



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
CURSO DE AGRONOMIA**

DAVI JOSÉ FARIAS TENÓRIO

**SILÍCIO E SELÊNIO IN VITRO: IMPACTOS NA ACLIMATIZAÇÃO E
MORFOFISIOLOGIA DE PLANTAS DE BATATA-DOCE**

FORTALEZA

2025

DAVI JOSÉ FARIAS TENÓRIO

SILÍCIO E SELÊNIO IN VITRO: IMPACTOS NA ACLIMATIZAÇÃO E
MORFOFISIOLOGIA DE PLANTAS DE BATATA-DOCE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Agronomia do Centro de Ciências
Agrárias da Universidade Federal do Ceará,
como parte das exigências requeridas para
obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Almeida
Guimarães.

Coorientadora: Profa. Dra. Gabrielen de Maria
Gomes Dias

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

T286s Tenório, Davi José Farias.

Silício e Selênio in vitro : impactos na aclimatização e morfofisiologia de plantas de batata-doce / Davi José Farias Tenório. – 2025.

38 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Curso de Agronomia, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Marcelo de Almeida Guimarães.

Coorientação: Profa. Dra. Gabrielen de Maria Gomes Dias.

1. Ácido silícico. 2. Ipomoea batatas L. 3. Micropropagação. 4. Microscopia. 5. Selenito de sódio. I. Título.
CDD 630

DAVI JOSÉ FARIAS TENÓRIO

SILÍCIO E SELÊNIO IN VITRO: IMPACTOS NA ACLIMATIZAÇÃO E
MORFOFISIOLOGIA DE PLANTAS DE BATATA-DOCE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Agronomia do Centro de Ciências
Agrárias da Universidade Federal do Ceará,
como parte das exigências requeridas para
obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Aceito em: 30/07/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo de Almeida Guimarães (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Gabrielen de Maria Gomes Dias (Coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Lailla Sabrina Queiroz Nazareno
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Ms. Jorge Braga Ribeiro Junior
Universidade Federal de Lavras (UFLA)

A Deus,

Aos meus pais,

À minha esposa,

Aos meus mestres,

Aos meus familiares e amigos,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar, pela grande oportunidade, pelo cuidado e pela força que me concedeu. Agradeço também aos meus pais, Ivânia Sena e José Tenório, por se constituírem minha base sólida, transmitindo valores que nunca serão esquecidos;

À minha esposa Evelyn Tenório, que elevou o nível do vocabulário apoio, estando ao meu lado nos momentos mais difíceis e não me deixando desistir na última hora;

À professora Dr^a. Gabrielen de Maria Gomes Dias, pela confiança que me deu nas atividades, pela paciência e pelos muitos ensinamentos;

Ao professor Dr. Marcelo de Almeida Guimarães, pela disposição e disponibilidade, pelos ensinamentos transmitidos e pela dedicação em ser um mestre;

À professora Dr^a. Cândida Hermínia Campos de Magalhães Bertini e ao professor Dr. Júlio César do Vale, pelos ensinamentos, pelas oportunidades, e pelos conselhos valiosos;

Aos meus irmãos e meus familiares, pela paciência, compreensão e suporte, ao longo dessa jornada;

Aos irmãos que a UFC me concedeu, em especial a George 'Japa' Moura, e a todo o chonps, que tornou o caminho mais leve, como deve ser;

Aos amigos do Laboratório de Cultura de Tecidos Vegetais da UFC, pelas experiências e conhecimentos partilhados;

À Universidade Federal do Ceará, por ter as portas abertas, e a todos os professores, pela dedicação;

À CAPES, pelo acesso CAFé.

“Os que semeiam com lágrimas, colherão com cânticos de alegria. Aquele que leva a preciosa semente, andando e chorando, voltará com cânticos de alegria, trazendo consigo os seus feixes”.

Sl 126: 5,6.

RESUMO

A batata-doce (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) é um alimento muito importante na segurança alimentar da população mundial, principalmente por sua rusticidade e cultivo relativamente simples. Dentre os métodos de sua propagação, destaca-se a cultura de tecidos, que além de fornecer mudas livres de fitopatógenos, possibilita alterações no meio de cultura, visando fins específicos. O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos na aclimatização e desenvolvimento de plantas de batata-doce cv. Campina, a partir de mudas suplementadas com silício e selênio in vitro. Os explantes foram inoculados em meio de cultura Murashige & Skoog (MS), adicionado de 30 g L^{-1} de sacarose e solidificado com 6 g L^{-1} de ágar, com pH ajustado para 5,8. Os explantes foram tratados com as seguintes concentrações: T1- controle (MS sem suplementação de silício e ou selênio), T2- $10.405\text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ de ácido silícico (H_4SiO_4) (Si), T3- $10.405\text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ de Si + $15\text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ de selenito de sódio (Na_2SeO_3) (Se), T4- $10.405\text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ de Si + $20\text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ de Se, T5- $10.405\text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ de Si + $25\text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ de Se e T6- $10.405\text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ de Si + $30\text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ de Se. As plantas foram retiradas dos frascos após 60 dias de inoculação e lavadas em água corrente para remoção dos resíduos de meio de cultura aderido às raízes, transplantadas em recipientes preenchidos com substrato e aclimatizadas em casa de vegetação. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, contendo 5 repetições cada tratamento, totalizando 30 parcelas experimentais. Parâmetros biométricos foram avaliados aos 7, 30 e 70 dias após o transplantio (DAT), aos 60 dias, os pigmentos fotossintéticos, aos 70 dias, caracteres ultraestruturais, e aos 180 dias, acúmulo de biomassa. Aos 7 dias houve diferença estatística para o parâmetro de comprimento da parte aérea para os tratamentos T1 e T2 com desempenho superior (médias de 18,50 cm e 14,38 cm, respectivamente). O tratamento com concentração de $30\text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ de Se, combinado com silício, possibilitou os melhores índices de clorofila e carotenoides, além de maior biomassa de raízes. Nas micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), foram evidenciadas variações graduais na morfologia estomática, especialmente na abertura do ostíolo e na definição das bordas cuticulares. A aplicação conjunta de silício e selênio mostrou-se eficiente para melhorar a qualidade das mudas durante a aclimatização, e no desenvolvimento das plantas de batata-doce cv. Campina em casa de vegetação.

Palavras-chave: Ácido silícico; *Ipomoea batatas* L; micropropagação; microscopia; selenito de sódio.

ABSTRACT

Sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) is a very important food source for the global population's food security, primarily due to its hardiness and relatively simple cultivation. Among its propagation methods, tissue culture stands out, which, in addition to providing plant pathogen-free seedlings, allows for changes in the culture medium and specific movements. The objective of this study was to evaluate the effects on the acclimatization and development of sweet potato cv. Campina plants, from seedlings supplemented with silicon and selenium in vitro. The explants were inoculated into Murashige & Skoog (MS) culture medium, added with 30g L⁻¹ of sucrose, and solidified with 6g L⁻¹ of agar, with a pH adjusted to 5.8. The explants were treated with the following concentrations: T1- control (MS without silicon and/or selenium supplementation), T2- 10.405 µmol L⁻¹ of silicic acid (H₄SiO₄) (Si), T3- 10.405 µmol L⁻¹ of Si + 15 µmol L⁻¹ of sodium selenite. (Na₂SeO₃) (Se), T4- 10.405 µmol L⁻¹ Si + 20 µmol L⁻¹ Se, T5- 10.405 µmol L⁻¹ Si + 25 µmol L⁻¹ Se and T6- 10.405 µmol L⁻¹ Si + 30 µmol L⁻¹ Se. The plants were removed from the flasks after 60 days of inoculation and washed in running water to remove the culture medium residues adhered to the roots, transplanted into containers filled with substrate and acclimatized in a greenhouse. The experimental design was randomized, containing 5 replicates per treatment, totaling 30 experimental plots. Biometric parameters were evaluated at 7, 30, and 70 days after transplantation (DAT). Photosynthetic pigments were evaluated at 60 days, ultrastructural traits were evaluated at 70 days, and biomass accumulation was evaluated at 180 days. At 7 days, there was a statistically significant difference in shoot length for treatments T1 and T2, with superior performance (averages of 18.50 cm and 14.38 cm, respectively). The treatment with a concentration of 30 µmol L⁻¹ Se, combined with silicon, resulted in the best chlorophyll and carotenoid indices, in addition to greater root biomass. Scanning electron microscopy (SEM) micrographs revealed gradual variations in stomatal morphology, especially in ostiole opening and cuticular margin definition. The combined application of silicon and selenium proved effective in improving seedling quality during acclimatization and in the development of sweet potato cv. Campina plants in a greenhouse.

