



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE BIOLOGIA

JOÃO GABRIEL LEAL MARTINS

MODULADORES CLIMÁTICOS DE FISIOLOGIA DE ÁRVORES  
TROPICAIS SOB SOLOS CONTRASTANTES DO CERRADO BRASILEIRO

CAMPINAS

(2025)

**JOÃO GABRIEL LEAL MARTINS**

**MODULADORES CLIMÁTICOS DE FISIOLOGIA DE ÁRVORES  
TROPICAIS SOB SOLOS CONTRASTANTES DO CERRADO  
BRASILEIRO**

*Dissertação apresentada ao Instituto de  
Biologia da Universidade Estadual de  
Campinas como parte dos requisitos  
exigidos para a obtenção do Título de  
Mestre em Ecologia.*

*Orientador: PETER STOLTENBORG GROENENDYK*

*ESTE ARQUIVO DIGITAL  
CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA  
DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO  
ALUNO JOÃO GABRIEL LEAL  
MARTINS E ORIENTADO PELO  
PETER STOLTENBORG  
GROENENDYK*

CAMPINAS

(2025)

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)  
Biblioteca do Instituto de Biologia  
Mara Janaina de Oliveira - CRB 8/6972

M366m Martins, João Gabriel Leal, 1999-  
Modulares climáticos de fisiologia de árvores tropicais sob solos contrastantes do Cerrado brasileiro / João Gabriel Leal Martins. – Campinas, SP : [s.n.], 2025.

Orientador: Peter Stoltenborg Groenendyk.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Instituto de Biologia.

1. Dendrômetro. 2. Cerrados. 3. Desidratação. 4. Atributos funcionais. 5. Aspidosperma. 6. Solos tropicais. I. Peter Stoltenborg Groenendyk, 1984-. II. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Instituto de Biologia. III. Título.

Informações complementares

**Título em outro idioma:** Climatic modulators of tropical tree physiology on contrasting soils of the Brazilian Cerrado

**Palavras-chave em inglês:**

Dendrometers

Cerrados

Dehydration

Functional traits

Aspidosperma

Tropical soils

**Área de concentração:** Ecologia

**Titulação:** Mestre em Ecologia

**Banca examinadora:**

Peter Stoltenborg Groenendyk [Orientador]

Cleiton Breder Eller

Milena de Godoy Veiga

**Data de defesa:** 23-04-2025

**Programa de Pós-Graduação:** Ecologia

**Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)**

ODS: 15. Vida terrestre

ODS: 13. Ação contra a mudança global do clima

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0003-2774-2242>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/2335276697529736>

## **BANCA DA APROVAÇÃO**

Prof. Dr. Peter Stoltenborg Groenendyk

Prof. Dr. Cleiton Breder Eller

Dra. Milena de Godoy Veiga

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa de Pós Graduação em Ecologia do Instituto de Biologia da Universidade Estadual de Campinas.

## **Dedicatória**

*“Ao verme que primeiro roeu as frias carnes do meu cadáver...”*

*(Machado de Assis, Memórias Póstumas de Brás Cubas, 1881)*

## **Agradecimentos**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, processo nº 88887.833428/2023-00. Agradeço, também, à agência e bolsa de estudos que financiou a realização dessa pesquisa sob o processo nº 2018/01847-0, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Aos meus pais, João Vianey e Carla Maria, bem como à minha avó, Maria Auxiliadora, por muito mais coisas do que eu poderia listar aqui, mas, principalmente, por acreditar nos meus sonhos e tentar vivê-los comigo; por tentar me dar uma educação libertadora, que me mostrasse o mundo e deixasse eu escolher meu caminho nele. Parece que vocês sabiam isso antes de mim, mas eu vou mesmo ser o primeiro cientista da família.

Às minhas irmãs, Valquíria e Roberta; aos meus tios Bosco, Marcelo, Fátima e Pedro e à minha prima Manu e aos meus primos Márcio, Marcelo, Alexandre e Lucas pelo apoio e carinho, mesmo que de longe.

