

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir
de 26/08/2025.

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGIA VEGETAL)**

Da germinação à regeneração: o papel do alumínio (Al) e sua interação com os processos fisiológicos de espécies acumuladoras de Al do Cerrado

MATHEUS ARMELIN NOGUEIRA

**Rio Claro – SP
2023**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGIA VEGETAL)

Da germinação à regeneração: o papel do alumínio (Al) e sua interação com os processos fisiológicos de espécies acumuladoras de Al do Cerrado

MATHEUS ARMELIN NOGUEIRA

Tese apresentada ao Instituto de Biociências do Câmpus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências Biológicas (Biologia Vegetal).

Orientador: Dr. Gustavo Habermann

Coorientador: Dr. Jean Carlos Cardoso

N778g Nogueira, Matheus Armelin
Da germinação à regeneração: o papel do alumínio (Al) e sua interação com os processos fisiológicos de espécies acumuladoras de Al do Cerrado / Matheus Armelin Nogueira. -- Rio Claro, 2023
94 p. : tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências, Rio Claro
Orientador: Gustavo Habermann
Coorientador: Jean Carlos Cardoso

1. Plantas acumuladoras de Al. 2. germinação de sementes. 3. organogênese. 4. espécies do Cerrado. 5. micropropagação. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: **"Da germinação à regeneração: o papel do alumínio e sua interação com os processos fisiológicos de plantas acumuladoras do cerrado"**

AUTOR: MATHEUS ARMELIN NOGUEIRA

ORIENTADOR: GUSTAVO HABERMANN

COORIENTADOR: JEAN CARLOS CARDOSO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Biológicas (Biologia Vegetal), área: Biologia Vegetal pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. GUSTAVO HABERMANN (Participação Virtual)
Departamento de Biodiversidade / Instituto de Biociências de Rio Claro Unesp

Documento assinado digitalmente
 **GUSTAVO HABERMANN**
Data: 30/10/2023 16:06:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. MARINA ALVES GAVASSI (Participação Virtual)
Departamento de Ciências Biológicas / UNESP / Bauru

Documento assinado digitalmente
 **MARINA ALVES GAVASSI**
Data: 27/10/2023 14:08:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. CLEBERSON RIBEIRO (Participação Virtual)
Departamento de Biologia Geral / Universidade Federal de Viçosa

Documento assinado digitalmente
 **CLEBERSON RIBEIRO**
Data: 27/10/2023 14:00:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. ANNA CAROLINA GRESSLER BRESSAN (Participação Virtual)
Departamento de Ecologia / Universidade de São Paulo - Instituto de Biociências

Documento assinado digitalmente
 **ANNA CAROLINA GRESSLER BRESSAN**
Data: 27/10/2023 09:10:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. LUIZ ALFREDO RODRIGUES PEREIRA (Participação por Parecer Circunstanciado)
Departamento de Botânica / Universidade de Brasília

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ ALFREDO RODRIGUES PEREIRA**
Data: 29/10/2023 22:28:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rio Claro, 26 de outubro de 2023

Título alterado para: **Da germinação à regeneração: o papel do alumínio (Al) e sua interação com os processos fisiológicos de espécies acumuladoras de Al do Cerrado.**

Agradecimentos

Este trabalho é dedicado à memória dos meus avós, Dona Maria e Seu Lorival. A influência de vocês em minha vida vai além das palavras.

Agradeço aos meus pais, Regina e José, que sempre estiveram ao meu lado me encorajando e me orientando com sabedoria e paciência. Vocês são a minha inspiração e o meu exemplo de vida. Eu espero poder retribuir um pouco do que vocês fizeram por mim.

À minha companheira, Juliana. Sua coragem e determinação não apenas me inspiram, mas também me dão a força necessária para enfrentar os desafios da vida. Seu amor e apoio foram e são essenciais nesta jornada. Amo você!

Aos meus queridos amigos Caio, Carol, Felipe, Thiago e Vitor, que sempre acreditaram em mim e sempre me apoiaram. Cada palavra de encorajamento e cada gesto de amizade contribuíram para a realização deste trabalho.

Às minhas amigas do grupo de pesquisa Anna, Brenda, Giselle, Luá e Marina por todo apoio, amizade e incentivo.

Ao meu orientador, Gustavo, agradeço a oportunidade de aprender e crescer academicamente.

Ao meu coorientador, Jean. Sua orientação e apoio foram fundamentais para a realização deste trabalho. Agradeço também a todo o grupo do Laboratório de Fisiologia Vegetal e Cultura de Tecidos da UFSCar. A colaboração, o companheirismo e a troca de conhecimentos dentro do laboratório enriqueceram não apenas este trabalho, mas também a minha jornada acadêmica.

Ao Ntaps (Núcleo de Atenção Psicossocial do campus da UNESP), especialmente à Débora e ao Rafael. Com grande empatia e profissionalismo, me orientaram e ajudaram a me colocar de volta nos trilhos.

Sou grato à Reserva Biológica de Mogi-Guaçu e a toda sua equipe. Um agradecimento especial ao João, cuja ajuda constante tornou o trabalho mais leve e agradável.

Agradeço ao Laboratório de Pós-colheita de Produtos Hortícolas-USP/ESALQ-LPV por todo apoio e assistência.

Cada um dos nomes citados tem um lugar especial neste trabalho e em meu coração e agradeço a vocês por terem acreditado em mim e por terem me apoiado, mesmo agora, em cada passo desta jornada. Este doutorado é tanto meu quanto de vocês.

Ao Instituto de Biociência da Unesp de Rio Claro pelo apoio e infraestrutura.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (#14056/2019-3).

Resumo

O Al é o metal mais abundante na crosta terrestre e, quando presente em solos ácidos (pH < 5,0), torna-se solúvel e tóxico para a maioria das espécies de plantas. Por outro lado, existem plantas que conseguem prosperar em solos com alta disponibilidade de Al e são chamadas de acumuladoras. Essas plantas acumulam grandes quantidades de Al em seus tecidos sem apresentar sinais de toxicidade. No capítulo 1 utilizamos as espécies *Qualea grandiflora* e *Vochysia tucanorum* (Vochysiaceae), plantas acumuladoras de Al nativas do Cerrado, para testarmos diferentes hipóteses. Neste estudo, testamos a germinação de sementes em meio de cultura com concentrações crescentes de Al e sob a influência do etileno (Et). As sementes foram cultivadas *in vitro* em meio MS (Murashige e Skoog 1962) a ¼ de força contendo 0, 90, 180, 270 e 320 µM de Al. As sementes foram tratadas com água e Et para o cultivo. Aqui evidenciamos que o Al impacta significativamente a germinação e o crescimento de *Q. grandiflora* e *V. tucanorum* e que o Et induziu a germinação em sementes de *V. tucanorum* sem Al, sugerindo um efeito substitutivo. O capítulo 2 fornece insights valiosos sobre o papel do Al na organogênese e na produção de compostos fenólicos nessas espécies. O impacto do alumínio (Al) na organogênese e na produção de compostos fenólicos dessas espécies foi observado em Al a 320 µM e ausência de BAP (6-Benzilaminopurina), resultou na regeneração de raízes adventícias em ambas. No entanto, a adição de BAP sem Al não gerou respostas de regeneração. A regeneração e o desenvolvimento de brotos foram observados quando 0,44 e 0,88 µM de BAP foram adicionados ao meio de cultura com 320 µM de Al. Além disso, ambas as espécies exibiram um notável conteúdo fenólico, que foi ainda mais aprimorado pela adição de Al e/ou BAP. A capacidade antioxidante dos extratos também aumentou significativamente com a adição de Al e/ou BAP. Essas abordagens podem fornecer

perspectivas valiosas para estratégias de conservação e propagação dessas espécies do Cerrado.