Keywords: *Ipomoea batatas* L.; micropropagation; microscopy; sodium selenite; silicic acid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Temperaturas internas da casa de vegetação durante o período de desenvolvimento das plantas de batata-doce var. Campina	19
Figura 2 –	Mudas micropropagadas de batata-doce var. Campina, submetidas a diferentes concentrações de selênio e silício. a) cobertas com copo plástico, e b) após sete dias da aclimatização em casa de vegetação	20
Figura 3 –	Presença de insetos-praga e inimigos naturais encontrados durante o experimento. a) <i>Bemisia spp.</i> b) <i>Spodoptera spp.</i> e c) <i>Chalcididae</i>	21
Figura 4 –	Plantas de batata-doce cv. Campina em vasos na casa de vegetação, submetidos a diferentes concentrações de silício e selênio in vitro. a) aos 7 dias de aclimatização; b) aos 30 dias; c) aos 70 dias de desenvolvimento ...	22
Figura 5 –	Eletromicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da epiderme abaxial foliar de plantas micropropagadas sob diferentes tratamentos com silício (Si) e selenito de sódio (Se), e aclimatizadas a 70 dias. Barra ~30 μ m	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Resultado da análise do substrato utilizado no experimento	20
Tabela 2 –	Composição do adubo mineral Forth® Hortaliças	21
Tabela 3 –	Número de folhas (NF), diâmetro do ramo principal (DR) e comprimento da parte aérea (CPA) de plantas de batata-doce cv. Campina, aclimatizadas após a suplementação com Se e Si in vitro por 60 dias	26
Tabela 4 –	Massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA), massa fresca de raízes (MFR) e massa seca de raízes (MSR), aos 180 dias de desenvolvimento, em casa de vegetação, de plantas de batata-doce cv. Campina após a suplementação com Se e Si in vitro por 60 dias	28
Tabela 5 –	Teores de pigmentos fotossintéticos clorofila α (CHL α), clorofila β (CHL β), clorofilas totais (CHLt) e carotenoides totais (CARt), aos 70 dias de desenvolvimento, em casa de vegetação, de plantas de batata-doce cv. Campina após a suplementação com Se e Si in vitro por 60 dias.....	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1	Batata-doce.....	13
2.2	Micropropagação.....	14
2.3	Silício.....	15
2.4	Selênio.....	16
3	MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1	Produção de mudas in vitro	18
3.2	Localização e caracterização da área experimental	18
3.3	Aclimatização das mudas	19
3.4	Manejo integrado de pragas	21
3.5	Descrição das parcelas e delineamento experimental	22
3.6	Avaliações e análises	22
3.6.1	<i>Avaliações biométricas</i>	22
3.6.2	<i>Quantificação de pigmentos</i>	23
3.6.3	<i>Análises ultraestruturais</i>	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1	Biometria.....	25
4.2	Teor de matéria fresca e seca	27
4.3	Pigmentos fotossintéticos	29
4.4	ANÁLISE ULTRAESTRUTURAL	30
5	CONCLUSÃO.....	33
	REFERÊNCIAS.....	34

1 INTRODUÇÃO

A batata-doce (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) é uma planta muito importante para a agricultura familiar no Brasil e no mundo. Sua rusticidade, adaptabilidade e produtividade a tornam fundamental para a segurança alimentar, sendo fonte de carboidratos, minerais, vitaminas e antioxidantes. Essa planta é amplamente cultivada na América do Sul, África e Sudeste Asiático (Oliveira *et al.*, 2023). No entanto, sua propagação convencional por ramos enfrenta limitações críticas: baixa taxa de multiplicação, acúmulo de degenerescência genética e disseminação de patógenos (Ramos, 2019; Pinto, 2021). Nesse contexto, a micropropagação surge como alternativa viável, assegurando produção de mudas em larga escala, com qualidade fitossanitária e estabilidade genética (Scherwinski-Pereira; Costa; Guedes, 2009; Andrade, 2022).

A etapa de aclimatação, porém, é crítica, pois as mudas passam de um ambiente in vitro, controlado e asséptico, para condições ambientais naturais. A ausência de cera epicuticular, a regulação estomática ineficaz e a baixa densidade de tricomas, tornam essas plântulas vulneráveis a estresses, resultando em queimaduras foliares, murcha e até a morte (Sharma *et al.*, 2023). Assim, o uso de elementos benéficos, como silício (Si) e selênio (Se), podem promover melhorias significativas nessa fase de transição.

O silício, que é depositado na forma de sílica amorfa nas paredes celulares, possibilita maior resistência mecânica das plantas, maior índice de fotossíntese, controle estomático e redução da perda de água por transpiração (Mir *et al.*, 2022; Ponce *et al.*, 2022). Além destes também aumenta a síntese de compostos antioxidantes e fenólicos, protegendo as plantas de patógenos e estresses abióticos, como salinidade, seca e metais pesados (Mir *et al.*, 2022), todos esses fatores contribuem para o sucesso da aclimatização (Kordrostami *et al.*, 2023; Oliveira *et al.*, 2023).

O selênio, por sua vez, é absorvido como selenato e selenito, podendo atuar como cofator de enzimas antioxidantes, como a glutationa peroxidase, reduzindo as espécies reativas de oxigênio (ERO) e conferindo maior tolerância ao estresse oxidativo (Hasanuzzaman; Fujita, 2011; Xiang *et al.*, 2022). No entanto, em altas concentrações, pode ser fitotóxico, sendo seu uso condicionado a um manejo adequado (Dimkovikj *et al.*, 2015; White, 2018; Kordrostami *et al.*, 2023).

Em estudos recentes foi observado que a aplicação simultânea de Si e Se pode ter efeito sinérgico na aclimatação e desenvolvimento de plântulas micropagadas. Ambos os

elementos contribuem para a integridade estrutural e funcional das mudas, elevando a taxa de sobrevivência, a eficiência fisiológica e a produtividade (Ponce *et al.*, 2022).

O presente estudo teve por objetivo avaliar os efeitos na aclimatização e desenvolvimento de plantas de batata-doce cv. Campina, a partir de mudas suplementadas com silício e selênio in vitro.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Batata-doce

A batata-doce (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) é uma espécie herbácea, de ciclo perene, pertencente à família Convolvulaceae, embora seja cultivada como planta anual na maioria dos sistemas agrícolas. A batata-doce tem hábito de crescimento, predominantemente, espalhado, com ramos longas, finas e flexíveis, podendo, em algumas cultivares, ter hábito de crescimento ereto, semi-ereto e muito espalhado (Huamari, 1992). Trata-se de uma cultura de elevada rusticidade, de ampla adaptação, alta tolerância à seca e baixo custo de produção (Embrapa, 2021).

Seu sistema radicular é fasciculado, composto por raízes adventícias originadas dos nós das ramos, sendo que parte dessas raízes sofre hipertrofia dos tecidos de reserva, formando raízes tuberosas, que são os principais órgãos de interesse agronômico. O caule é cilíndrico, com seu comprimento dependendo do hábito de crescimento da cultivar. Cultivares eretos tem caules de aproximadamente um metro, ao passo que cultivares de crescimento muito espalhado podem atingir mais de cinco metros. A cor do caule também varia de acordo com a cultivar, podendo ser verde ou arroxeados, com ou sem a presença de tricomas na epiderme (Huamari, 1992).

As folhas são simples, alterna-espiraladas, sustentadas por pecíolos longos, com formas altamente variáveis, que podem ser arredondadas, cordiformes, lobadas ou palmadas. As flores são hermafroditas, gamopétalas, com cinco pétalas unidas em forma de funil, de coloração que varia do branco ao roxo, a depender do cultivar. O fruto da batata-doce é do tipo cápsula, de formato arredondado, seco e bilocular, com diâmetro que varia entre 3 e 7 milímetros. Pode ter superfície glabra ou pubescente, e possui um apículo terminal deiscente. Quando imaturos, os frutos têm coloração característica de cada cultivar, variando do verde-claro à púrpura escura; já os frutos secos têm coloração marrom-clara a escura. Cada cápsula pode conter até quatro sementes (Jones; Dukes, 1976).

O ciclo de desenvolvimento da batata-doce segue três fases principais: (1) o crescimento das raízes adventícias; (2) início da tuberização; e (3) acúmulo de fotoassimilados nas raízes tuberosas (Erpen *et al.*, 2013). Essa arquitetura radicular dinâmica, especialmente a formação de raízes tuberosas como sumidouros de fotoassimilados, torna-se crítica em protocolos de micropopulação, pois requer ajustes precisos para induzir não apenas o

enraizamento, mas a iniciação precoce de estruturas de reserva (Scherwinski-Pereira; Costa; Guedes, 2009).

Mesmo sendo uma espécie notadamente rústica, existem condições que são ótimas para a produção, e limites inferiores e superiores, os quais, se ultrapassados, podem gerar diminuição da produtividade. A exigência hídrica da batata-doce é de uma lâmina de 500mm de água para um ciclo de 110 a 140 dias, não suportando umidade do solo abaixo de 20%. No início da tuberização, alagamentos podem reduzir o número de raízes de reserva pela escassez de oxigênio na rizosfera, já na fase final de produção, pode comprometer a qualidade das tuberas (Valenzuela *et al.*, 1994).