Ao meu professor, orientador e amigo, Peter Stoltenborg Groenendyk. Por cada um dos conselhos, reuniões, oficinas do Dendrolab, apresentações na UPA, scripts no R, viagens de campo, experiências gastronômicas e étlicas, excelentes *Dijenklesters* e por me lembrar que é levemente mais confortável chorar na sombra.

A Naju, Fulaninha, Amanda Shelps, Guilherme Silva e Victor (Picasso), por terem sido meus amigos, graças a vocês, nunca me senti só. Vocês fizeram Campinas não parecer tão longe assim de casa em todos os sentidos que importam.

Aos meus amigos de Fortaleza: Matheus, Mabelle, Alanna, Tainah, Renan, Clara, Yuri, Melissa, Rafa, Alfredo, Johnatas, Igor, Vivi, Estefane por terem feito Fortaleza não parecer tão longe assim de Campinas, cada um da maneira que pôde.

Aos demais amigos que fiz morando na república que fundamos e onde sobrevivemos, apesar dos vermes: Victor, Ana Júlia, Gustavo, Pedro, Yuri, Raquel, Leonardo, Matheus Lameu, Gabriel Benê, Antônio, Carlos, Lucas, Luiz Eduardo, Eduardo, Guilherme, Anhê e Tiago.

A todas as pessoas que fizeram parte da minha vida nesse período: pelas conversas, silêncios, aventuras e pelos aprendizados. Aos amigos e às companhias que, cada qual à sua maneira, ajudaram a construir momentos que vou guardar na memória: Welerson (Xuerlerson), Alan, Jéssica (Dora), Diego (Bagaço), Ana, Luíza, Eduarda, Gabriele

(Galeguinha), Damaris, João (Frango), Breja, Tupi, McLovin, Giovana, Ramon, Marina, Matheus (Motinha) e Vitão

Aos professores e alunos dos cursinhos Emancipa e Colmeia, que tive a honra de integrar durante o mestrado e com quem tive a felicidade de comemorar as aprovações.

A todos os funcionários e terceirizados da Unicamp, em especial aos do Restaurante Universitário, cujo trabalho mantém os equipamentos e serviços essenciais da Universidade. Agradeço também à equipe da secretaria do PPG pela celeridade nos processos e clareza nas explicações.

A todos os profissionais do SAPPE.

À minha psicóloga.

A todos os meus demais amigos e colegas do Dendrolab e do Laboratório de Ecologia Integrativa da Unicamp: Igor, Nelson, Mayda, Dóris, Bruna, Beto, Manolo, Ton, Bruno. Mas em especial ao Vinícius Dorea (Vini) que dividiu as atividades de campo e de pesquisa comigo e foi essencial em todas as etapas da elaboração deste trabalho.

A Richard L. Peters, meu futuro orientador, que não poupou esforços para me ensinar a usar as ferramentas necessárias para finalizar este mestrado e que serão fundamentais para o doutorado, espero que estejamos trabalhando juntos em breve.

Ao Paulo Bittencourt, Rafael Oliveira, Paulo Bernardino “Chicken”, Ricardo, Larissa, Natashi Pilon, Ricardo, Manolo, José Roberto, Bruno Menezes e a todos os demais professores e doutores que me emprestaram um pouco do seu tempo e conhecimento para compor este trabalho.

A Caio e Tina, que estavam constantemente na Chapada como parte fundamental da pesquisa de vários pesquisadores que trabalham lá e nos deram várias informações importantes sobre os locais, pessoas e natureza das redondezas.

A Laryssa Galantini (*in memoriam*), uma pessoa que conheci por pouco tempo, mas que me ofereceu ajuda imprescindível para a condução deste trabalho e, também, uma visão de mundo muito diferente daquela com a qual eu cheguei à Chapada, papéis que ela parece ter tido na vida de todos que a conheceram e que guardam seu nome com carinho.

Ao Sr. José Oliveira, que vive com sua família na Morada do Sol, pela sua abertura em nos deixar conduzir nossa pesquisa na mata em volta da casa dele, pelas deliciosas refeições e pelos conselhos importantes sobre o local.

Aos funcionários, visitantes e residentes da Aldeia Multiétnica, outro local maravilhoso onde tivemos o privilégio de trabalhar.