Palavras-chave: Plantas acumuladoras, germinação de sementes, organogênese, espécies do Cerrado, micropropagação.

Abstract

Aluminum (Al) is the most abundant metal in the Earth's crust and, when present in acidic soils ($\text{pH} < 5.0$), becomes soluble and toxic to most plant species. Conversely, some plants thrive in soils with high Al availability and are termed accumulators. These plants accumulate large amounts of Al in their tissues without showing signs of toxicity. In Chapter 1, we employed the species *Qualea grandiflora* and *Vochysia tucanorum* (Vochysiaceae), Al-accumulating plants native to the Cerrado, to test different hypotheses. In this study, we examined seed germination in culture medium with increasing Al concentrations and under the influence of ethylene (Et). Seeds were cultured in vitro on 1/4-strength MS medium (Murashige and Skoog 1962) containing 0, 90, 180, 270, and 320 μM of Al. Seeds were treated with water and Et for cultivation. We highlighted that Al significantly impacts the germination and growth of *Q. grandiflora* and *V. tucanorum*, and Et induced germination in *V. tucanorum* seeds without Al, suggesting a substitutive effect. Chapter 2 provides valuable insights into the role of Al in organogenesis and phenolic compound production in these species. The impact of aluminum (Al) on organogenesis and phenolic compound production was observed at 320 μM Al and the absence of 6-Benzylaminopurine (BAP), resulting in the regeneration of adventitious roots in both species. However, the addition of BAP without Al did not generate regeneration responses. Regeneration and shoot development were observed when 0.44 and 0.88 μM BAP were added to the culture medium with 320 μM Al. Additionally, both species exhibited a notable phenolic content, further enhanced by the addition of Al and/or BAP. The antioxidant capacity of the extracts also significantly increased with the addition of Al and/or BAP. These approaches can provide valuable insights for conservation and propagation strategies for these Cerrado species.

Key words: Al-accumulating plants, seed germination, organogenesis, Cerrado species, micropropagation

SUMÁRIO

Introdução geral	8
Referências	16
CAPÍTULO I	
Is aluminum (Al) essential for embryos germination of <i>Qualea grandiflora</i> and <i>Vochysia tucanorum</i> , Al-accumulating species?	28
Abstract	
Introduction	30
Material and methods	33
Study area and plant material	33
Aluminum concentration in donor plants	33
Experimental strategy	34
Culture medium	34
In vitro seed germination essays	35
Embryo germination parameters	35
Ethylene measurements	36
Data analysis	36
Results	37
Aluminum concentration in leaves, fruits, and seeds	37
Aluminum and ethylene effect on seed germination	37
Aluminum and ethylene effect on root and shoot growth	38
Ethylene production in vitro	39
Discussion	39
References:	43
Tables	49
Figures	51
Supplementary material	56
CAPÍTULO II	57
<i>In vitro organogenesis, content phenols and antioxidant capacity of two aluminum accumulator plants species from the Cerrado region, Brazil</i>	57
Abstract	58
Introduction	59
Material and Methods	61
Plant Material	61
Aluminum concentration	62
In vitro seed germination and seedling development	62
Organogenesis Induction from Cotyledonary Leaves Segments of Germinated Seedlings	63
Biometric Parameters	63
Total Phenolics and Antioxidant Activity	64
Statistical Analysis	66

Results	67
In Vitro Seed Germination	67
Effects of BAP and Al Treatments on Shoot and Root Proliferation	67
Total Phenolic Contents of Essential Extracts	68
DPPH Radical Scavenging Assay of Extracts	69
Discussion	69
Conclusions	74
References	74
Tables	83
Figures	84
Supplementary material	90
Considerações finais	92

Introdução geral

A vegetação do Cerrado, amplamente conhecida como ‘savana brasileira’, apresenta entre 1000 e 2000 espécies por ha e se caracteriza por ser um dos *hotspots* mundiais de biodiversidade (COLLI; VIEIRA; DIANESE, 2020; MYERS *et al.*, 2000). Além disso, é o segundo maior bioma brasileiro (COUTINHO, 2002), sendo superado em área apenas pela Amazônia, ocupando 21% do território nacional (KLINK; MACHADO, 2005; RATTER; BRIDGEWATER; RIBEIRO, 2003).

O Cerrado é considerado um mosaico de fisionomias vegetais incluindo florestas, formações savânicas (campo sujo, campo cerrado) e formas campestres bem abertas (campo limpo), que juntas são referidas como Cerrado *sensu lato* (FERREIRA *et al.*, 2003). Espécies lenhosas são distribuídas em fisionomias mais densas, florestais, como é o caso do ‘Cerradão’. Já no cerrado *sensu strictu* (s. str.) as espécies constituem um tipo de fisionomia savânica, contendo uma vegetação mais arbustiva e árvores de sub-bosque, com alta irradiância ao nível do solo (KISSMANN *et al.*, 2012). Contudo, muitas espécies endêmicas têm se perdido nas últimas décadas devido principalmente à grande expansão da agricultura e intensa exploração local de produtos nativos (KLINK; MACHADO, 2005; SANO *et al.*, 2010). Essas atividades antrópicas têm provocado a degradação e a perda de habitats desse ecossistema, colocando em risco a sua conservação e o seu potencial biotecnológico (SANO *et al.*, 2019).

Cerca de metade dos 2 milhões de km² originais do Cerrado foram transformados em pastagens plantadas, culturas anuais e outros tipos de uso de solo (GOMES *et al.*, 2019). Além disso, estudos que contemplam espécies nativas do Cerrado ainda são incipientes se comparados aos de espécies de outros biomas brasileiros, intensificando a perda de material genético vegetal nativo (STRASSBURG *et al.*, 2017). Dessa forma, a conservação e preservação de tais espécies se torna essencial devido ao cenário atual.

