1 mg.L⁻¹ de Cd, O jambu submetido a 1 mg.L⁻¹ de Cd absorveu em sua parte aérea 1,35mg.kg⁻¹, ultrapassando em mais de 6 vezes ao limite máximo permitido pela ANVISA para hortaliças folhosas que é de 0,2 mg.kg⁻¹ de Cd.

Os indicadores multivariados trouxeram neste estudo uma nova abordagem metodológica para mensurar os efeitos de metais pesados em plantas e mostram o jambu com comportamento binário e efeito dose/resposta, o que o caracteriza como uma planta que apresenta efeito hormético. Sobretudo o Ig indica a dose de 2,37 mg.L⁻¹ de Cd em solução nutritiva como limiar entre efeito estimulante e inibitório.

Em suma o jambu, não é uma espécie hiperacumuladora de Cd, porém possui capacidade de fitoextração e acumulação do elemento nos seus tecidos.

Necessário salientar que muitas áreas de cultivo da planta estão instaladas na zona periurbana de Belém, próximas a indústrias de couro, tintas, metalurgia, áreas de descarte

irregular de resíduos sólidos (lixões), entre outras. Como o jambu possui capacidade de fitoextração e acumulação de Cd, é necessário o estabelecimento de políticas ambientais com vistas ao monitoramento de metais pesados nos solos usados para plantio da cultura, redução de material particulado nas áreas de entorno dos cultivos, maior atenção para adubação fosfatada no manejo da planta, bem como novas pesquisas para se identificar quais outras espécies tóxicas o jambu é tolerante.

REFERÊNCIAS

AHMAD, J.; ALI, A. A.; BAIG, M. A.; IGBAL, M.; QURESHI, I. Role of phytochelatin in cadmium stress tolerance in plants. *In: HASANUZZAMAN, M.; PRASAD, M. N. V.; FUJITA, M. (Ed.). Cadmium Toxicity and Tolerance in Plants*. Academic Press, p.186-212, 2019.

ALLOWAY, B. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. **Environmental Pollution**, 3 ed, n.22, 2013. 614p.

ANDRADE, J. C. M.; TAVARES, S. R. L.; MAHLER, C. F. **Fitorremediação: o uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental**. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2014. 107p.

BEZERRA NETO, E. B.; BARRETO, L. P. As técnicas de hidroponia. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, Recife, vols. 8 e 9, p.107-137, 2011/2012.

BHARGAVA, A.; CARMONA, F.F.; BHARGAVA, M.; SRIVASTAVA, S. Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. **J. Environ. Manage**, v.105, p.103-120, 2012.

CAKMAK, I; HORST, W. Effect of aluminium on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). *Physiol. Plant.*, v. 83, p. 463-468, 1991.

CASTRO, G. L.S.; SILVA JR. D. D.; BUENO, A. C. S. O.; SILVA, G. B. Anthracnose in açai palm leaves reduces leaf gas exchange and chlorophyll a fluorescence. **Trop. plant pathol.**, v.42, p.13-20, 2017.

CASTRO, G. L. S.; SILVA JÚNIOR, D. D.; VIANA, R. G.; REGO, M. C. F. SILVA, G. B. Photosynthetic apparatus protection and drought effect mitigation in açai palm seedlings by rhizobacteria. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 41, n. 163, p.1-12, 2019.

CALABRESE, E. J.; BLAIN, R. B. Hormesis and plant biology. **Environmental Pollution**. n.159, p.42-48, 2009.

COSTA, V. C. N.; SILVA JUNIOR, M. L.; SAMPAIO, I. M. G.; BITTENCOURT, R. F. P. M.; FIGUEIREDO, S. P. R.; SANTOS, G. A. M.; SOUZA, L. R.; OLIVEIRA, E.S. Nitrogen Fertilization and Liming Improves Growth, Production, Gas Exchange and Post-Harvest Quality of Yellow Flower Jambu. **Journal of Agricultural Studies**, v.8, n.3, 756-774, 2020.