À equipe do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, sobretudo aos brigadistas, cujo trabalho é imprescindível para manter a Unidade de Conservação que nos permite conduzir pesquisas com segurança e qualidade.

À gata do seu Naná, envolvida no acidente no qual eu tropecei e trinquei o dedão do pé e, conseqüentemente, à equipe do Hospital Municipal de Alto Paraíso de Goiás. Não que tenha sido uma experiência agradável, mas ao menos rendeu uma boa história.

## **Epígrafe**

“Tudo quanto vive, vive porque muda; muda porque passa; e, porque passa, morre. Tudo quanto vive perpetuamente se torna outra coisa, constantemente se nega, se furta à vida.”

(PESSOA, F. Livro do Desassossego, por Bernardo Soares. Vol. II. Mem Martins: Europa-América, 1986.)

## Resumo

As florestas tropicais desempenham papel central nos ciclos globais de carbono e água, sendo suas dinâmicas fortemente influenciadas por fatores climáticos e edáficos. Ainda assim, a interação entre clima e solo como moduladora da fisiologia arbórea em ambientes tropicais sazonais permanece subexplorada. Este estudo investigou como solos com propriedades contrastantes modulam o funcionamento fisiológico de árvores tropicais em duas fitofisionomias do Cerrado brasileiro: o Cerrado Rupestre e a Mata Seca. Entre setembro de 2023 e setembro de 2024, foram monitoradas cinco árvores de *Aspidosperma rizzoanum* no Cerrado Rupestre e cinco de *Aspidosperma subincanum* na Mata Seca, por meio de dendrômetros de alta resolução que registraram variações diárias no diâmetro do tronco. Concomitantemente, foram coletados dados ambientais de temperatura, umidade relativa e condutividade do solo para o cálculo do Déficit de Pressão de Vapor (VPD) e do Conteúdo de Água no Solo (CAS). A Contração Diária Média (CDM) e o Déficit Hídrico Arbóreo (DHA) foram calculados a partir dos dados de variação diamétrica do caule das árvores e utilizados como proxies para estimar, respectivamente, o controle estomático e a eficiência de reidratação noturna. Os resultados indicam que as árvores do Cerrado Rupestre enfrentam maior estresse hídrico, evidenciado por valores significativamente mais elevados de DHA e CDM, estimados por meio de Modelos Lineares Generalizados Mistos (GLMMs), e apresentam menor capacidade de reidratação noturna, refletindo as limitações impostas por solos com baixa retenção de água. Em contraste, as árvores da Mata Seca mostraram maior resiliência fisiológica às variações ambientais, que não impõem condições de estresse hídrico tão severas e permitem respostas fisiológicas mais moderadas. A partir da integração de séries temporais fisiológicas e ambientais obtidas por sensores automáticos, avaliamos a influência de propriedades edáficas sobre as estratégias hidráulicas das espécies. A análise integrada dos dados reforça a importância das propriedades edáficas na regulação das estratégias hidráulicas das espécies, destacando a necessidade de incorporar variáveis edáficas – como textura, profundidade e capacidade de retenção hídrica do solo – em modelos preditivos da dinâmica da vegetação tropical.

**Palavras-chave:** dendrômetros, Cerrado, estresse hídrico, traços funcionais, *Aspidosperma*, solos tropicais contrastantes