Os solos sob o cerrado são geralmente pobres, ácidos ($\text{pH} < 5,0$), bem drenados, profundos e apresentam altos níveis de alumínio trocável (QUEIROZ NETO, 1982; REATTO; CORREIA; SPERA, 1998). O alumínio (Al) pode competir com outros elementos pelos mesmos sítios químicos nas partículas do solo, sendo o terceiro elemento químico mais abundante na crosta terrestre e, em solos ácidos, encontrado principalmente na forma trivalente (Al^{3+}), que é tóxico para a maioria das espécies de plantas (MATSUMOTO, 2000; VARDAR; ÜNAL, 2007). Os solos ácidos representam 30-40% das terras livres de gelo (KOCHIAN; HOEKENGA; PINEROS, 2004; VON UEXKÜLL; MUTERT, 1995) sendo, portanto, juntamente com o Al, ameaças potenciais à agricultura, com impactos negativos para os rendimentos.

O primeiro sintoma da toxicidade do Al é a diminuição do crescimento das raízes (HORST; WANG; ETICHA, 2010; SILVA *et al.*, 2019). Em espécies sensíveis, aproximadamente 80-90% do Al absorvido é retido no sistema radicular (SILVA *et al.*, 2023; VITORELLO; CAPALDI; STEFANUTO, 2005). Além dos efeitos diretos nas raízes, o Al pode causar efeitos ‘indiretos’ em órgãos acima do solo, como crescimento reduzido de brotos (JIANG *et al.*, 2009), baixa troca gasosa foliar e respostas fotoquímicas em *Coffea arabica* (KONRAD *et al.*, 2005), *Zea mays* (LIDON *et al.*, 1999) e *Citrus* spp. (BANHOS; DE SOUZA; HABERMANN, 2016; JIANG *et al.*, 2009; JIANG, 2008; SILVA *et al.*, 2018).

No entanto, apesar da toxicidade, a flora desta região prospera nestes solos ácidos (HABERMANN; BRESSAN, 2011; HARIDASAN, 2008; NOGUEIRA *et al.*, 2019; SOUZA, *et al.*, 2017). Algumas espécies possuem mecanismos de tolerância ao Al, exsudando ácidos orgânicos como citrato, malato, oxalato e succinato através das membranas celulares de suas raízes. Esses ácidos formam complexos não tóxicos com o Al, prevenindo sua absorção ainda na rizosfera (RYAN *et al.*, 2011). Paralelamente,

outras espécies conseguem se desenvolver em solos com alta concentração de Al (m%), acumulando Al em seus tecidos e órgãos sem apresentar danos ou sinais de toxicidade que possam interferir em seu metabolismo ou desenvolvimento (BRESSAN, *et al.*, 2021; DE ANDRADE *et al.*, 2011; DELHAIZE; RYAN, 1995; HARIDASAN, 1982). Exemplos dessas espécies incluem *Fagopyrum esculentum* Moench (Polygonaceae), *Hydrangea macrophylla* L. (Hydrangeaceae) e *Camellia sinensis* (L.) Kuntze (Theaceae), conforme relatado por MA *et al.*, 2001 e WATANABE e OSAKI, 2002. Plantas que armazenam mais de 1000 mg de alumínio por kg de massa foliar seca são chamadas de acumuladoras de Al (CHENERY, 1948). Algumas dessas espécies lenhosas acumuladoras de Al são nativas da vegetação do Cerrado na América do Sul (HARIDASAN, M., 1982) e pertencem às famílias Melastomataceae (gênero *Miconia*), Rubiaceae, Simplicaceae e Vochysiaceae (gêneros *Vochysia* e *Qualea*) (BRESSAN; COAN; HABERMANN, 2016; DE ANDRADE *et al.*, 2011; HARIDASAN, 1982; MALTA *et al.*, 2016; SOUZA, *et al.*, 2015). No entanto, nesta vegetação, essas espécies acumuladoras de Al podem apresentar entre 4.000 e até 20.000 mg Al por kg de massa seca (HARIDASAN, 1982; HARIDASAN, 2008; NOGUEIRA *et al.*, 2019), demonstrando uma grande variação na acumulação de Al. Além das folhas, essas plantas também podem reter Al nas sementes (HARIDASAN, 1982; SCALON; HARIDASAN; FRANCO, 2013).

Qualea grandiflora Mart. e *Vochysia tucanorum* Mart. são espécies de plantas nativas do Cerrado que acumulam Al em suas folhas e raízes (BRESSAN *et al.*, 2021; BRUNNER; SPERISEN, 2013; HARIDASAN, 1982; NOGUEIRA *et al.*, 2019; SILVA, *et al.*, 2023). Pesquisas anteriores mostraram que este metal pode apresentar uma resposta benigna neste grupo de plantas, aumentando a biomassa vegetal e o alongamento das raízes em *C. sinensis*, *Melastoma malabathricum* L. (Melastomataceae) e *Quercus*

serrata Murray (Fagaceae) (BOJÓRQUEZ-QUINTAL *et al.*, 2017). As relações específicas e o impacto potencial do Al nos parâmetros fisiológicos que explicam a influência positiva do alumínio no crescimento das plantas em espécies acumuladoras de alumínio são raramente documentadas ou não comumente relatadas. Outro padrão de distribuição entre essas plantas envolve a dependência do Al, como *Vochysia tucanorum* (Vochysiaceae). Esta espécie não cresce bem em solo calcário e apresenta folhas necróticas e raízes atrofiadas após 45 dias em comparação com um desenvolvimento perfeito em solo ácido rico em Al (SOUZA *et al.*, 2017). O mesmo padrão foi observado quando esta espécie perdeu suas folhas e apresentou raízes necróticas em solução nutritiva sem Al (BRESSAN *et al.*, 2021). *Qualea grandiflora* segue o mesmo comportamento em condições sem Al (CURY *et al.*, 2020). Apesar desses relatos, nenhum papel fisiológico foi atribuído ao Al nessas plantas ainda.

Além de sua habilidade de acumular Al e se adaptar às condições adversas, algumas plantas típicas do Cerrado também têm demonstrado a capacidade de produzir compostos fenólicos (ARRUDA; ARAÚJO; JUNIOR, 2022) como forma de adaptação para resistir ao estresse oxidativo causado por condições ambientais extremas (FARIAS *et al.*, 2013; MOREIRA-ARAÚJO *et al.*, 2019). Os ácidos fenólicos são os metabólitos secundários mais abundantes nas plantas e desempenham papéis importantes em diversos processos fisiológicos (ZHANG *et al.*, 2022). Eles desempenham um papel importante nos mecanismos de defesa das plantas, sendo depositados nas paredes celulares após a infecção por patógenos (KUMAR, Santosh *et al.*, 2020). Quando são excretados pelos sistemas radiculares das plantas, podem inibir o crescimento na rizosfera adjacente e afetar a flora bacteriana do solo (CHOWDHARY *et al.*, 2021). Eles também podem atuar como moduladores do desenvolvimento das plantas, regulando o catabolismo do ácido indol acético (IAA). Eles são eficazes na regulação do crescimento das plantas,

diferenciação celular e organogênese (KUMAR *et al.*, 2020; KUMAR *et al.*, 2023). Eles são conhecidos por suas propriedades antioxidantes (FARIAS *et al.*, 2013), e além de sustentarem a sobrevivência dessas plantas em um ambiente hostil, também despertaram o interesse na indústria farmacêutica e alimentícia devido aos benefícios potenciais para a saúde humana (ALBUQUERQUE *et al.*, 2021; SOARES, 2002). A interação complexa entre o ambiente do Cerrado, incluindo a presença de alumínio, pode influenciar a presença de compostos fenólicos e sua atividade antioxidante (NOGUEIRA *et al.*, 2023).