A temperatura também exerce grande influência no desenvolvimento e produção da batata-doce, e tanto temperaturas baixas, quanto temperaturas altas podem comprometer a produção, sendo o ótimo para a cultura temperaturas noturnas em torno de 20°C, e diurnas em torno de 30°C, sendo a temperatura média ótima em torno de 25,5°C. Temperaturas mais elevadas favorecem a produção de biomassa de folhas e caules, e promovem redução nos tecidos de reserva (Embrapa, 2021). Considerando essas exigências fisiológicas e estruturais da cultura, é fundamental compreender como a micropropagação pode atender a essas necessidades para o sucesso do cultivo.

2.2 Micropopragação

A micropopragação, ou cultura de tecidos vegetais, consiste no cultivo de fragmentos de plantas (explantes) em meio nutritivo sob condições assépticas e controladas de luz, temperatura e umidade. Essa técnica permite a obtenção de elevadas taxas de multiplicação de plantas, a partir de um único explante, além de gerar mudas uniformes, livres de patógenos e com elevado padrão genético e fitossanitário (Shaji *et al.*, 2019). No caso da batata-doce, espécie propagada vegetativamente, a micropopragação é fundamental para superar problemas como a baixa disponibilidade de sementes verdadeiras, acúmulo de degenerescência genética e disseminação de doenças via ramos (Donyina *et al.*, 2025), além de permitir a manipulação do meio de cultura com elementos específicos, afim de realizar estudos ou protocolos de biofortificação.

As principais etapas do processo incluem: (1) seleção e desinfestação dos explantes (gemas apicais, segmentos nodais); (2) inoculação em meio de cultura inicial; (3) multiplicação de brotações, geralmente induzida por citocininas como BAP (6-benzilaminopurina) e BA (benziladenina), que estimulam a formação de gemas axilares; (4) enraizamento das plântulas

com auxílio de auxinas como AIA (ácido indolacético), AIB (ácido indolbutírico) ou ANA (ácido naftalenoacético); e (5) aclimatação gradual das plantas ao ambiente ex vitro, com ajuste progressivo da umidade, da luminosidade e da ventilação (Quisen; Angelo, 2008; Donyina *et al.*, 2025). A inserção de elementos benéficos no meio de cultura, como o silício e o selênio, pode ser feita já nas fases iniciais da micropropagação, especialmente na multiplicação e enraizamento, influenciando diretamente o desempenho das mudas na fase de aclimatização.

A técnica é crucial para superar limitações da propagação convencional, (Andrade Júnior *et al.*, 2009; Ramos, 2019), e a disseminação de patógenos via material vegetativo (Pinto, 2021). Apesar dos avanços, existem limitações, como custos elevados de implantação de um laboratório e a variação somaclonal, que exige atenção a quantidade de multiplicações sucessivas de um mesmo acesso (Scherwinski-Pereira; Costa; Guedes, 2009). Diante do exposto, torna-se importante investigar estratégias que melhorem o desempenho das plantas de batata-doce cv. Campina micropropagadas na fase ex vitro, como a utilização de elementos benéficos.

2.3 Silício

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, mas na forma de silicatos complexos, inacessíveis às plantas. A fração disponível ocorre como ácido monossilícico (H_4SiO_4), única forma absorvível pelas raízes (Pereira *et al.*, 2013). Embora não seja considerado nutriente essencial, o Si é classificado como elemento benéfico para as plantas, pois sua suplementação via fertilizantes silicatados pode trazer diversos efeitos positivos à fisiologia vegetal (Ponce *et al.*, 2022). Em solos tropicais, a disponibilidade de Si-trocável costuma ser baixa, justificando estratégias de adubação silicatada. O transporte de Si ocorre por aquaporinas específicas (genes Lsi1/Lsi2) encontradas em várias culturas (Mir *et al.*, 2022). Em geral, plantas gramíneas acumulam mais Si em seus tecidos do que dicotiledôneas (Ponce *et al.*, 2022), o que justifica os estudos com suplementação desse elemento in vitro, e no desempenho ex vitro, após suplementação.

A presença do Si promove múltiplos efeitos na planta, afetando a fisiologia, bioquímica e estrutura das células. O Si se deposita nas paredes celulares sob forma de sílica amorfa, aumentando a rigidez dos tecidos. Esse depósito reforça folhas e colmos, reduzindo tombamento. Em batata comum, por exemplo, adubação com Si diminuiu em 63% o acamamento das plantas (Soratto *et al.*, 2012). A barreira de sílica também dificulta a penetração de fungos e insetos, além de induzir defesas químicas. Estudos mostram que a aplicação de Si

eleva a síntese de compostos fenólicos, lignina e fitoalexinas nos sítios de infecção (Mir *et al.*, 2022).

O Si também melhora a planta para tolerar estresses ambientais. Sob salinidade, a planta reduz a absorção de Sódio e consegue se proteger contra o desequilíbrio osmótico, além de diminuir o estresse oxidativo nas folhas (Mir *et al.*, 2022; Ponce *et al.*, 2022).

Em condições de déficit hídrico, o Si diminui a transpiração e aumenta a produção de osmoprotetores, conservando turgidez e função fotossintética por mais tempo (Ponce *et al.*, 2022). O Si também sequestra metais tóxicos (Al, Mn, Cd etc.), formando complexos ou precipitando-os no solo, atenuando toxicidade e estresse oxidativo associado (Mir *et al.*, 2022).

Quando em quantidades adequadas, o Si tende a aumentar a fotossíntese e a eficiência no uso de água e nutrientes (Zalan *et al.*, 2024). Na batata-doce, embora seja considerada uma espécie não acumuladora de silício, sua aplicação foliar reduziu a necessidade de aplicação de fósforo (Oliveira, 2018). Isoladamente, o Si proporciona maior produtividade total e comercial de tubérculos de batata, folhas mais eretas, e maior porcentagem de tubérculos sem defeitos (Gonçalves, 2009). Esses efeitos são particularmente importantes no contexto da aclimatização de mudas cultivadas in vitro, que sofrem alterações na fisiologia estomática e na regulação hídrica.

2.4 Selênio

O Selênio (Se) é considerado um elemento benéfico para as plantas, quando utilizado em concentrações adequadas. Em concentrações elevadas, o selênio pode ter efeitos tóxicos (Dimkovikj *et al.*, 2015; White, 2018).

As plantas são a principal fonte de selênio para humanos e animais, para os quais, as dietas com níveis adequados desse elemento agregam benefícios à saúde, portanto, torna-se necessário compreender a interação e o metabolismo do selênio nas plantas (Gupta; Gupta, 2017) para aumentar sua disponibilidade aos animais em geral.

As plantas absorvem o Se como selenato e selenito, o selenato pelos transportadores de sulfato, sendo rapidamente translocado para a parte aérea. O selenito fica preferencialmente nas raízes e é incorporado em compostos orgânicos como selenocisteína (SeCys), selenocistina (SeCys2) e selenometionina (SeMet) antes de serem translocados, ou ali permanecerem (Xiang *et al.*, 2022). Essa diferença no transporte e acúmulo entre selenato e selenito é relevante para experimentos in vitro, nos quais o selenito é, frequentemente, utilizado como fonte de Se.

O Se em baixa dose aumenta a atividade de enzimas como a glutationa peroxidase, catalase e superóxido dismutase (Hasanuzzaman; Fujita, 2011), reduzindo as espécies reativas de oxigênio (ERO) sob estresse. Como resultado, plantas tratadas com o Se tem melhor integridade dos cloroplastos e maior eficiência fotossintética: por exemplo, plântulas de sorgo e arroz tratadas com Se, sob estresse, tiveram níveis mais baixos de ERO e maiores taxas fotossintéticas que plantas não tratadas (Gupta; Gupta, 2017).

Quando em níveis ótimos, o Se retarda a senescência e modula processos de crescimento (Xue; Hartikainen; Piironen, 2001). A aplicação de Se pode manter a função dos cloroplastos e a estabilidade das membranas, retardar o envelhecimento foliar e possibilita maior acúmulo de massa sob estresse abiótico (Filek *et al.*, 2010).

Em termos agronômicos, a fertilização apropriada com Se pode aumentar o rendimento e a qualidade das culturas, particularmente sob estresse. Um uma meta-análise foi observado que baixas doses de fertilização com o Se aumentaram o rendimento em cereais, hortaliças, leguminosas e forrageiras, mas doses muito altas causaram quedas de rendimento (Huang *et al.*, 2024).

Em batata-doce, a aplicação de Se exerce efeitos significativos no crescimento, produtividade e qualidade nutricional. Em experimentos com a cultivar Gui 10, a suplementação com selênio no solo (0-14 mg kg⁻¹) aumentou o número de ramos, comprimento máximo de ramos e produção por planta, culminando em incrementos de até 26% no rendimento. Além disso, observou-se maior acúmulo de amido e sólidos solúveis, embora com redução nos teores de proteína e açúcares redutores (Zhang *et al.*, 2024).