## Abstract

Tropical forests play a central role in the global carbon and water cycles, with their dynamics strongly influenced by climatic and edaphic factors. Yet, the interaction between climate and soil as a modulator of tree physiology in seasonal tropical environments remains underexplored. This study investigated how contrasting soil properties modulate the physiological functioning of tropical trees in two vegetation types of the Brazilian Cerrado: a Cerrado Rupestre and a Mata Seca. From September 2023 to September 2024, five individuals of *Aspidosperma rizzoanum* in the Cerrado Rupestre and five of *Aspidosperma subincanum* in the Mata Seca were monitored using high-resolution dendrometers that recorded daily variations in stem diameter. Simultaneously, environmental data on air temperature, relative humidity and soil conductivity were collected to calculate Vapor Pressure Deficit (VPD) and Soil Water Content (SWC). Mean Daily Shrinkage (MDS) and Tree Water Deficit (TWD) were calculated from stem diameter fluctuations and used as proxies for stomatal regulation and nocturnal rehydration efficiency. Results indicate that trees in the Cerrado Rupestre experienced higher water stress, as evidenced by significantly higher values of TWD and MDS estimated using Generalized Linear Mixed Models (GLMMs), and showed lower capacity for nocturnal rehydration, reflecting soil limitations in water retention. In contrast, trees in the Mata Seca showed greater physiological resilience to environmental variability, with more moderate hydraulic responses. By integrating continuous physiological and environmental time series, we evaluated how soil properties shape water-use strategies. The integrated analysis highlights the central role of soil variables—such as texture, depth, and water retention capacity—in regulating tree hydraulic strategies and underscores the importance of incorporating edaphic heterogeneity into predictive models of tropical vegetation dynamics.

**Keywords:** dendrometers, Cerrado, water stress, functional traits, *Aspidosperma*, contrasting tropical soils

## Sumário

<b>Introdução</b>	<b>13</b>
<b>Material e Métodos</b>	<b>15</b>
Localidades de estudo	15
Espécies de estudo	17
Quantificação das características hídricas dos solos	17
Sensores de seca atmosférica	18
Sensores de umidade do solo	18
Dendrômetros	19
Teste de premissas	20
Cálculo da Contração Diária Média (CDM) e do Déficit Hídrico Arbóreo (DHA)	23
Tratamento dos dados	26
Abordagens estatísticas e testes de hipóteses	27
<b>Resultados</b>	<b>31</b>
Resultados gerais	31
Caracterização do contraste entre os solos	33
Variação Temporal dos Parâmetros Ambientais e Fisiológicos	34
Respostas Marginais dos Modelos de CDM e DHA	36
Variações Diárias e Déficit Hídrico	37
<b>Discussão</b>	<b>39</b>
Solos contrastantes e funcionamento hidráulico	39
Respostas fisiológicas ao gradiente hídrico	39
Vulnerabilidade ecológica e projeções climáticas	41
Integração com outras avaliações de crescimento	41
Potencial de aplicação e continuidade	43
<b>Conclusão</b>	<b>44</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>45</b>
<b>Apêndices:</b>	<b>52</b>
<b>Folhas de anexo</b>	<b>54</b>

## Introdução

As florestas tropicais são componentes fundamentais dos ciclos globais de carbono e água, contribuindo substancialmente para o sequestro terrestre de carbono e para a regulação hidrológica regional (LEWIS et al., 2005; ZUIDEMA et al., 2022). Embora os padrões macroecológicos de vegetação sejam fortemente influenciados pelo clima, em escalas locais e sub-regionais, fatores edáficos — como profundidade, textura e estrutura do solo — exercem papel determinante na modulação de traços funcionais e estratégias fisiológicas das espécies vegetais (LIRA-MARTINS et al., 2022; QUESADA et al., 2012; ZUIDEMA et al., 2013).

Ainda há uma lacuna crítica quanto à incorporação de dados fisiológicos de espécies tropicais em modelos de dinâmica da vegetação, especialmente nos Modelos Globais de Dinâmica de Vegetação (DGVMs) (SCHEITER et al., 2013). Esses modelos, essenciais para prever a distribuição de biomas, fluxos de carbono e respostas ecossistêmicas às mudanças climáticas, frequentemente ignoram o papel modulador dos solos em escalas locais (SALOMÓN et al., 2022). Tal deficiência compromete a capacidade preditiva dos DGVMs (KING et al., 2013), lacuna que também se estende a ecossistemas tropicais sazonais sujeitos a maior variabilidade hídrica (PETERS et al., 2023a).

Traços funcionais, como o P50 — potencial hídrico correspondente a uma perda de 50% da condutividade hidráulica — têm sido utilizados como indicadores de vulnerabilidade à seca e incorporado a DGVMs para melhorar a representação de respostas fisiológicas à seca em larga escala (LENS et al., 2013; PETERS, 2023; POWELL, 2013). Contudo, ainda são escassas as investigações que associam métricas fisiológicas com abordagem a nível de mecanismos e de traços funcionais à variabilidade edáfica em ecossistemas tropicais sazonais.