Investigar os impactos do Al nessas plantas pode ser um desafio, pois propagá-las e cultivá-las em condições *ex situ* que isolam os efeitos do Al de outros elementos é uma tarefa complexa (CARDOSO; DA SILVA, 2013; LEITE *et al.*, 2021; LIMA *et al.*, 2022). A cultura de tecidos pode ser uma técnica valiosa para conservar, cultivar e propagar espécies do Cerrado sob condições controladas, permitindo o isolamento e teste de fatores, como o Al, no meio de cultura. Ela é utilizada para a propagação de plantas quando a regeneração através da germinação de sementes é desafiadora. Técnicas de propagação *in vitro* vem sendo utilizadas como alternativas para propagação de espécies nativas do Cerrado, especialmente para fins econômicos e de conservação (FRANÇA *et al.*, 1995; PEREIRA *et al.*, 2005; REZENDE *et al.*, 2019). Elas oferecem diversas possibilidades para a propagação de plantas podendo se utilizar, por exemplo, de materiais vegetativos para a indução de organogênese e regeneração sob condições assépticas e controladas (CARDOSO; SHENG GERALD; TEIXEIRA DA SILVA, 2018).

Entre as técnicas normalmente utilizadas na cultura de tecidos vegetais, a micropropagação tem sido amplamente utilizada para propagar rapidamente várias espécies de interesse econômico, tais como *Eucalyptus* spp., *Citrus* spp, (*Caryocar brasiliense*), o cajuzinho-do-cerrado (*Anacardium othonianum* Rizz.), o araticum

(*Annona crassiflora*) e o baru (*Dipteryx alata* Vogel.), (AYALA *et al.*, 2019; DANIELLE SOUSA *et al.*, 2017; RIBEIRO *et al.*, 2009; SANTOS *et al.*, 2006; SILVEIRA; DA SILVA; SIBOV, 2022). A micropropagação consiste em técnicas de propagação vegetativa com o objetivo de obter multiplicação vegetal através: a) embriogênese somática, b) indução direta ou indireta de calos para formação de partes aéreas, e c) indução do desenvolvimento de botões apicais/axilares (AL-MAYAH, 2019). Em comparação com os métodos tradicionais de propagação vegetativa de plantas, ela apresenta diversas vantagens, como a obtenção de plantas geneticamente uniformes, livres de pragas e doenças, com alto vigor e qualidade, em um curto espaço de tempo e em um pequeno espaço físico (CARDOSO; SHENG GERALD; TEIXEIRA DA SILVA, 2018; MURASHIGE; SKOOG, 1962). Essa técnica pode contribuir para o estudo da fisiologia, da bioquímica e da genética das plantas do cerrado, bem como para o seu uso sustentável e a sua valorização econômica (NIEMEYER, 2017; SANTOS *et al.*, 2006). Além disso, as técnicas de micropropagação não dependem das condições climáticas e são especialmente úteis em espécies que apresentam sementes recalcitrantes, que perdem rapidamente a sua viabilidade; sendo o caso de várias espécies perenes tropicais (LITZ; JAISWAL, 1991). A micropropagação é também importante para os esforços de conservação a longo prazo para preservar a biodiversidade de espécies e ecossistemas ameaçados (CHOKHELI *et al.*, 2020). Apesar dessas vantagens, a micropropagação de plantas do Cerrado também enfrenta alguns desafios como a escassez de informações sobre as exigências nutricionais e fisiológicas das espécies, a baixa taxa de multiplicação e enraizamento *in vitro*, a ocorrência de anormalidades morfológicas e fisiológicas nas plântulas, a dificuldade de aclimatização e a falta de protocolos padronizados para cada espécie.

A germinação de plantas do Cerrado apresenta características distintas, refletindo a resiliência e a adaptabilidade dessas espécies ao seu ambiente único (FRANCO; HARIDASAN; FERREIRA, 2008; ZAIDAN; CARREIRA, 2008). Existem sementes de certas espécies (ou até mesmo dentro da mesma espécie) que não conseguem germinar ou encontram dificuldades para fazê-lo, mesmo quando incubadas em condições que pareçam ser favoráveis. Essas sementes são classificadas como dormentes e não são capazes de germinar nas mesmas condições (BEWLEY, 1997; CORBINEAU *et al.*, 1995). A maioria das sementes de espécies arbóreas do Cerrado exibe um estado de dormência, com a dormência física sendo a mais prevalente (BASKIN; BASKIN, 2001). Estratégias de regeneração dessas espécies envolvem germinação, no entanto, a dormência de sementes é um fenômeno comum na maioria dessas espécies (ZAIDAN; CARREIRA, 2008). Especificamente, o etileno (Et) regula a germinação e a dormência de várias espécies por meio de uma complexa rede de sinalização hormonal (ARC *et al.*, 2013; MATILLA; MATILLA-VÁZQUEZ, 2008). No contexto das sementes de *V. tucanorum*, foi demonstrado que o Et tem a capacidade de interromper a dormência das sementes e promover a germinação (PEREIRA *et al.*, 2011), embora as justificativas fisiológicas para este fenômeno ainda não estejam completamente esclarecidas.

Considerando esse cenário, o presente trabalho utilizou-se de duas espécies nativas do Cerrado acumuladoras de Al: *Q. grandiflora* e *V. tucanorum*. No capítulo 1, considerando a dificuldade em obter mudas de espécies lenhosas do Cerrado que acumulam Al, e uma possível interação entre o Et e a dormência das sementes dessas espécies, foram realizados testes de germinação em meio de cultura com concentrações crescentes de Al sob a influência de Et, avaliando-se parâmetros de crescimento e performance germinativa. A hipótese é que seus embriões dependem do Al para retomar o crescimento e desenvolvimento e que o Et poderia melhorar o desempenho da

germinação. No capítulo 2, testamos a hipótese da relevância do Al e sua possível interação com a citocinina 6-benzilaminopurina (BAP) na promoção da organogênese de brotos e raízes adventícias dessas espécies. Além disso, investigou-se se a presença de Al e BAP tem uma relação com o conteúdo total de ácidos fenólicos e a atividade antioxidante em extratos dessas duas espécies do Cerrado. Essa abordagem integrada permite uma compreensão mais profunda das interações complexas entre essas espécies do Cerrado, o Al, o BAP e o Et. Dado que não há estudos existentes que empregam o Al em meio de cultura para plantas lenhosas nativas do Cerrado, a importância deste estudo reside em sua capacidade de abrir portas para novas linhas de pesquisa futuras sobre o assunto. Ele oferece uma nova perspectiva e um ponto de partida valioso para explorar ainda mais o potencial e as aplicações do Al na cultura de tecidos de plantas nativas do Cerrado.