DILLON, W. R.; GOLDSTEIN, M. **Multivariate analysis: methods and applications**. New York: John Wiley & Sons, 1984.

DIXIT, R.; WASIULLAH, M.D.; PANDIYAN, K.; SINGH, U.B.; SAHU, A.; SHUKLA, R.; SINGH, B.P.; RAI, J.P.; SHARMA, P.K.; LADE, H.; PAUL, D. Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: an overview of principles and criteria of fundamental processes. **Sustainability**, v.7, p.2189–2212, 2015.

GUIMARÃES, M. A.; SANTANA, T. A.; SILVA, E. V.; ZENZEN, I. L. LOUREIRO, M. E. Toxicidade e tolerância ao cádmio em plantas. **Revista Tropica – Ciências Agrárias e Biológicas**, v.1, n.3, p.58-68, 2008.

HAIR, J. F., et al. **Análise multivariada de dados**. 6.ed. Porto Alegre: Editora, Bookman, 2009. 688p.

HANAHAM, S. E. **Environmental Chemistry**. 9.ed. CRC Press, 2013. 773p.

HOAGLAND, D.R.; ARNON, D.I. The water–culture method for growing plants without soil. California Agricultural Experiment Station Circular 347. *In: College of Agriculture*. University of California. Berkeley, 1950.

HUSSAIN, A.; ALI, S.; RIZWAN, M. ZIA-UR-REHMAN, M.; YASMEEN, T.; HAYAT, M. T.; HUSSAIN, I.; ALI, Q.; HUSSAIN, S. M. Morphological and Physiological Responses of Plants to Cadmium Toxicity. *In: HASANUZZAMAN, M.; PRASAD, M. N. V.; FUJITA, M. Cadmium Toxicity and Tolerance in Plants*. Academic Press, 2019, p.47-72.

HUNGRIA, L.C.; OLIVEIRA, E.S.; SAMPAIO, I.M.G.; SOUZA, E.D.; FERNANDES, A.R. Tolerância de plantas de jambu (*Acmella oleracea*) cultivadas em solo contaminado por cádmio. **Braslian Journal of Development**, n.11, v.5, p.26211-26219, 2019.

IBM. **SPSS Statistics version 25**. [S.l.]: IBM, 2018.

JIA, L.; HE, X.; CHEN, W.; LIU, Z.; HUANG, Y.; YU, S. Hormesis phenomena under Cd stress in a hyperaccumulator *Lonicera japonica* Thunb. **Ecotoxicology**, v.22, p476-485, 2013.

JIA, L.; LIU, Z.; CHEN, W.; YE, Y. YU, S.; HE, X. Hormesis effects induced by cadmium on growth and photosynthetic performance in a hyperaccumulator, *Lonicera japonica* Thunb. **Journal of plant Growth Regulation**, n.34, p.13-21, 2015.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. New Jersey: Prentice-Hall, 2007. 773p

KABATA-PENDIAS, A. Cadmium. *In*: KABATA-PENDIAS, A. (ed). **Trace elements in soils and plants**. CRC Press, Boca Raton, 2010, p. 287–304.

KHAN, A.; KHAN, S.; ALAM, M.; KHAN, M. A.; AAMIR, M.; QAMAR, Z.; REHMAN, Z. U.; PERVEEN, S. Toxic metal interactions affect the bioaccumulation and dietary intake of macro- and micro-nutrients. **Chemosphere**, v. 146. p121-128, 2016.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v.15, n. 3, p.259-263, 2006.

KURDZIEL, B.M.; PRASAD, M.N.V.; STRZALKA, K. Photosynthesis in heavy metal stressed plants. *In*: PRASAD, M.N.V. **Heavy metal stress in plants: From biomolecules to ecosystems**. 2 ed. Springer. 2004, p.146-181.

MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. Academic Press Elsevier, 2012. 649p.