A dendrometria automática de alta resolução tem se consolidado como abordagem promissora para aferir, em escala sub-diária, traços hidráulicos associados ao uso da água pelas árvores. Em particular, a Contração Diária Média (CDM) e o Déficit Hídrico Arbóreo (DHA) têm sido empregados como proxies de controle estomático e reidratação noturna, respectivamente (COCOZZA et al., 2016; DIETRICH et al., 2018; PETERS et al., 2019). A resposta dessas métricas a variações no conteúdo de água no solo (CAS) e no déficit de pressão de vapor (VPD) pode revelar mecanismos sensíveis de ajuste hidráulico, especialmente em transições entre a estação chuvosa e seca, o que deve ajudar a refinar os modelos de dinâmica de vegetação ao nível de respostas fisiológicas vegetais às variações desses fatores (DIETRICH et al., 2018; SALOMÓN, 2022; ZWEIFEL et al., 2021).

Neste estudo, investigamos como solos contrastantes modulam estratégias de uso da água em duas espécies congêneras do gênero *Aspidosperma*, sob condições climáticas similares: *Aspidosperma rizzoanum* (em Cerrado Rupestre) e *Aspidosperma subincanum* (em Mata Seca). As áreas diferem marcadamente em profundidade, fertilidade e drenagem dos solos, sendo o Cerrado Rupestre caracterizado por solos rasos, bem drenados e ácidos, e a Mata Seca por solos mais profundos, ricos e mal drenados, sobre substrato cárstico.

Monitoramos diariamente variações micrométricas no diâmetro de cinco indivíduos de cada espécie, utilizando dendrômetros automáticos de alta precisão. Simultaneamente, registramos variáveis ambientais como temperatura, umidade relativa do ar e condutividade elétrica do solo, utilizadas para estimar o VPD e o CAS. A partir dessas informações, avaliamos a dinâmica temporal de CDM e DHA ao longo da transição chuva-seca e suas relações com CAS e VPD.

As seguintes hipóteses foram testadas:

Hipótese 1: Espera-se uma resposta não-linear de CDM e DHA às variações climáticas, com CDM apresentando relação unimodal e DHA aumentando com o estresse hídrico, refletindo um controle hidráulico coordenado.