Referências

- AL-MAYAH, Ahmed Madi Waheed. Effect of aluminum on the growth of the in vitro culture tissues of the date palm (*Phoenix dactylifera* L.) cv. Um-Aldehin. **Folia Oecologica**, vol. 46, no. 2, p. 164–169, 2019. <https://doi.org/10.2478/foecol-2019-0019>.
- ALBUQUERQUE, Bianca R; HELENO, Sandrina A; OLIVEIRA, M Beatriz P P; BARROS, Lillian; FERREIRA, Isabel C F R. Phenolic compounds: Current industrial applications, limitations and future challenges. **Food & function**, vol. 12, no. 1, p. 14–29, 2021. .
- ARC, Erwann; SECHET, Julien; CORBINEAU, Françoise; RAJJOU, Loïc; MARION-POLL, Annie. ABA crosstalk with ethylene and nitric oxide in seed dormancy and germination. **Frontiers in plant science**, vol. 4, p. 63, 2013. .
- ARRUDA, Henrique Silvano; ARAÚJO, Maria Vitória Lopes; JUNIOR, Mario Roberto Marostica. Underexploited Brazilian Cerrado fruits as sources of phenolic compounds for diseases management: A review. **Food Chemistry: Molecular Sciences**, , p. 100148, 2022. .
- AYALA, Paula G; BRUGNOLI, Elsa A; LUNA, Claudia V; GONZÁLEZ, Ana M; PEZZUTTI, Raúl; SANSBERRO, Pedro A. Eucalyptus nitens plant regeneration from seedling explants through direct adventitious shoot bud formation. **Trees**, vol. 33, p. 1667–1678, 2019. .
- BANHOS, Otávia F.A.A.; DE SOUZA, Marcelo Claro; HABERMANN, Gustavo. High aluminum availability may affect *Styrax camporum*, an Al non-accumulating species from the Brazilian savanna. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, vol. 28, no. 3, p. 321–332, 2016. <https://doi.org/10.1007/s40626-015-0051-5>.

BEWLEY, J Derek. Seed germination and dormancy. **The plant cell**, vol. 9, no. 7, p. 1055, 1997. .

BOJÓRQUEZ-QUINTAL, Emanuel; ESCALANTE-MAGAÑA, Camilo; ECHEVARRÍA-MACHADO, Ileana; MARTÍNEZ-ESTÉVEZ, Manuel. Aluminum, a friend or foe of higher plants in acid soils. **Frontiers in Plant Science**, vol. 8, no. October, p. 1–18, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01767>.

BRESSAN, Anna C.G.; COAN, Alessandra I.; HABERMANN, Gustavo. X-ray spectra in SEM and staining with chrome azurol S show Al deposits in leaf tissues of Al-accumulating and non-accumulating plants from the cerrado. **Plant and Soil**, vol. 404, no. 1–2, p. 293–306, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2841-1>.

BRESSAN, Anna Carolina Gressler; DE OLIVEIRA CARVALHO BITTENCOURT, Brenda Mistral; SILVA, Giselle Schwab; HABERMANN, Gustavo. Could the absence of aluminum (Al) impair the development of an Al-accumulating woody species from Brazilian savanna? **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, vol. 33, no. 3, p. 281–292, 2021. DOI 10.1007/s40626-021-00216-y. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40626-021-00216-y>.

BRUNNER, Ivano; SPERISEN, Christoph. Aluminum exclusion and aluminum tolerance in woody plants. **Frontiers in Plant Science**, vol. 4, p. 172, 2013. .

CARDOSO, Jean Carlos; DA SILVA, Jaime A.Teixeira. Micropropagation of *Zeyheria montana* Mart. (Bignoniaceae), an endangered endemic medicinal species from the Brazilian cerrado biome. **In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant**, vol. 49, no. 6, p. 710–716, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11627-013-9558-0>.

CARDOSO, Jean Carlos; SHENG GERALD, Lee Tseng; TEIXEIRA DA SILVA, Jaime A. Micropropagation in the Twenty-First Century. **Methods in Molecular**

Biology, vol. 1815, p. 17–46, 2018. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8594-4_2.

CHENERY, E. M. Aluminium in the Plant World. **Kew Bulletin**, vol. 3, no. 2, p. 173, 1948. <https://doi.org/10.2307/4119757>.

CHOKHELI, Vasiliy A; DMITRIEV, Pavel A; RAJPUT, Vishnu D; BAKULIN, Semyon D; AZAROV, Anatoly S; VARDUNI, Tatiana V; STEPANENKO, Victoria V; TARIGHOLIZADEH, Sarieh; SINGH, Rupesh Kumar; VERMA, Krishan K. Recent development in micropropagation techniques for rare plant species. **Plants**, vol. 9, no. 12, p. 1733, 2020. .

CHOWDHARY, Vibhakar; ALOOPARAMPIL, Sheena; PANDYA, Rohan V; TANK, Jigna G. Physiological function of phenolic compounds in plant defense system.

Phenolic Compounds—Chemistry, Synthesis, Diversity, Non-Conventional Industrial, Pharmaceutical and Therapeutic Applications, 2021. .

COLLI, Guarino R.; VIEIRA, Cecília R.; DIANESE, José Carmine. Biodiversity and conservation of the Cerrado: recent advances and old challenges. **Biodiversity and Conservation**, vol. 29, no. 5, p. 1465–1475, 14 Apr. 2020. DOI 10.1007/s10531-020-01967-x. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s10531-020-01967-x>.

CORBINEAU, F; PICARD, M A; BONNET, A; COME, D. Effects of production factors on germination responses of carrot seeds to temperature and oxygen. **Seed Science Research**, vol. 5, no. 3, p. 129–135, 1995. .

COUTINHO, Leopoldo Magno. O bioma do cerrado. **Eugen Warming e o cerrado brasileiro: um século depois**, 2002. .

CURY, Natalia F.; SILVA, Renata C.C.; ANDRE, Michelle S.F.; FONTES, Wagner; RICART, Carlos A.O.; CASTRO, Mariana S.; SILVEIRA, Conceição E.S.;

WILLIAMS, Thomas C.R.; DE SOUSA, Marcelo V.; PEREIRA, Luiz A.R. Root proteome and metabolome reveal a high nutritional dependency of aluminium in *Qualea grandiflora* Mart. (Vochysiaceae). **Plant and Soil**, vol. 446, no. 1–2, p. 125–143, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04323-3>.

DANIELLE SOUSA, Ísis; BRUNA SOUSA, Jackellyne; DIONÍSIO PEREIRA, Flávia; DAS GRAÇAS SANTANA, João; RUBIO NETO, Aurélio; SILVA DE ASSIS, Elisvane. Composição do meio de cultivo para produção de microplantas de caju-de-árvore-do-Cerrado (*Anacardium othonianum* RIZZ.) - Composition of the cultivation medium for the production of microplants of Cerrado-tree cashew (*Anacardium othonianum* RIZZ.). **Científic@ - Multidisciplinary Journal**, vol. 4, no. 1, p. 01, 2017. <https://doi.org/10.29247/2358-260x.2017v4i1.p01-11>.