A distribuição de Se na planta segue um padrão claro: tuberas > caules > folhas > raízes, indicando que os órgãos de reserva são os principais sítios de acumulação (Zhang *et al.*, 2024). Esse acúmulo seletivo é vantajoso para o enriquecimento alimentar, mas demanda dosagem rigorosa. Em cultivo hidropônico de mudas, concentrações acima de 3 mg L⁻¹ de selenito inibem o crescimento, reduzem a fotossíntese e comprometem a biomassa (Chen *et al.*, 2022). Desta forma, a fonte de Se a ser utilizada, bem como as formas de aplicação, incluso as concentrações e a composição química do substrato, devem ser consideradas, para obtenção de sucesso (Silva *et al.*, 2020).

Diante da relevância da micropropagação na produção de mudas de batata-doce e dos efeitos promissores do silício e selênio sobre a fisiologia e a aclimatização vegetal, é pertinente investigar como esses elementos influenciam o desenvolvimento de plantas cultivadas in vitro.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Produção de mudas in vitro

O experimento foi conduzido no Laboratório de Cultura de Tecidos Vegetais da Universidade Federal do Ceará (UFC), em sala de crescimento com condições controladas, onde se manteve um fotoperíodo de 16 horas de luz, com intensidade luminosa de $52,5 \text{ W m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$.

Explantes da cv. 'Campina' de batata-doce foram cultivados em meio de cultura MS, suplementado com 30 g L^{-1} de sacarose e solidificado com 6 g L^{-1} de ágar. O pH do meio foi ajustado para 5,8 antes da autoclavagem, realizada a 121°C e 1 atm por 20 minutos. Segmentos nodais foram inoculados em frascos contendo 50 mL do meio de cultura correspondente a cada tratamento. Após a inoculação, os frascos foram mantidos nas condições controladas mencionadas anteriormente.

Os seguintes tratamentos foram realizados: T1- controle (MS sem suplementação), T2- $10.405 \mu\text{mol L}^{-1}$ de ácido silícico (H_4SiO_4) (Si), T3- $10.405 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Si + $15 \mu\text{mol L}^{-1}$ de selenito de sódio (Na_2SeO_3) (Se), T4- $10.405 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Si + $20 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se, T5- $10.405 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Si + $25 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se e T6- $10.405 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Si + $30 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se.

Cinco mudas de cada tratamento foram retiradas dos frascos após os 60 dias in vitro, e lavadas em água corrente para retirada do meio de cultura aderido às raízes e, posteriormente, aclimatizadas em casa de vegetação (ex vitro).

3.2 Localização e caracterização da área experimental

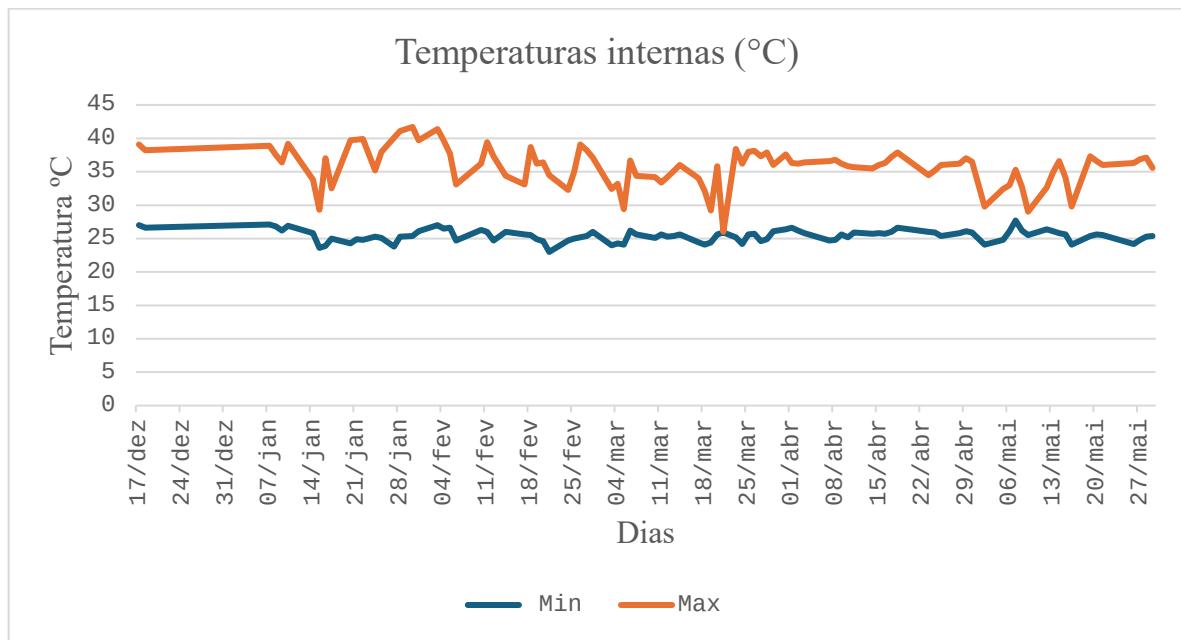
O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal do Ceará, localizado na Horta didática em Fortaleza - CE, CEP 60020-181, de coordenadas geográficas $-3.740580^\circ \text{ S}$ e $-38.576550^\circ \text{ W}$. A região é localizada na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) com clima caracterizado como Aw, na classificação de Köppen, (tropical com inverno seco), e C2 W2 A' a' na classificação de Thornthwaite, que indica clima subúmido seco, com calor intenso o ano todo e pouca variação de temperatura sazonal (Embrapa, 2002).

A casa de vegetação é contornada por tela e coberta por plástico transparente de $150\mu\text{m}$, com área total de 400 m^2 , e pé-direito de 4,5 m. Em seu interior, as bancadas foram

suspensas a 58 cm de altura do solo, contando com área de 10 m² cada, onde foram dispostas as parcelas, de modo equidistante e com 70 cm entre plantas.

As temperaturas internas da casa de vegetação foram monitoradas diariamente com auxílio de um termo-higrômetro digital modelo BM-HTC2 B-MAX®, onde foram obtidos os valores de temperaturas mínimas e máximas diárias (Figura 1).

Figura 1 – Temperaturas internas da casa de vegetação durante o período de desenvolvimento das plantas de batata-doce var. Campina



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Aclimatização das mudas

Após a retirada da sala de crescimento, as mudas foram levadas em bandejas até a casa de vegetação e, acondicionadas em revipientes de plástico (vasos) com capacidade de 11 L contendo substrato previamente formado pela mistura, na proporção 20:6:6:1 (L/L), de terra de formigueiro, compostagem, substrato comercial Carolina Soil® e vermiculita, sendo devidamente homogeneizado, sendo uma amostra coletada e encaminhada para análise (Tabela 1).

Tabela 1 – Resultado da análise do substrato utilizado no experimento

Ref. Lab.	Ref. Cliente	pH		P mg/dm ³	K mg/dm ³	Na -	Ca ²⁺	Mg ²⁺ Cmol ^c /dm ³	Al ³⁺	H+Al 0,06				
		H ₂ O	6,7											
Ref. Lab.	SB Cmol ^c /dm ³	(t) 11,24	T 11,24	V 11,90	m 94,5	ISNa 0,0	MO -	P- Rem 4,84	Zn 58,15	Fe 47,0	Mn 64,8	Cu 42,0	B 1,0	S 1,49
11124														

Fonte: Laboratório de análise de solo Viçosa, Viçosa (2024).

As mudas foram aclimatizadas no período da manhã e cada vaso contendo uma muda foi coberto com copo de plástico transparente por sete dias, para manter a umidade relativa e favorecer o enraizamento e adaptação ao ambiente ex vitro e estabelecimento das mudas (Figura 2). Os vasos foram dispostos aleatoriamente por sorteio, e a irrigação foi realizada por aspersão em períodos diurnos com anotações periódicas de controle de temperatura e umidade relativa pelo termo-higrômetro digital HTC-1.

Figura 2 – Mudas micropropagadas de batata-doce var. Campina, submetidas a diferentes concentrações de selênio e silício. a) cobertas com copo plástico, e b) após sete dias da aclimatização em casa de vegetação



Fonte: Nazareno, Fortaleza (2024).

Conforme a necessidade hídrica da cultura, 500mm no ciclo de 110 a 140 dias (Embrapa, 2021), foi adotado um aporte hídrico proporcional para o ciclo de 110 dias, sendo aplicada uma lâmina de água média de 4,5 mm.dia⁻¹. A adubação de cobertura foi feita a cada 15 dias com 7,0 g do poli mineral Forth® Hortaliças, durante os 90 primeiros dias, e 7,0 g a cada 7 dias, até a colheita. A concentração dos nutrientes no poli mineral Forth® Hortaliças está disposta na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição do adubo mineral Forth® Hortaliças.