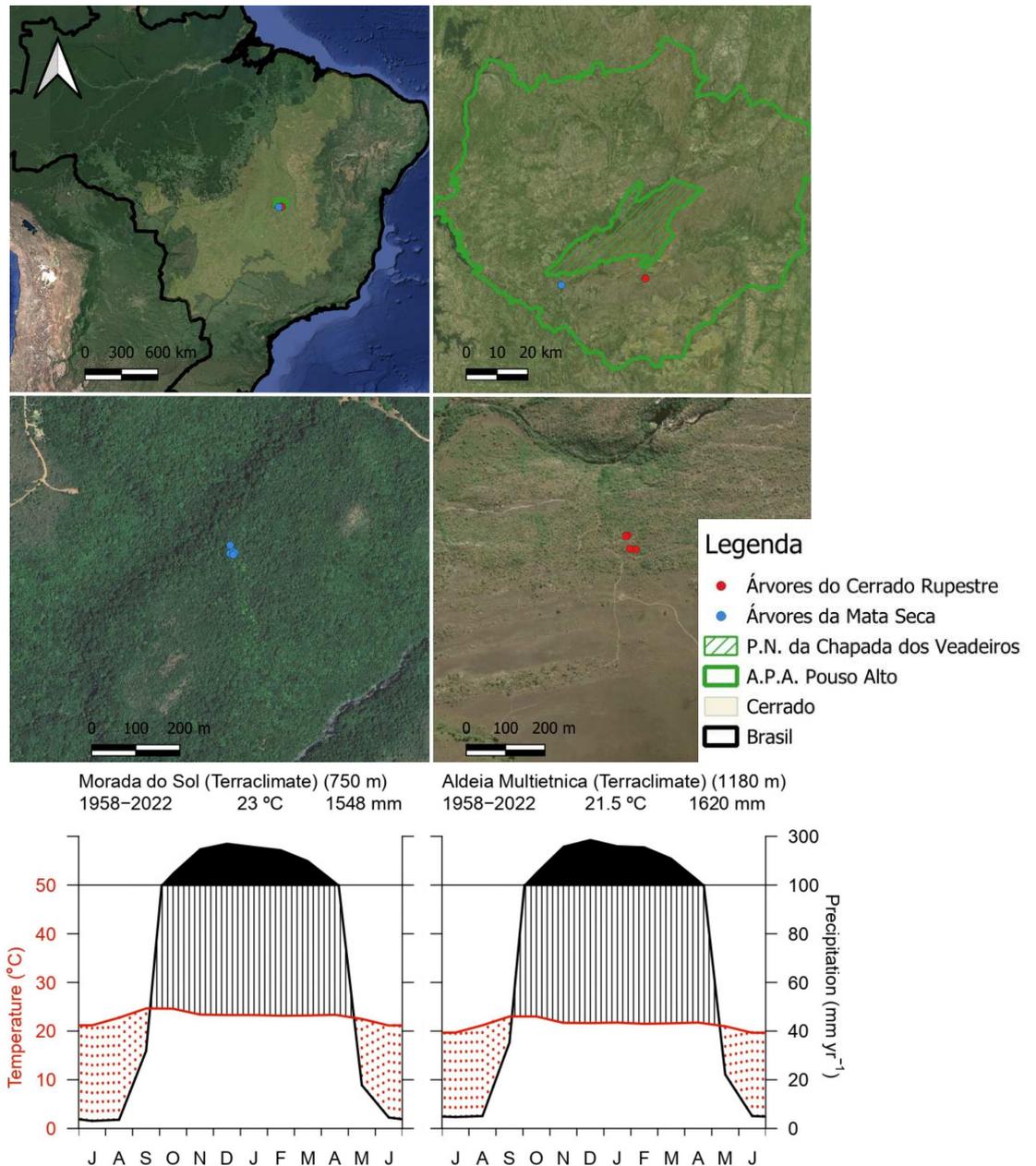
Hipótese 2: O solo mais raso e drenado do Cerrado Rupestre deve acentuar o estresse hídrico em *A. rizzoanum*, resultando em valores mais elevados de DHA e uma resposta temporal mais rápida às variações de CAS e VPD.

Hipótese 3: *A. rizzoanum* deve apresentar CDM menor e um pico de resposta antecipado em relação a *A. subincanum*, dado o maior estresse hídrico imposto pelo solo.

Ao integrar dados dendrométricos, climáticos e edáficos, este estudo busca preencher lacunas na compreensão da fisiologia hidráulica em ecossistemas tropicais sazonais, contribuindo para o aprimoramento dos DGVMs e fortalecendo a base teórica para estratégias de conservação baseadas em traços funcionais.

## Material e Métodos

### Localidades de estudo



**Figura 1:** Localização geográfica dos indivíduos de *Aspidosperma* spp. coletadas em duas fitofisionomias contrastantes: Cerrado Rupestre (Aldeia Multiétnica) e Mata Seca (Morada do Sol). Mapas superiores indicam a área de estudo dentro do Brasil e do Cerrado, os inferiores as posições dos indivíduos. Diagramas climáticos de Walter & Lieth mostrando as condições climáticas de precipitação e temperatura para as duas localidades (baseados em dados do Terraclimate).