DE ANDRADE, Leide Rovênia Miranda; BARROS, Leila Maria Gomes; ECHEVARRIA, Guillaume Fernandes; VELHO DO AMARAL, Lourdes I.; COTTA, Michelle G.; ROSSATTO, Davi Rodrigo; HARIDASAN, Mundayatan; FRANCO, Augusto César. Al-hyperaccumulator Vochysiaceae from the Brazilian Cerrado store aluminum in their chloroplasts without apparent damage. **Environmental and Experimental Botany**, vol. 70, no. 1, p. 37–42, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.05.013>.

DELHAIZE, Emmanuel; RYAN, Peter R. Aluminum toxicity and tolerance in plants. **Plant physiology**, vol. 107, no. 2, p. 315, 1995. .

FARIAS, K S; SANTOS, T S N; PAIVA, MRAB; ALMEIDA, S M L; GUEDES, P T; VIANNA, A C A; FAVARO, S P; BUENO, N R; CASTILHO, R O. Antioxidant properties of species from the Brazilian cerrado by different assays. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, vol. 15, p. 520–528, 2013. .

FERREIRA, L G; YOSHIOKA, H; HUETE, A; SANO, E E. Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian Cerrado: An analysis within the Large-Scale Biosphere–Atmosphere Experiment in Amazônia (LBA). **Remote Sensing of Environment**, vol. 87, no. 4, p. 534–550, 2003. .

FRANÇA, Suzelei C.; DUARTE, Ines B.; MORAES, Rita M.; PEREIRA, Ana M.S. Micropropagation of *Stryphnodendron polyphythum* (Barbatimão). **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, vol. 42, no. 3, p. 291–293, 1995.

<https://doi.org/10.1007/BF00030002>.

FRANCO, Augusto C; HARIDASAN, Mundayatan; FERREIRA, Cristiane da Silva. Physiological ecology of cerrado plants: new insights and new approaches. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, vol. 20, p. 165–166, 2008. .

GOMES, Luciene; SIMÕES, Silvio J C; DALLA NORA, Eloi Lennon; DE SOUSA-NETO, Eráclito Rodrigues; FORTI, Maria Cristina; OMETTO, Jean Pierre H B. Agricultural expansion in the Brazilian Cerrado: Increased soil and nutrient losses and decreased agricultural productivity. **Land**, vol. 8, no. 1, p. 12, 2019. .

HABERMANN, Gustavo; BRESSAN, Anna C.G. Root, shoot and leaf traits of the congeneric *Styrax* species may explain their distribution patterns in the cerrado sensu lato areas in Brazil. **Functional Plant Biology**, vol. 38, no. 3, p. 209–218, 2011.

<https://doi.org/10.1071/FP10182>.

HARIDASAN, M. Aluminium accumulation by some cerrado native species of central Brazil. **Plant and Soil**, vol. 65, no. 2, p. 265–273, 1982.

<https://doi.org/10.1007/BF02374657>.

HARIDASAN, Mundayatan. Nutritional adaptations of native plants of the cerrado biome in acid soils. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, vol. 20, no. 3, p. 183–195,

2008. <https://doi.org/10.1590/s1677-04202008000300003>.

HORST, Walter J.; WANG, Yunxia; ETICHA, Dejene. The role of the root apoplast in aluminium-induced inhibition of root elongation and in aluminium resistance of plants: A review. **Annals of Botany**, vol. 106, no. 1, p. 185–197, 2010. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq053>.

JIANG, Huan-Xin; TANG, Ning; ZHENG, Jin-Gui; LI, Yan; CHEN, Li-Song. Phosphorus alleviates aluminum-induced inhibition of growth and photosynthesis in Citrus grandis seedlings. **Physiologia Plantarum**, vol. 137, no. 3, p. 298–311, 2009. .

JIANG, Huan Xin; CHEN, Li Song; ZHENG, Jin Gui; HAN, Shuang; TANG, Ning; SMITH, Brandon R. Aluminum-induced effects on Photosystem II photochemistry in Citrus leaves assessed by the chlorophyll a fluorescence transient. **Tree Physiology**, vol. 28, no. 12, p. 1863–1871, 2008. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.12.1863>.

KISSMANN, Camila; TOZZI, Henrique H; MARTINS, Shirley; HABERMANN, Gustavo. Germination performance of congeneric Styra species from the Cerrado sensu lato areas and their distribution pattern in different physiognomies. **Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, vol. 207, no. 9, p. 673–681, 2012. .

KLINK, Carlos A; MACHADO, Ricardo B. Conservation of the Brazilian cerrado. **Conservation biology**, vol. 19, no. 3, p. 707–713, 2005. .

KOCHIAN, Leon V; HOEKENGA, Owen A; PINEROS, Miguel A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. **Annu. Rev. Plant Biol.**, vol. 55, p. 459–493, 2004. .

KONRAD, Maria Luiza Freitas; SILVA, José Aliçandro Bezerra da; FURLANI, Pedro

Roberto; MACHADO, Eduardo Caruso. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em seis cultivares de cafeeiro sob estresse de alumínio. **Bragantia**, vol. 64, p. 339–347, 2005. .

KUMAR, Santosh; ABEDIN, Md Minhajul; SINGH, Ashish Kumar; DAS, Saurav. Role of phenolic compounds in plant-defensive mechanisms. **Plant Phenolics in Sustainable Agriculture: Volume 1**, , p. 517–532, 2020. .

KUMAR, Sumit; KORRA, Tulasi; THAKUR, Rajneesh; ARUTSELVAN, R; KASHYAP, Abhijeet Shankar; NEHELA, Yasser; CHAPLYGIN, Victor; MINKINA, Tatiana; KESWANI, Chetan. Role of Plant Secondary Metabolites in Defence and Transcriptional Regulation in Response to Biotic Stress. **Plant Stress**, , p. 100154, 2023. .

LEITE, Mariluz Silva; PINTO, Tainara Eler Furtado; CENTOFANTE, Agda Rabelo; NETO, Aurélio Rubio; SILVA, Fabiano Guimarães; SELARI, Priscila Jane Romano Gonçalves; MARTINS, Paula Fabiane. Acclimatization of *Pouteria gardeneriana* Radlk micropropagated plantlets: Role of in vitro rooting and plant growth–promoting bacteria. **Current Plant Biology**, vol. 27, no. June 2020, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2021.100209>.

LIDON, Fernando C; BARREIRO, Maria G; RAMALHO, José C; LAURIANO, Joaquim A. Effects of aluminum toxicity on nutrient accumulation in maize shoots: implications on photosynthesis. **Journal of Plant Nutrition**, vol. 22, no. 2, p. 397–416, 1999. .