Nutriente	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
Conteúdo (%)	9,0	15,0	10,0	2,5	2,5	9,0	0,06	0,05	0,22	0,10	0,005	0,20

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Manejo integrado de pragas

O manejo integrado de pragas foi realizado com o monitoramento, a cada dois dias, através de armadilha adesiva de cor amarela, para pequenos sugadores, como a mosca branca (*Bemisia spp.*) com nível de controle (NC) estipulado em 2 Moscas/armadilha Dia⁻¹, conforme protocolo descrito por Costa-Lima (2016) para *Bemisia tabaci* na cultura do melão. O inseticida e acaricida de contato e ingestão Oberon® de ingrediente ativo Espiromesifeno 24%, registrado para a cultura da batata-doce para controle de *Bemisia tabaci*, foi utilizado na dosagem de 0,5 L ha⁻¹ e volume de calda de 400 L ha⁻¹.

O monitoramento de lagartas foi feito com a técnica do pano de batida (Figura 3) que consiste em agitar a planta sobre um tecido para identificar a presença dos artrópodes-praga. O controle mecânico foi aplicado para lagartas até atingir o nível de controle, onde foi necessária a aplicação de controle químico com produto fitossanitário registrado para a cultura.

Figura 3 – Presença de insetos-praga e inimigos naturais encontrados durante o experimento. a) *Bemisia spp.* b) *Spodoptera spp.* e c) *Chalcididae*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5 Descrição das parcelas e delineamento experimental

O experimento foi feito em delineamento inteiramente casualizado (DIC) com 6 tratamentos e 5 repetições, em que as parcelas foram compostas por uma planta em cada vaso, dispostas aleatoriamente na bancada.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando significativos, as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade, utilizando o software estatístico R (R Core Team, 2023), pacote estatístico ‘*easyanova*’. Os pressupostos de normalidade e homogeneidade de variância foram verificados antes da aplicação da ANOVA.

3.6 Avaliações e análises

3.6.1 Avaliações biométricas

Sete dias após a transferência das plantas para o ambiente ex vitro, foram avaliadas as variáveis: número de folhas completamente expandidas e não senescentes, altura da parte aérea (cm) e diâmetro da rama (mm). Novas avaliações foram realizadas após 30 e 70 dias, conforme figura 4, para os mesmos caracteres. Todas com o auxílio de um paquímetro digital e uma régua graduada.

Figura 4 – Plantas de batata-doce cv. Campina em vasos na casa de vegetação, submetidos a diferentes concentrações de silício e selênio in vitro. a) aos 7 dias de aclimatização; b) aos 30 dias; c) aos 70 dias de desenvolvimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após 180 dias as plantas foram retiradas dos vasos para determinação da massa fresca e seca da parte aérea e das raízes. As plantas foram primeiramente pesadas, então foram acondicionadas em sacos de papel, e secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até massa constante (aproximadamente 72 horas) e, então, pesadas novamente para o cálculo do percentual de matéria seca.

3.6.2 Quantificação de pigmentos

Após 60 dias, foram coletadas as amostras do tecido foliar, das parcelas experimentais, para extração de pigmentos em 5 mL acetona 80% por 24 horas sob ausência de luz (Lichtenthaler, 1987). As absorbâncias em espectrofotometria para os comprimentos de onda de 470nm, 645nm, 652nm e 663nm, foram medidas e seus valores obtidos foram aplicados às seguintes equações: (1) para clorofila α , (2) para clorofila β , (3) para clorofilas totais e (4) para carotenoides totais.

$$Chl_{\alpha} = \frac{(12,72xA_{663}-2,59xA_{645})xV}{1000xP} \quad (1)$$

Onde: Chl_{α} representa a clorofila α ($mg\ g^{-1}$); V, o volume do extrato (ml); P, a massa do tecido vegetal (g); e, A_x , a respectiva absorbância no comprimento de onda segundo o índice da variável (nm).

$$Chl_{\beta} = \frac{(22,88xA_{645}-4,67xA_{663})xV}{1000xP} \quad (2)$$

Onde: Chl_{β} representa a clorofila β ($mg\ g^{-1}$); V, o volume do extrato (ml); P, a massa do tecido vegetal (g); e, A_x , a respectiva absorbância no comprimento de onda segundo o índice da variável (nm).

$$Chl_t = Chl_{\alpha} + Chl_{\beta} \quad (3)$$

Onde: Chl_t representa a clorofila total da amostra.

$$CaT = \frac{[(1000xA_{470})-(3,27xChl_{\alpha})-(104xChl_{\beta})]xV}{229x1000xP} \quad (4)$$

Onde CaT representa o valor de carotenoides totais (mg g^{-1}); V, o volume do extrato (ml); P, a massa da amostra de tecido vegetal (g); e, A_x , a absorbância no comprimento de onda segundo o índice da variável (nm).

3.6.3 Análises ultraestruturais

Após 70 dias do transplantio, foram coletadas amostras do terço mediano de quatro segmentos foliares, os quais foram desidratados em soluções crescentes de acetona (30%, 50%, 70%, 90% e 100%) e, então, submetidas à secagem ao ponto crítico, utilizando-se CO_2 como líquido de transição (Robards, 1978). Posteriormente, foram recobertas com ouro (20 nm) e analisadas, ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) LEO-EVO, da Central Analítica da UFC (Alves, 2004).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Biometria

A aclimatização das mudas micropropagadas de batata-doce cv. Campina foi avaliada aos 7, 30 e 70 dias após o transplantio, considerando as variáveis número de folhas (NF), diâmetro da rama (DR) e comprimento da parte aérea (CPA).

Aos 7 dias de aclimatização, os tratamentos não tiveram diferenças significativas para o NF e o DR. No entanto, para o CPA, os tratamentos T1 (18,50 cm) e T2 (14,38 cm) tiveram valores superiores, enquanto os demais tiveram menores médias, variando entre 8,00 e 11,00 cm (Tabela 3).

Aos 7 dias, os tratamentos T1 (controle) e T2 (Si), cujos meios de cultura não foram adicionados de Se, tiveram desempenho superior para o CPA em relação aos tratamentos com selênio. Apesar do bom desempenho do silício isolado (T2), os tratamentos combinados com silício e selênio (T3 a T6) tiveram menor CPA nos primeiros 7 dias. Esse comportamento pode estar associado a interações fisiológicas complexas entre os dois elementos. Embora o selênio atue como antioxidante e modulador da resposta ao estresse (Gupta; Gupta, 2017), seu uso conjunto com silício pode não ter efeito aditivo imediato. Estudos indicam que, em determinadas concentrações, o selênio pode interferir negativamente no metabolismo inicial da planta, possibilitando leve estresse oxidativo ou redirecionamento metabólico que limita o alongamento celular (Chen *et al.*, 2022). Além disso, o selênio, na forma de selenito, mais utilizado em meios de cultivo para cultura de tecidos, pode competir com ânions como sulfato e fosfato nos pontos de absorção das raízes, comprometendo temporariamente a assimilação de nutrientes essenciais, inclusive do próprio silício (Xiang *et al.*, 2022). Assim, a redução do CPA nos tratamentos combinados pode ser uma resposta fisiológica transitória à dupla suplementação, que tende a se estabilizar ou mesmo a se reverter positivamente em fases mais avançadas da aclimatação (Feng *et al.*, 2021).

Na segunda avaliação, realizada aos 30 dias, o NF variou de 88,00 a 164,00, e o DR de 3,32 mm a 5,10 mm. O CPA teve médias entre 133,00 cm e 191,25 cm. Apesar dessas variações, não houve diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos.

Tabela 3 – Número de folhas (NF), diâmetro do ramo principal (DR) e comprimento da parte aérea (CPA) de plantas de batata-doce cv. Campina, aclimatizadas após a suplementação com Se e Si in vitro por 60 dias

7 dias					
Tratamentos		NF	DR (mm)	CPA (cm)	
Selênio ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Silício ($\mu\text{mol L}^{-1}$)				
T1	0,00	0,00	19,25 ^{ns}	1,775 ^{ns}	18,500a
T2	0,00	10,405,00	20,50	1,900	14,375a
T3	15,00	10,405,00	23,00	1,850	11,000b
T4	20,00	10,405,00	16,00	1,800	9,125b
T5	25,00	10,405,00	16,00	1,650	8,000b
T6	30,00	10,405,00	16,00	1,725	8,125b
CV (%)		28,89	13,96	32,48	
30 dias					
T1	0,00	0,00	132,75 ^{ns}	3,325 ^{ns}	137,75 ^{ns}
T2	0,00	10,405,00	164,00	3,575	173,00
T3	15,00	10,405,00	128,50	5,100	181,25
T4	20,00	10,405,00	163,50	4,300	191,25
T5	25,00	10,405,00	88,00	4,30	133,00
T6	30,00	10,405,00	117,75	3,85	160,50
CV (%)		47,10	21,44	26,79	
70 dias					
T1	0,00	0,00	220,50 ^{ns}	5,250 ^{ns}	219,75 ^{ns}
T2	0,00	10,405,00	226,50	5,200	249,50
T3	15,00	10,405,00	185,75	5,275	281,00
T4	20,00	10,405,00	182,25	5,775	249,75
T5	25,00	10,405,00	185,50	5,925	194,25
T6	30,00	10,405,00	185,50	5,475	251,00
CV (%)		15,31	10,33	16,01	

*Medias seguidas da mesma letra não diferem entre si, estatisticamente, pelo teste de Scott-Knott a 5%.