O monitoramento das árvores ocorreu de setembro de 2023 a setembro de 2024 em duas localidades próximas ao Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, uma das Unidades de Conservação do Cerrado no Brasil Central. No parque e nas cercanias prevalece um mosaico de fitofisionomias contrastantes crescendo sobre solos distintos (LIRA-MARTINS et al. 2022) e nós trabalhamos em uma localidade de Cerrado Rupestre e em outra de Mata Seca. O Cerrado Rupestre ocorre em áreas com o solo raso, bem drenados e de baixa fertilidade associado a afloramentos rochosos (LIRA-MARTINS et al. 2022). A Mata Seca, por sua vez, está associada a afloramentos calcários e às formações sedimentares decorrentes, possuindo solos com fertilidade, disponibilidade hídrica e profundidade mais elevados que do Cerrado Rupestre (LIRA-MARTINS et al. 2022). O clima na região é Aw Köppen-Geiger (CARDOSO, 2014; KÖPPEN, 1900), com precipitação média anual ~1.600 mm, com uma estação seca de maio a setembro e estação chuvosa de outubro a abril. Devido à diferenças em altitudes, a temperatura média anual na localidade de Cerrado Rupestre é de 21.5°C (a 1180m acima do nível do mar), enquanto que na localidade de Mata Seca é de 23°C (com altitude de 750m; Figura 1) (MACHADO, 2020).

Para avaliar as diferenças nas propriedades dos solos, coletamos amostras de solo a aproximadamente 20 cm da superfície em três pontos no Cerrado Rupestre e em 25 pontos na Mata Seca. Temos um maior número de amostras de solo na Mata Seca devido a coletas para um outro projeto (dissertação de mestrado Victor Barbosa). A partir dessas coletas, fizemos uma caracterização das propriedades químicas e físicas do solo, que consistiu na análise da proporção de matéria orgânica, areia, silte e argila, bem como na quantificação de elementos químicos como P, Ca, Mg, K etc. e de características químicas como Capacidade de Troca Catiônica. Para quantificar grandes eixos de variabilidade nas características dos solos, fizemos um análise de componentes principais com as variáveis: pH, Fósforo resina (P<sub>res</sub>), Matéria orgânica (OM), Alumínio (Al), Capacidade de Troca Catiônica (CEC), soma de bases (SoB) e proporção de areia e silte (*sand* e *silt*, respectivamente). Também comparamos as diferenças entre as localidades para todos os fatores supracitados. Ficou evidente que apesar da similaridade climática, as localidades apresentam solos contrastantes.

## Espécies de estudo

Em cada localidade instalamos sensores de modo a acompanhar cinco indivíduos de cada espécie em localidades próximas (portanto sob influência climática similar), mas com solos bastante distintos. Na ausência de pares da mesma espécie, escolhemos duas espécies congêneras nativas pertencentes ao gênero *Aspidosperma*: *Aspidosperma rizzoanum* Scudeler & A.C.D.Castello é a espécie encontrada em áreas de Cerrado Rupestre e ocorre em vegetação sobre afloramentos rochosos; a espécie é considerada ameaçada em razão da sua área de ocorrência limitada, fragmentação das populações e declínio de habitat por pressão de atividades econômicas ligadas à pecuária e mineração (CASTELLO, 2025; FERNANDEZ & AMORIM, 2020), e *Aspidosperma subincanum* Mart. é a espécie encontrada em áreas de Mata Seca, ocorrendo também em Florestas Ciliar ou de Galeria e Floresta Estacional Semidecidual (CASTELLO, 2025). Ambas as espécies, por fazerem parte do gênero *Aspidosperma*, têm potencial madeireiro e farmacológico (FERNANDEZ & AMORIM, 2020). No Cerrado Rupestre os indivíduos tinham circunferências entre 32 e 43 cm e na Mata Seca entre 39 e 47 cm. Ambas as espécies são decíduas e possuem fenologia foliar similar (períodos com e sem folhas), conforme observada em campo, estando sem folhas de Agosto a Novembro.

## Quantificação das características hídricas dos solos

A partir dos dados básicos advindos da coleta de solo, pudemos calcular, para cada localidade, a Capacidade de Campo e o Ponto de Secagem Mínimo, essenciais para ajustar as medidas brutas de condutibilidade do solo e transformá-las em Conteúdo de Água no Solo, conforme os cálculos descritos em Saxton & Rawls, 2006 e em Rab et al, 2011:

Equação para Capacidade de Campo (FC):

$$FC = - 0,251 \times s + 0,195 \times c + 0,011 \times Om + 0,432$$

Equação para Ponto de Murcha Permanente (PWP):

$$PWP = - 0,024 \times s + 0,487 \times c + 0,006 \times Om + 0,005 \times (s \times Om) \\ - 0,013 \times (c \times Om) + 0,068 \times (s \times c) + 0,031$$