LIMA, Mayara Rodrigues; GOMES, Hugo Teixeira; CURY, Natalia Faustino; PEREIRA, Luiz Alfredo Rodrigues; DOS SANTOS SILVEIRA, Conceição Eneida. Developing propagation protocols for *Justicia lanstyakii* Rizz. (Acanthaceae), an

ornamental Ni-accumulating subshrub of Brazilian Cerrado. **Biologia**, vol. 77, no. 4, p. 967–980, 2022. DOI 10.1007/s11756-021-00987-4. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11756-021-00987-4>.

LITZ, R E; JAISWAL, V S. Micropropagation of tropical and subtropical fruits. **Micropropagation: technology and application**. [S. l.]: Springer, 1991. p. 247–263.

MA, Jian Feng; RYAN, Peter R.; DELHAIZE, Emmanuel. Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organic acids. **Trends in Plant Science**, vol. 6, no. 6, p. 273–278, 2001. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(01\)01961-6](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(01)01961-6).

MALTA, Priscila Gonçalves; ARCANJO-SILVA, Samara; RIBEIRO, Cleberson; CAMPOS, Naiara Viana; AZEVEDO, Aristéa Alves. *Rudgea viburnoides* (Rubiaceae) overcomes the low soil fertility of the Brazilian Cerrado and hyperaccumulates aluminum in cell walls and chloroplasts. **Plant and Soil**, vol. 408, no. 1–2, p. 369–384, 2016. DOI 10.1007/s11104-016-2926-x. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-016-2926-x>.

MATILLA, A J; MATILLA-VÁZQUEZ, M A. Involvement of ethylene in seed physiology. **Plant Science**, vol. 175, no. 1–2, p. 87–97, 2008. .

MATSUMOTO, H. Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants. 2000. .

MOREIRA-ARAÚJO, Regilda Saraiva dos Reis; BARROS, Nara Vanessa dos Anjos; PORTO, Rayssa Gabriela Costa Lima; BRANDÃO, Amanda de Castro Amorim Serpa; LIMA, Alessandro de; FETT, Roseane. Bioactive compounds and antioxidant activity three fruit species from the Brazilian Cerrado. **Revista Brasileira de Fruticultura**, vol. 41, 2019. .

MURASHIGE, Toshio; SKOOG, Folke. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. **Physiologia plantarum**, vol. 15, no. 3, p. 473–497, 1962. .

MYERS, Norman; MITTERMEIER, Russell A; MITTERMEIER, Cristina G; DA FONSECA, Gustavo A B; KENT, Jennifer. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, vol. 403, no. 6772, p. 853–858, 2000. .

NIEMEYER, Rafael Pereira. Germinação , micropropagação e aclimatização de *Lobelia brasiliensis* A . O . S . Vieira & Shepherd (Campanulaceae), espécie ameaçada e endêmica do Distrito Federal com potencial ornamental. **Programa de Pós-Graduação em Botânica, da Universidade de Brasília**, , p. 87, 2017. .

NOGUEIRA, Matheus Armelin; BRESSAN, Anna C.G.; PINHEIRO, Marcelo H.O.; HABERMANN, Gustavo. Aluminum-accumulating Vochysiaceae species growing on a calcareous soil in Brazil. **Plant and Soil**, vol. 437, no. 1–2, p. 313–326, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-03978-2>.

NOGUEIRA, Matheus Armelin; MARIN, Vitor Rodrigues; HABERMANN, Gustavo; CARDOSO, Jean Carlos. In vitro organogenesis, content phenols, and antioxidant capacity of two aluminum accumulator plant species from the Cerrado region, Brazil. **In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant**, , p. 1–10, 2023. .

PEREIRA, A. M. S.; BERTONI, B. W.; FONSECA, V. S.; AMARANTE, M. F. C.; LOPES, N. P.; PARON, M. E.; FRANÇA, S. C. Micropropagação e conservação de *Lychnophora ericoides* Mart.: uma espécie medicinal do cerrado brasileiro. **Revista Fitos**, vol. 1, no. 02, p. 69–73, 2005. <https://doi.org/10.32712/2446-4775.2005.27>.

PEREIRA, Bruno F; SIMÃO, Edson; TERRA FILHO, João B; CARDOSO, Jean C; CARDOSO, Victor J M. Note on the germination of *Vochysia tucanorum* seeds treated

with growth regulators. **Brazilian Journal of Botany**, vol. 34, p. 231–235, 2011. .

QUEIROZ NETO, J P de. Solos da região dos cerrados e suas interpretações. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 6, no. 1, p. 1–12, 1982. .

RATTER, J. A.; BRIDGEWATER, S.; RIBEIRO, J. F. Analysis of the floristic composition of the Brazilian cerrado vegetation III: Comparison of the woody vegetation of 376 areas. **Edinburgh Journal of Botany**, vol. 60, no. 1, p. 57–109, 2003. <https://doi.org/10.1017/s0960428603000064>.

REATTO, Adriana; CORREIA, Joao Roberto; SPERA, Silvio Tulio. Solos do bioma Cerrado: aspectos pedológicos. **Cerrado: ambiente e flora**, 1998. .

REZENDE, Rodrigo Kelson S.; SCOTON, Ana Maria N.; JESUS, Maílson V.; PEREIRA, Zeva V.; PINTO, Fernanda. Callus induction in baru (*Dipteryx alata* Vog.) explants. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, vol. 47, no. 2, p. 538–543, 2019. <https://doi.org/10.15835/nbha47111366>.

RIBEIRO, Márcia de Nazaré Oliveira; PASQUAL, Moacir; VILLA, Fabíola; PIO, Leila Aparecida Salles; HILHORST, Henk William Maria. In vitro seed germination and seedling development of *Annona crassiflora* Mart. **Scientia Agricola**, vol. 66, no. 3, p. 410–413, 2009. <https://doi.org/10.1590/s0103-90162009000300017>.

RYAN, P R; TYERMAN, S D; SASAKI, Takayuki; FURUICHI, Takuya; YAMAMOTO, Yoko; ZHANG, W H; DELHAIZE, E. The identification of aluminium-resistance genes provides opportunities for enhancing crop production on acid soils. **Journal of Experimental Botany**, vol. 62, no. 1, p. 9–20, 2011. .

SANO, Edson E; RODRIGUES, Ariane A; MARTINS, Eder S; BETTIOL, Giovana M; BUSTAMANTE, Mercedes M C; BEZERRA, Amanda S; COUTO JR, Antônio F;

VASCONCELOS, Vinicius; SCHÜLER, Jéssica; BOLFE, Edson L. Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of environmental management**, vol. 232, p. 818–828, 2019. .

SANO, Edson E; ROSA, Roberto; BRITO, Jorge L S; FERREIRA, Laerte G. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environmental monitoring and assessment**, vol. 166, p. 113–124, 2010. .