**ns lê-se não significativo.

O desempenho inferior na primeira avaliação, 7 dias após o transplantio, para o caractere CPA dos tratamentos T3 a T6, não foi observado aos 30 dias, para o qual não houve diferença entre tratamentos. Uma das possíveis explicações para este resultado pode ser a estratégia de detoxificação do excesso de Se, que consiste na conversão em compostos não tóxicos (SeMet), ou voláteis, como o dimetilseleneto (DMSe) e dimetildiseleneto (DMDSe) que são volatilizados pela planta, sendo o DMSe pelas plantas não acumuladoras de Se e o DMDSe pelas plantas hiperacumuladoras de Se ou, ainda, pode ter ocorrido o sequestro dos compostos pelos vacúolos das células do mesófilo foliar, conferindo tolerância para as plantas (White, 2018). A enzima selenocisteinase, presente nas células, pode converter a SeCys em alanina e Se elementar, que é relativamente atóxico (White, 2018), fazendo com que as plantas tenham desempenho normal.

Na terceira avaliação, realizada aos 70 dias, o NF variou de 182,25 (T4) a 226,50 (T2), o DR de 5,20 mm (T2) a 5,93 mm (T5), e o CPA de 194,25 cm (T5) a 281,00 cm (T3). Assim como na segunda avaliação, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos (Tabela 3).

Tais resultados indicam que as mudas responderam positivamente ao processo de aclimatização, com crescimento contínuo e vigoroso ao longo do período avaliado, independentemente do tratamento aplicado.

4.2 Teor de matéria fresca e seca

Os valores de matéria fresca e seca da parte aérea (MFPA e MSPA) e da raiz (MFR e MSR) das plantas foram avaliados após 180 dias de desenvolvimento. A MFPA, cujos valores variaram de 270,0 g (T6) a 320,0 g (T1), não diferiu significativamente entre os tratamentos. De forma semelhante, para a MSPA, em que as médias oscilaram entre 38,5 g (T4) e 45,5 g (T5), também sem diferença significativa. Em relação à MFR, destacaram-se os tratamentos T6 (54,5 g) e T4 (46,0 g), que tiveram os maiores valores, com diferença significativa em relação ao T1 (17,5 g), o qual obteve o menor acúmulo de biomassa radicular (Tabela 4).

A MSR foi maior nos tratamentos T6 (5,89 g), T4 (5,18 g) e T5 (4,17 g), os quais diferiram estatisticamente dos demais. O tratamento T1 obteve o menor valor de MSR (1,91 g). Esses resultados são consistentes com Chen *et al.* (2022), que verificou que o Se promoveu o crescimento de mudas de batata-doce ‘20167-6’, sendo as plantas tratadas com Se as que tiveram maior matéria seca de caules, folhas e raízes do que aquelas sem.

Tabela 4 – Massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA), massa fresca de raízes (MFR) e massa seca de raízes (MSR), aos 180 dias de desenvolvimento, em casa de vegetação, de plantas de batata-doce cv. Campina após a suplementação com Se e Si in vitro por 60 dias.

180 dias						
Tratamentos		MFPA	MFR	MSPA	MSR	
Selênio ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Silício ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	(g)	(g)	(g)	(g)	
T1	0,00	0,00	320,00 ^{ns}	17,5b	45,00 ^{ns}	1,91b
T2	0,00	10.405,00	294,50	27,0b	42,50	2,95b
T3	15,00	10.405,00	285,50	33,0b	41,00	3,51b
T4	20,00	10.405,00	283,00	46,0a	38,50	5,18a
T5	25,00	10.405,00	311,00	39,0a	45,50	4,17a
T6	30,00	10.405,00	270,00	54,5a	39,00	5,89a
CV (%)		15,15	33,60	13,55	36,34	

*Medias seguidas da mesma letra não diferem entre si, estatisticamente, pelo teste de Scott-Knott a 5%.

**ns lê-se não significativo.

Os tratamentos com maior concentração de Se possibilitaram maior acúmulo de biomassa radicular, principalmente sob a forma seca. Esses dados sugerem que maiores concentrações de selênio in vitro podem ser eficientes no desenvolvimento do sistema radicular em condições ex vitro. A hipótese para explicar esse resultado é que parte do selênio absorvido pela planta na forma de selenito de sódio tende a ser retido ou metabolizado nas raízes. O selenito é menos translocado, quando comparado a outras fontes de selênio, sendo incorporado a compostos orgânicos no sistema radicular (Silva *et al.*, 2020; Cipriano *et al.*, 2022). As descobertas de Zhang *et al.* (2003) em soja (*Glycine max*) mostraram que a curva de concentração de Se pôr partes da planta, quando suplementada com selenito, tem valores superiores para os encontrados nas raízes em relação a parte aérea, concluindo que a eficiência do transporte de selenito é inferior ao de selenato, que foi a fonte utilizada como efeito comparativo. O metabolismo do Se absorvido e retido nas raízes pode explicar o maior acúmulo de massa pelas raízes devido a regulação das enzimas do metabolismo de carboidratos, com redução da peroxidação lipídica, o que confere proteção a integridade das membranas celulares, culminando no aumento da biomassa radicular (Kordrostami *et al.*, 2023). Dessa forma, os

resultados reforçam o potencial do Se, aplicado in vitro, como indutor do crescimento radicular em batata-doce, sobretudo em condições ex vitro prolongadas.

4.3 Pigmentos fotossintéticos

O teor de clorofila α (CHL α) variou de 0,1927 (T1) a 0,3528 (T6), sendo este último o que teve o maior valor, significativamente superior a todos aos demais (Tabela 4).

Tabela 5 – Teores de pigmentos fotossintéticos clorofila α (CHL α), clorofila β (CHL β), clorofilas totais (CHL t) e carotenoides totais (CAR t), aos 70 dias de desenvolvimento, em casa de vegetação, de plantas de batata-doce cv. Campina após a suplementação com Se e Si in vitro por 60 dias.

	Tratamentos		CHL α	CHL β	CHL t	CAR t
	Selênio ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Silício ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	(mg g^{-1})			
T1	0,00	0,00	0,1927d	0,1253b	0,3180b	0,0563b
T2	0,00	10,405,00	0,3003b	0,1646a	0,4649a	0,0885a
T3	15,00	10,405,00	0,2277c	0,1297b	0,3574b	0,0885a
T4	20,00	10,405,00	0,2450c	0,1198b	0,3648b	0,0681b
T5	25,00	10,405,00	0,2033d	0,1168b	0,3201b	0,0554b
T6	30,00	10,405,00	0,3528a	0,1706a	0,5235a	0,0931a
CV (%)			5,98	19,53	10,61	14,85

*Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, estatisticamente, pelo teste de Scott-Knott a 5%.

A clorofila b (CHL β), teve os maiores teores observados nos tratamentos T6 (0,1706) e T2 (0,1646), que se diferenciaram estatisticamente dos demais, indicando maior acúmulo deste pigmento nessas condições. No caso da clorofila total (CHL t), o tratamento T6 teve o valor mais elevado (0,5235), seguido por T2 (0,4649), ambos significativamente superior aos demais tratamentos. O teor de carotenoides totais (CAR t), também foi superior nos tratamentos T2 e T6 (0,0931 e 0,0885, respectivamente).

De forma geral, as plantas de batata-doce do tratamento T6 tiveram os maiores teores dos pigmentos, evidenciando seu efeito positivo sobre a capacidade fotossintética das

plantas, sendo seguido pelo tratamento T2. Huang *et al.* (2021) observaram efeito semelhante em *Brassica chinensis* exposta ao estresse por cromo, em que a combinação de Se e Si resultou em maior conteúdo de clorofila e atividade fotossintética, atribuída à ação antioxidante e estabilizadora desses elementos nos tecidos foliares. Da mesma forma, estudos prévios apontam que o silício atua na integridade estrutural da célula e na otimização do metabolismo fotossintético (Ma; Yamaji, 2015), enquanto o selênio, em concentrações fisiológicas, pode induzir a atividade de enzimas antioxidantes e aumentar a biossíntese de clorofilas (Khan *et al.*, 2021).