MINISTÉRIO DA SAÚDE - AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Instrução Normativa Nº 28, que Estabelece as listas de constituintes, de limites de uso, de alegações e de rotulagem complementar dos suplementos alimentares. **Diário Oficial da União**, 27 jul. 2018, edição: 144, seção: 1, p. 141, 2018.

MINISTÉRIO DA SAÚDE - AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução RDC nº 42, de 29 de agosto de 2013**. Dispõe sobre o Regulamento Técnico MERCOSUL sobre Limites Máximos de Contaminantes Inorgânicos em Alimentos. Brasil: Ministério da Saúde: ANVISA, 2013. Disponível em: https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2013/rdc0042_29_08_2013.html. Acesso em: 23 ago. 2019.

NASCIMENTO, L.E.S.; ARRIOLA, N.D.A.; SILVA, L.A.L.; FAQUETI, L.G.; SANDJO, L.P.; ARAÚJO, C.E.S.; BIAVATTI, M.W.; BARCELOS-OLIVEIRA, J.L.; AMBONI, R.D.M.C. Phytochemical profile of different anatomical parts of jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen): a comparison between hydroponic and conventional cultivation using PCA and cluster analysis. **Food Cremistry**, n.332, p.1-12, 2020.

NOGUEIROL, R. C.; MONTEIRO, F. A.; SOUZA JUNIOR, J. C.; AZEVEDO, R. A. NO₃-/NH₄⁺ proportions affect cadmium bioaccumulation and tolerance of tomato. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 1, p. 1-13, 2018.

PEREIRA JUNIOR, J.B; DANTAS, K.G.F. Evaluation of inorganic elements in cat's claw teas using ICP OES and GF AAS. **Food Chemistry**, v.196, p.331–337, 2016.

PEREIRA, B. F. F.; ROZANE, D. E.; ARAÚJO, S. R.; BARTH, G.; QUEIROZ, R. J. B.; NOGUEIRA, T. A. R.; MORAES, CABRAL, C. P.; BOARETTO, A. E.; MALAVOLTA, E. Cadmium availability and accumulation by lettuce and rice. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** [online], v. 35, p. 645-654, 2011.

PERFUS-BARBEOCH, L.; LEONHARDT, N.; VAVASSEUR, A.; FORESTIER, C. Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status. **The Plant Journal**, n.32, v.4, p.39–548, 2002.

PINCELLI-SOUZA, R.P.; BORTOLHEIRO, F. P.A.P.; CARBONARI, C. A.; VELINI, E. D.; SILVA, M. A. Hormetic effect of glyphosate persists during the entire growth period and increases sugarcane yield. **Pest Management Science**, v.76, p.2388-2394, 2020.

PILIPOVIĆ, A.; ZALESNY JR, R. S.; RONČEVIĆ, S.; NIKOLIĆ, N.; ORLOVIĆ, S.; BELJIN, J; KATANIĆ, M. Growth, physiology, and phytoextraction potential of poplar and willow established in soils amended with heavy-metal contaminated, dredged river sediments. **Journal of Environmental Management**, v.239, n.1, p.352-365, 2019.

POSCHENRIEDER, C. CABOT, C.; MARTOS, S.; GALLEGGO, B.; CARVELÓ, J. Do toxic ions induce hormesis in plants? **Plant Science**, n.212, p15-25, 2013.

QIN, S.; LIU, H.; NIE, Z.; RENGEL, Z.; GAO, W.; ZHAO, P. Toxicity of cadmium and its competition with mineral nutrients for uptake by plants: a review. **Pedosphere**, v.30, n. 2, p.168-180, 2020.

RAY, SD.; FARRIS, F.F.; HARTMANN, A. C. Hormesis. *In*: WEXLER, O. (Ed.). **Encyclopedia of toxicology**. Academic Press: Elsevier, p.944-948, 2014.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Version 3.5.1. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2018.

RAI, P. K.; LEE, S. S.; ZHANG, M.; TSANG, M.; KIM, K. Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms, and management. **Environment International**, v.125, p.365-385, 2019.