SANTOS, Breno Régis; PAIVA, Renato; NOGUEIRA, Raírys Cravo; DE OLIVEIRA, Lenaldo Muniz; DA SILVA, Diogo Pedrosa Corrêa; MARTINOTTO, Cristiano; SOARES, Fernanda Pereira; PAIVA, Patrícia Duarte De Oliveira. Micropropagation of “pequizeiro” (*Caryocar brasiliense* Camb.). **Revista Brasileira de Fruticultura**, vol. 28, no. 2, p. 293–296, 2006. <https://doi.org/10.1590/s0100-29452006000200031>.

SCALON, M C; HARIDASAN, M; FRANCO, A C. A comparative study of aluminium and nutrient concentrations in mistletoes on aluminium-accumulating and non-accumulating hosts. **Plant Biology**, vol. 15, no. 5, p. 851–857, 2013. .

SILVA, Carolina M. S.; CAVALHEIRO, Mariana F.; BRESSAN, Anna C. G.; CARVALHO, Brenda M. O.; BANHOS, Otavia F. A. A.; PURGATTO, Eduardo; HARAKAVA, Ricardo; TANAKA, Francisco A. O.; HABERMANN, Gustavo. Aluminum-induced high IAA concentration may explain the Al susceptibility in *Citrus limonia*. **Plant Growth Regulation**, vol. 87, no. 1, p. 123–137, 22 Jan. 2019. DOI 10.1007/s10725-018-0458-5. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s10725-018-0458-5>.

SILVA, G S; RODRIGUES, J S; DE OLIVEIRA CARVALHO, B M; GAVASSI, M A; BRESSAN, A C G; HABERMANN, G. The absence of aluminum compromises the

root integrity and reduces leaf hydration and Rubisco performance in *Qualea grandiflora*, an Al-accumulating species. **Plant Biology**, 2023. .

SILVA, Giselle Schwab; GAVASSI, Marina Alves; NOGUEIRA, Matheus Armelin; HABERMANN, Gustavo. Aluminum prevents stomatal conductance from responding to vapor pressure deficit in *Citrus limonia*. **Environmental and Experimental Botany**, vol. 155, p. 662–671, 2018. DOI 10.1016/j.envexpbot.2018.08.017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.08.017>.

SILVEIRA, Andreia Alves da Costa; DA SILVA, Livia Cristina; SIBOV, Sérgio Tadeu. In vitro germination and shoot proliferation of *Dipteryx alata* Vogel (Fabaceae) under conventional and natural ventilation. **Ciencia Florestal**, vol. 32, no. 2, p. 996–1010, 2022. <https://doi.org/10.5902/1980509841400>.

SOARES, Sergio Eduardo. Ácidos fenólicos como antioxidantes. **Revista de nutrição**, vol. 15, p. 71–81, 2002. .

SOUZA, Marcelo C de; BUENO, Paula C P; MORELLATO, Leonor P C; HABERMANN, Gustavo. Ecological strategies of Al-accumulating and non-accumulating functional groups from the cerrado sensu stricto. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, vol. 87, p. 813–823, 2015. .

SOUZA, Marcelo Claro; HABERMANN, Gustavo; DO AMARAL, Cárita Liberato; ROSA, Annylory Lima; PINHEIRO, Marcelo Henrique Ongaro; DA COSTA, Fernando Batista. *Vochysia tucanorum* Mart.: an aluminum-accumulating species evidencing calcifuge behavior. **Plant and Soil**, vol. 419, no. 1–2, p. 377–389, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3355-1>.

STRASSBURG, Bernardo B N; BROOKS, Thomas; FELTRAN-BARBIERI, Rafael; IRIBARREM, Alvaro; CROUZEILLES, Renato; LOYOLA, Rafael; LATAWIEC,

Agnieszka E; OLIVEIRA FILHO, Francisco J B; SCARAMUZZA, Carlos A de M; SCARANO, Fabio R. Moment of truth for the Cerrado hotspot. **Nature Ecology & Evolution**, vol. 1, no. 4, p. 99, 2017. .

VARDAR, Filiz; ÜNAL, Meral. Aluminum toxicity and resistance in higher plants. 2007. .

VITORELLO, Victor Alexandre; CAPALDI, Flávia Regina; STEFANUTO, Vanderlei Antonio. Recent advances in aluminum toxicity and resistance in higher plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, vol. 17, no. 1, p. 129–143, 2005.
<https://doi.org/10.1590/s1677-04202005000100011>.

VON UEXKÜLL, H. R.; MUTERT, E. Global extent, development and economic impact of acid soils. **Plant and Soil**, vol. 171, no. 1, p. 1–15, 1995.
<https://doi.org/10.1007/BF00009558>.

WATANABE, Toshihiro; OSAKI, Mitsuru. Mechanisms of adaptation to high aluminum condition in native plant species growing in acid soils: a review. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, vol. 33, no. 7–8, p. 1247–1260, 2002. .

ZAIDAN, Lilian B.P.; CARREIRA, Rosana C. Seed germination in Cerrado species. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, vol. 20, no. 3, p. 167–181, 2008.
<https://doi.org/10.1590/s1677-04202008000300002>.

ZHANG, Yuanyuan; CAI, Ping; CHENG, Guanghui; ZHANG, Yongqiang. A brief review of phenolic compounds identified from plants: Their extraction, analysis, and biological activity. **Natural Product Communications**, vol. 17, no. 1, p. 1934578X211069721, 2022. .

Considerações finais

Neste estudo, demonstramos que o Al tem um efeito significativo na germinação e crescimento de *Q. grandiflora* e *V. tucanorum*. O tratamento das sementes de *V. tucanorum* com Et induziu a germinação do embrião quando o Al não estava presente no meio, sugerindo uma relação substitutiva entre esses compostos. Os embriões de *Q. grandiflora* germinaram independentemente do Al no meio e o Et não influenciou sua germinação. Além disso, os resultados sugerem que a adição de Al em meios de cultura proporciona mudanças bioquímicas, fisiológicas e de desenvolvimento nos tecidos foliares isolados que levam à regeneração de brotos adventícios (+BAP) ou raízes (-BAP) sob cultura *in vitro* para essas espécies. A presença de Al também aumentou o conteúdo fenólico e a capacidade antioxidante dos tecidos foliares isolados para ambas as espécies. Essas descobertas têm implicações importantes para o cultivo e propagação *ex situ* das espécies de Vochysiaceae e demonstram que o Al tem uma relação estreita com sua evolução e o seu desenvolvimento. Além disso, nenhuma pesquisa foi encontrada correlacionando Al com a produção de metabólitos e a regeneração de tecidos, uma vez que este é o primeiro relato na literatura a relacionar Al com o conteúdo fenólico e a atividade antioxidante. Diante desses resultados, sugerimos uma investigação mais detalhada sobre o papel fisiológico do alumínio (Al) e do etileno (Et) na germinação e no desenvolvimento de plântulas e mudas dessas espécies. Além disso, é importante explorar aspectos relacionados à produção de compostos secundários e entender como eles influenciam a regeneração de tecidos nessas espécies. Essa abordagem aprofundada pode fornecer perspectivas valiosas para aprimorar estratégias de conservação e propagação dessas espécies do Cerrado.