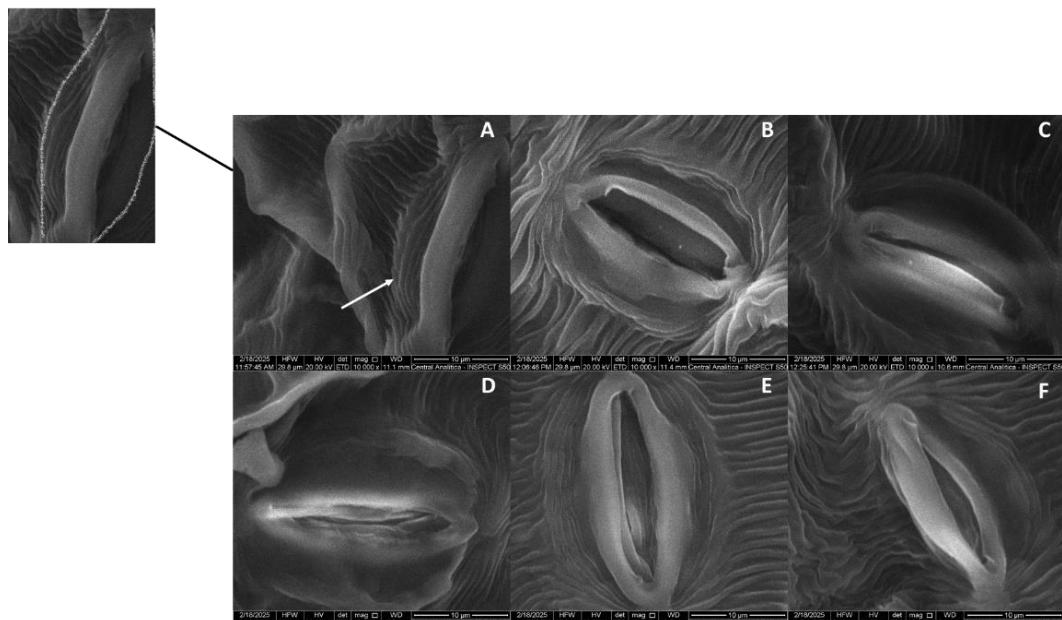
O desempenho de T2 (suplementação de silício), para a quantidade de pigmentos, é consistente com o observado por Lima *et al.* (2010), que em soja (*Glycine max* L.) inoculada com ferrugem asiática, verificou o mesmo padrão de não diferir em clorofila α , e diferir para clorofilas β , clorofila total e carotenoides totais, o que foi atribuído a modificação na arquitetura da planta no tocante à angulação das folhas, o que reflete em incremento da interceptação luminosa. Esses resultados também são consistentes com Oliveira *et al.* (2023) que em batata-doce cv. Brazlandia observaram maior acúmulo de clorofilas com o aumento da concentração de terra diatomácea, rica em Si, corroborando com a observação do aumento da taxa fotossintética. O Si contribui com a concentração de pigmentos fotossintéticos atenuando os efeitos da peroxidação lipídica, mantendo a integridade das membranas, evidenciadas pela redução de malonaldeído (MDA) resultante da deterioração de lipídios das membranas, observados em tomateiros (*Solanum lycopersicum*) sob estresse salino, onde foi observado um aumento da atividade de superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT), o teor de clorofilas e a eficiência do fotossistema 2, nas plantas tratadas com Si (Al-Aghabary *et al.*, 2005).

4.4 Análise ultraestrutural

Na análise ultraestrutural do tratamento controle (T1), observou-se uma superfície epidérmica relativamente enrugada com estômatos levemente deprimidos e ostíolos fechados, indicando atividade estomática reduzida (Figura 5A). A partir da aplicação de silício isolado (T2) (Figura 5B), observou-se um maior espessamento das paredes celulares e diminuição na saliência da epiderme, sugerindo maior resistência estrutural. O silício é conhecido por se depositar nas paredes celulares na forma de sílica (SiO_2), formando uma camada que aumenta a rigidez tecidual e a resistência mecânica, além de reduzir a perda de água e aumentar a tolerância ao estresse abiótico (Ma; Yamaji, 2015; Guerriero *et al.*, 2016). Além disso, o silício tem sido associado à regulação da condutância estomática, promovendo alterações anatômicas

como o engrossamento da parede das células-guarda e mudanças bioquímicas que aumentam a eficiência do uso da água e a tolerância a estresses (Emamverdian *et al.*, 2018; Luyckx *et al.*, 2017).

Figura 5 – Eletromicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da epiderme abaxial foliar de plantas micropagadas sob diferentes tratamentos com silício (Si) e selenito de sódio (Se), e aclimatadas a 70 dias. Barra $\sim 30\mu\text{m}$



Fonte: Central Analítica UFC, Fortaleza (2025).

Com a combinação de silício e selênio (T3 a T6) (Figura 5), foram evidenciadas variações graduais na morfologia estomática, especialmente na abertura do ostíolo e na definição das bordas cuticulares das células-guardas. Essa morfologia pode indicar uma ação sinérgica entre silício e selênio na manutenção da homeostase celular e na regulação da transpiração (Belaqziz *et al.*, 2022). O selênio, quando aplicado em concentrações adequadas, atua como antioxidante, melhora a atividade fotossintética e regula a abertura estomática, como já demonstrado em estudos com trigo e arroz (Khan *et al.*, 2021).

Nos tratamentos T5 e T6 (25 e 30 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Se, respectivamente) (Figura 5E e 5F), os estômatos tiveram abertura ostiolar e cutículas visivelmente mais espessas e ornamentadas, o que pode estar relacionado a uma maior eficiência na regulação hídrica e trocas gasosas. Embora o selênio seja benéfico em baixas doses, seu excesso pode provocar o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ERO), desequilíbrios metabólicos e danos estruturais,

especialmente em ambientes controlados como o cultivo in vitro (Feng *et al.*, 2021; Gupta; Gupta, 2017).

A sinergia entre selênio e silício pode, potencialmente, fornecer uma proteção ainda maior contra os estresses abióticos ou causado por metais pesados. Quando usados juntos, selênio e silício podem complementar os mecanismos de proteção um do outro (Belaqziz *et al.*, 2022).

5 CONCLUSÃO

A suplementação in vitro com silício e selênio favoreceu o desenvolvimento de plantas de batata-doce var. Campina, com destaque para o tratamento T6 ($10.405 \mu\text{mol L}^{-1}$ Si + $30 \mu\text{mol L}^{-1}$ Se), que possibilitou maior acúmulo de biomassa radicular e maiores teores de pigmentos fotossintéticos.

A aplicação conjunta de silício e selênio melhorou a qualidade das mudas na aclimatização e o desenvolvimento das plantas de batata-doce var. Campina em vaso em casa de vegetação.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, M. de J. N. *et al.* Dados climatológicos: estação de Fortaleza, 2002. Fortaleza: **Embrapa Agroindústria Tropical**, 2003. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/425189/1/doc75.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2025.

AL-AGHABARY, K.; ZHU, Z.; SHI, Q. H. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. **Journal of Plant Nutrition**, [s.l.], v. 27, n. 12, p. 2101–2115, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1081/PLN-200034641>.

ANDRADE, T. S. C. de. **O uso da sacarose contribui para o desenvolvimento in vitro da batata doce**. 2022. 22 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em: <<http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/69304>>.

ANDRADE JÚNIOR, V. C. de; VIANA, D. J. S.; FERNANDES, J. S. C.; FIGUEIREDO, J. A.; NUNES, U. R.; NEIVA, I. P. Selection of sweet potato clones for the region Alto Vale do Jequitinhonha. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 3, p. 389–393, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362009000300024>.

BELAQZIZ, M.; TOUAOULA, S.; EL YAMANI, M. *et al.* Combined application of selenium and silicon enhances growth and antioxidant defense in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s.l.], v. 180, p. 36–45, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.03.006>.

COSTA-LIMA, T. C. da; MICHEREFF FILHO, M.; LIMA, M. F.; ALENCAR, J. A. de. Guia sobre mosca-branca em meloeiro: monitoramento e táticas de controle. Petrolina: **Embrapa Semiárido**, 2016. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14266.39366>.

CHEN, H.; CHENG, Q.; CHEN, Q.; YE, X.; QU, Y.; SONG, W.; FAHAD, S.; GAO, J.; SAUD, S.; XU, Y.; SHEN, Y. Effects of Selenium on Growth and Selenium Content Distribution of Virus-Free Sweet Potato Seedlings in Water Culture. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 13, 6 jul. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.965649>>.

CIPRIANO, P. E. *et al.* Macronutrients content of radishes and the influence of biofortification with selenium. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 296, p. 110908, 5 abr. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.110908>.

DIMKOVIKJ, Aleksandar *et al.* Stuck between a ROS and a hard place: Analysis of the ubiquitin proteasome pathway in selenocysteine treated *Brassica napus* reveals different toxicities during selenium assimilation. **Journal of Plant Physiology**, [s.l.], v. 181, p. 50–54, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.04.003>.

DONYINA, A. G.; SZARVAS, A.; OPOKU, V. A. *et al.* Enhancing sweet potato production: a comprehensive analysis of the role of auxins and cytokinins in micropropagation. **Planta**, [s.l.], v. 261, p. 74, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00425-025-04650-z>.