RIZWAN, M.; ALI, S.; ADREES, M.; IBRAHIM, I.; TSANG, D. C.W.; ZIA-UR-REHMAN, M.; ZAHIR, Z. A.; RINKLEBE, J.; TACK, F. M.G.; OK, Y. S. A critical review on effects, tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables. **Chemosphere**, v.182, p.90-105, 2017.

SAMPAIO, I. M. G.; SILVA JUNIOR, M. L.; CHAGAS, E. S.; BITTENCOURT, R. F. P. M.; COSTA, V. C. N.; SOUZA, D. L. SANTOS, W. A. S.; TEIXEIRA, B. J. B. Evaluation of the Non-destructive Method Efficiency of Estimating Nitrogen Content in Jambu Plants Grown in Hydroponic System. **Journal of Agricultural Studies**, v.8. n.2, p.466-479, 2020.

SAMPAIO, I. M. G.; GUIMARÃES, M. A.; NETO, H. S. L; MAIA, C. L.; VIANA, C. S.; GUSMÃO, S. A. L. Pode o uso de mudas agrupadas e a maior densidade de plantio aumentar a produtividade de jambu? **Rev. Cienc. Agrar.**, v. 61, p1-8, 2018.

SANTANA, A. C. Métodos quantitativos em economia: elementos e aplicações. Belém: UFRA, 2003.

SANTANA, A. C.; SANTANA, A. L. Mapeamento e análise de arranjos produtivos locais na Amazônia. **Teoria e Evidencia Econômica**, v.12, n.1, p.9-34, 2004.

SANTANA, A. C. **Elementos de economia, agronegócio e desenvolvimento local**. Belém: GTZ; TUD; UFRA, 2005.

SHANMUGARAJ, B. M.; MALLA, A.; RAMALINGAM, S. Cadmium stress and toxicity in plants: An overview. In: HASANUZZAMAN, M. *et al.* (Ed). **Cadmium toxicity and tolerance in plants**. Academic Press: Elsevier, 2019. 619p.

SMOLDERS, E.; MERTENS, J. Cadmium. In: ALLOWAY, B.; TREVORS, J. T. 3.ed. **Heavy metals in soil**, Springer, 2013. p.283-311.

SOLÍS-DOMINGUEZ, F.A.; GONZÁLEZ-CHÁVEZ, M.C.; CARRILLO-GONZÁLEZ, R.; RODRIGUEZ-VAZQUEZ, R., Accumulation and localization of Cadmium in *Echinochloa polystachya* grown within a hydroponic system. **Journal of Hazardous Material**, n. 141 v. 3, p.630 - 636, 2007.

SYTAR, O.; BRESTIC, M.; TARAN, N.; ZIVCAK, M. Plants Used for Biomonitoring and Phytoremediation of Trace Elements in Soil and Water. **Plant Metal Interaction**, p.361–384. 2016.

SWIADER, J.M.; CHYAN, Y.; FREIJI, F.G. Genotypic differences in nitrate uptake and utilization efficiency in pumpkin hybrids. **Journal of Plant Nutrition**, v.17, n.10, p.1687 - 1699, 1994.

ZARE, A. A.; KHOSHGOFTARMANESH, A. H.; MALAKOUTI, M. J.; BAHRAMI, H. A.; CHANEY, R. L. Root uptake and shoot accumulation of cadmium by lettuce at various Cd:Zn ratios in nutrient solution. **Ecotoxicol. Environ. Saf.**, v. 148, p. 441-446, 2018.

ZEITTOUNI, C. F.; BERTON, R. S.; ABREU, C. A. Fitoextração de cádmio e zinco de um latossolo vermelho-amarelo contaminado com metais pesados. *Bragantia*, Campinas, v.66. n.4, p. 649-657, 2007.