EMAMVERDIAN, A.; DING, Y.; MOKHBERDORAN, F.; XIE, Y. Silicon mechanisms to ameliorate heavy metal stress in plants. **BioMed Research International**, [s.l.], p. 8492898, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/8492898>.

EMBRAPA HORTALIÇAS. **Sistema de produção de batata-doce**. Brasília: Embrapa Hortalícias, 2021.

ERPEN, L. *et al.* Tuberização e produtividade de batata-doce em função de datas de plantio em clima subtropical. **Bragantia**, [s.l.], v. 72, p. 396–402, 2013.

FENG, R.; WEI, C.; TU, S. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. **Environmental and Experimental Botany**, [s.l.], v. 179, p. 104195, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104195>.

FILEK, M. *et al.* Effect of selenium on characteristics of rape chloroplasts modified by cadmium. **Journal of Plant Physiology**, [s.l.], v. 167, n. 1, p. 28–33, 2010.

GONÇALVES, M. V. **Arquitetura de planta, teores de clorofila e produtividade de batata, CV. atlantic, sob doses de silicato de potássio via foliar**. 2009. 60 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/12113>>.

GUERRIERO, G.; HAUSMAN, J.-F.; LEGAY, S. Silicon and the plant extracellular matrix. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 7, p. 463, 2016. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00463>.

GUPTA, M.; GUPTA, S. An Overview of Selenium Uptake, Metabolism, and Toxicity in Plants. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 7, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02074>>. Acesso em: 22 jun. 2025.

HASANUZZAMAN, M.; FUJITA, M. Selenium Pretreatment Upregulates the Antioxidant Defense and Methylglyoxal Detoxification System and Confers Enhanced Tolerance to Drought Stress in Rapeseed Seedlings. **Biological Trace Element Research**, [s.l.], v. 143, n. 3, p. 1758–1776, 2011.

HUAMARI, Z. Systematic botany and morphology of the sweetpotato plant. **CIP Tech. Info, Bull**, v. 25, p. 1–25, 1992.

HUANG, R. *et al.* Comprehensive Evaluation of Factors Influencing Selenium Fertilization Biofortification. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s.l.], v. 104, n. 10, p. 6100–6107, 2024.

HUANG, H.; LI, M.; RIZWAN, M.; DAI, Z.; YUAN, Y.; HOSSAIN, M. M.; TU, S. Silicon and selenium alleviate chromium stress in *Brassica chinensis* L. by enhancing photosynthetic activity and antioxidant defense system. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [s.l.], v. 208, p. 111665, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111665>.

JONES, A.; DUKES, P. D. Some Seed, Seedling, and Maternal Characters as Estimates of Commercial Performance in Sweet Potato Breeding. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, [s.l.], v. 101, n. 4, p. 385–388, 1976.

KHAN, A.; KHAN, S.; KHAN, A. *et al.* Selenium-mediated regulation of physiological and biochemical processes in plants: A meta-analysis perspective. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [s.l.], v. 208, p. 111686, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111686>.

KORDROSTAMI, M. *et al.* Breaking barriers: Selenium and silicon-mediated strategies for mitigating abiotic stress in plants. **Phyton - International Journal of Experimental Botany**, Karaj, v. 92, n. 9, p. 2714–2736, 2023. DOI: <https://doi.org/10.32604/phyton.2023.030372>.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**, [s.l.], v. 148, p. 350–382, 1987. DOI: 10.1016/0076-6879(87)48036-1.

LIMA, M. L.; POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A.; FONSECA, T. A. P. S.; CARVALHO, J. G. Quantificação da ferrugem asiática e aspectos nutricionais de soja suprida com silício em solução nutritiva. **Summa Phytopathologica**, [s.l.], v. 36, n. 1, p. 51–56, 2010.

LUYCKX, M.; HAUSMAN, J. F.; LUTTS, S.; GUERRERO, G. Silicon and plants: Current knowledge and technological perspectives. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 8, p. 411, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00411>.

MA, J. F.; YAMAJI, N.; MITANI-UENO, N. Role of silicon in plant–environment interactions: New insights. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 11, p. 1727, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.593592>.

MIR, R. A. *et al.* Multidimensional Role of Silicon to Activate Resilient Plant Growth and to Mitigate Abiotic Stress. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 13, 23 mar. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.819658>>. Acesso em: 22 jun. 2025.

MURASHIGE, T.; SKOOG, F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. **Physiologia Plantarum**, [s.l.], v. 15, n. 3, p. 473–497, 1962. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x.

OLIVEIRA, D. S. de. **Produção e qualidade da batata-doce adubada com fósforo e silício em solo arenoso**. 2018. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/27461>.

OLIVEIRA, A. J. M. *et al.* Acclimatization of sweet potatoes under in vitro application of diatomaceous earth. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 95, n. 2, p. e20200021, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202320200021>.

SHAJI, A. *et al.* An efficient micropropagation protocol for nutritionally rich varieties of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.). **Journal of Root Crops**, [s.l.], v. 45, n. 2, p. 12–18, 2019.

SCHERWINSKI-PEREIRA, J. E. S.; COSTA, F. H. da S.; GUEDES, R. S. Uso e aplicações biotecnológicas do cultivo in vitro de células, tecidos e órgãos de plantas. In: GONCALVES, R. C.; OLIVEIRA, L. C. de (ed.). **Embrapa Acre: ciência e tecnologia para o desenvolvimento sustentável do Sudoeste da Amazônia**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2009.

SHARMA, N. *et al.* Strategies for successful acclimatization and hardening of in vitro regenerated plants: Challenges and innovations in micropropagation techniques. **Plant Science Today**, [s.l.], v. 92, n. 9, p. 1–9, 2023. DOI: <https://doi.org/10.14719/pst.2376>.

PEREIRA, T. S. *et al.* Positive interference of silicon on water relations, nitrogen metabolism, and osmotic adjustment in two pepper (*'capsicum annuum'*) cultivars under water deficit. **Australian Journal of Crop Science**, [s.l.], v. 7, n. 8, p. 1064–1071, 2013.

PINTO, A. C. O. **Cultivo in vitro de meristemas de batata-doce**. 2021. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2021.

PONCE, F. D. S. *et al.* Adubação silicatada na produtividade e respostas fisiológicas das plantas. **Research, Society and Development**, [s.l.], v. 11, n. 16, p. e164111637926, 2022.

QUISEN, R. C.; ANGELO, P. C. da S. Manual de procedimentos do Laboratório de Cultura de Tecidos da Embrapa Amazônia Ocidental. Manaus: **Embrapa Amazônia Ocidental**, 2008. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/665576>>. Acesso em: 21 jun. 2025.

RAMOS, A. da S. **Cultivo da batata-doce em função de diferentes fontes de adubação em latossolo amarelo da Amazônia Central**. 2019. 49 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia Tropical) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

SILVA, D. F. *et al.* Anatomical and physiological characteristics of *Raphanus sativus* L. submitted to different selenium sources and forms application. **Scientia Horticulturae, Amsterdam**, [s.l.], v. 260, p. 108839, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108839>.

SORATTO, R. P. *et al.* Produtividade, qualidade de tubérculos e incidência de doenças em batata, influenciados pela aplicação foliar de silício. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 47, p. 1000–1006, 2012.

VALENZUELA H, FUKUDA S, ARAKAKI A. **Sweetpotato production guides for Hawai'i**. Honolulu: University of Hawaii, 1994.

WHITE, P. J. Selenium metabolism in plants. **Biochimica et Biophysica Acta – General Subjects**, Amsterdam, v. 1862, n. 11, p. 2333 – 2342, 2018. DOI: [10.1016/j.bbagen.2018.05.006](https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2018.05.006). Disponível em: <https://europepmc.org/article/MED/29751098>.

XIANG, J. *et al.* Research progress on the effects of selenium on the growth and quality of tea plants. **Plants**, Basel, v. 11, n. 2491, p. 1–12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11192491>.

XUE, T.; HARTIKAINEN, H.; PIIRONEN, V. Antioxidative and Growth-Promoting Effect of Selenium on Senescent Lettuce. **Plant and Soil**, [s.l.], v. 237, n. 1, p. 55–61, 2001.

ZALAN, N. M.; KARIM, N. A.; RAZALI, R. M.; AHMAD, A. Foliar application of silicon nanoparticles (SiNPs) effects on tuber yields and carbohydrate metabolism in four sweet

potatoe (*Ipomoea batatas* L.) varieties. **Journal of Sustainability Science and Management**, [s.l.], v. 19, n. 5, p. 201-213, maio 2024. <http://doi.org/10.46754/jssm.2024.05.012>.

ZHANG, Y. *et al.* Uptake and transport of selenite and selenate by soybean seedlings of two genotypes. **Plant and Soil, Dordrecht**, [s.l.], v. 253, p. 437–443, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1024843804401>.

ZHANG, Y. *et al.* The impact of selenium fertilizer application on the yield, quality, and selenium accumulation characteristics of various sweet potato varieties. **Research Square**, [s.l.], 2024. *Preprint*. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4653561/v1>.