YING, R. R.; QIU, R. L.; TANG, Y. T.; HU, P. J.; QIU, H.; CHEN, H. R.; SHI, T. H.; MOREL, J. L. Cadmium tolerance of carbon assimilation enzymes and chloroplast in Zn/Cd hyperaccumulator *Picris divaricata*. **Journal of Plant Physiology**, v.167, n.2. p.81-87, 2010.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa tese possibilitou a avaliação integrada das informações experimentais, através da composição de indicadores que refletiram a resposta sistêmica da planta nas dimensões de crescimento, ganho de massa, fisiológica e nutricional. Essa abordagem de análise multivariada permitiu reduzir o número de variáveis a serem analisadas, facilitando a compreensão da relação de causa e efeitos nos estudos de selênio e cádmio com o jambu.

Desta forma os indicadores permitiram estabelecer os níveis de selênio com efeito benéfico, tolerável e letal para a planta. Possibilitando o estabelecimento de limiares entre efeito benéfico e tóxico.

A abordagem metodológica via indicadores também permitiu desvendar, de forma integrada, o potencial de utilização da hortaliça jambu em experimentos de biofortificação com Se, culminando no estabelecimento da dose ótima para a melhor absorção do elemento nas partes comestíveis do jambu, assim como a quantidade diária de jambu biofortificado a ser ingerido.

Contudo, esta pesquisa abre novos horizontes de investigação com outros nutrientes, a do ferro e o zinco que também apresentam deficiência em alguns alimentos e podem ser adicionados ao jambu para fins de biofortificação.

Não obstante, as respostas que o jambu forneceu frente à exposição ao selênio e ao cádmio fez emergir um comportamento até então inesperado: a capacidade da planta de acumular o metal pesado com efeitos estimulatórios até a concentração de $2,37 \text{ mg.L}^{-1}$ de Cd na solução nutritiva. Este comportamento, denominado de efeito hormético, foi mais bem compreendido através da utilização dos indicadores multivariados, podendo-se evidenciar a relação de dose/resposta, com efeito, estimulatório e inibitório, bem como a curva em forma U invertido descrita pelos indicadores e característica que organismos que apresentam efeito hormético.

Portanto, a metodologia utilizada foi adequada para a resolução do problema de pesquisa e objetivos propostos nesta tese. As hipóteses puderam ser comprovadas e evidenciaram a capacidade do jambu de tolerar e acumular o elemento metálico cádmio, e, também da possibilidade da hortaliça ser biofortificada a doses crescentes de selênio desde que respeitados os limites de toxidez da planta que neste estudo foi da ordem de concentração de 5 mg.L^{-1} e concentração ótima de $2,98 \text{ mg.L}^{-1}$ de Se.

É importante destacar a necessidade de aprofundamento de pesquisas sobre quais metais pesados o jambu pode acumular, pois sendo uma hortaliça amplamente utilizada na gastronomia regional, o efeito cumulativo da ingestão de jambu contaminado com metais pode ser extremamente danoso para a população.

Como perspectivas futuras, deve-se estudar o comportamento do jambu para elementos-traço considerados nutrientes, assim como aqueles que não possuem função nutricional em plantas e animais, mas podem exercer efeito deletério para saúde.

Limitações e dificuldades da pesquisa

Dada as características do desenho experimental que se propôs esta pesquisa com estudo específico para o comportamento da hortaliça jambu cultivada em hidroponia com exposição ao elemento cádmio e selênio, as conclusões e discussões apresentadas não podem ser extrapoladas para outras formas de cultivo, bem como outras hortaliças ou exposição a outros metais pesados. Demandando estudos específicos para cada nutriente e tipo de cultivo.

Por trata-se de uma pesquisa de natureza experimental desenvolvida em casa de vegetação nas dependências da Universidade Federal Rural da Amazônia, a principal dificuldade da pesquisa foi com a obtenção de acesso as instalações experimentais na universidade dado o contexto de pandemia global que se deu na finalização das análises químicas, biométricas e fisiológicas. Além dos impactos deste cenário na saúde emocional e física do pesquisador.