Onde: "s" corresponde ao valor decimal da proporção de areia no solo, "c" corresponde ao valor decimal da proporção de argila no solo e "Om" corresponde ao valor decimal da proporção de matéria orgânica. A Capacidade de Campo (*FC*) se trata da quantidade máxima de água que o solo consegue reter posteriormente a drenagem gravitacional; ou seja, de 1 a 3 dias após chuvas intensas, quando o excesso de água foi drenada pela gravidade e resta apenas a água retida pela capilaridade do solo. Desse modo, determina a quantidade de água disponível para as plantas entre os eventos de chuva (VEIHMEYER & HENDRICKSON, 1931). O Ponto de Murcha Permanente (*PWP*), por sua vez, representa o ponto onde a água no solo já está tão agregada às partículas do solo que já não pode ser absorvida pelas plantas, levando à secagem e perda de turgor irreversível das plantas (BRIGGS & SHANTZ, 1912).

### Sensores de seca atmosférica

Em cada uma das localidades, foi instalado um sensor ambiental comercializado pela Plantem de temperatura (°C) e umidade relativa do ar (%). O sensor foi instalado em uma área próxima às árvores, em um poste acima do dossel. Os dados foram registrados a cada 15 minutos em cartões de memória através de data loggers com estruturas de proteção contra as intempéries em campo da marca Plantem. Esses dados primários foram posteriormente agregados para resoluções horárias e diárias e usados para calcular o VPD usando a equação de Tetens (ALLEN, 1998):

$$VPD = e_s - e_a$$

Onde " $e_s$ " é a pressão de saturação de vapor, calculada a partir da temperatura ( $t$ ) e " $e_a$ " é a pressão real de vapor, obtida multiplicando " $e_s$ " pela umidade relativa ( $r_h$ ), calculadas como:

$$e_s = 0,6108^{\left(\frac{17,27 \times t}{t+237,3}\right)}$$

$$e_a = (r_h/100) \times e_s$$

## Sensores de umidade do solo

Em cada uma das localidades, foi instalado um sensor de condutibilidade do solo do modelo Teros 10 a uma profundidade de 15 a 20 cm. Os sensores de condutividade do solo contam com duas hastes metálicas que funcionam como eletrodos e são inseridas diretamente no solo. Ao aplicar uma corrente elétrica entre os eletrodos é possível medir a resistência do solo (maior resistência em solos mais secos), e o dado bruto foi transformado posteriormente.

Os dados foram registrados a cada 15 minutos em cartões de memória através de data loggers com estruturas de proteção contra as intempéries em campo da marca Plantem e posteriormente agregados para resoluções horárias e diárias. Os dados brutos de condutibilidade do solo foram transformados em Conteúdo de Água no Solo (*CAS*) ajustados para variar entre os valores de Capacidade de Campo e de Ponto de Secagem Permanente do solo de cada localidade conforme a fórmula derivada da literatura da área (ALLEN et al., 1998; RAB et al., 2011; TEIXEIRA et al., 2021):

$$CAS = CN - PWP/FC - PWP$$

Onde: "*CN*" representa a medida de condutibilidade aferida pelo sensor normalizada de 0 a 1, "*FC*" representa a Capacidade de Campo e "*PWP*" representa o Ponto de Murcha Permanente.

## Dendrômetros

Em cada um dos cinco indivíduos de cada espécie, foram instalados dois dendrômetros, um diretamente na casca após a remoção de camadas excessivas de súber, o outro foi instalado diretamente no xilema (após remoção cuidadosa da casca e câmbio vascular). Ambos os dendrômetros tiveram os dados registrados a cada 15 minutos em cartões de memória através de data loggers com estruturas de proteção contra as intempéries em campo da marca Plantem. Esses dados primários foram posteriormente agregados para resoluções horárias e diárias.

Foram utilizados dendrômetros baseados em potenciômetros lineares, ou seja, equipamentos que medem a variação do diâmetro do caule ao transformar deslocamentos mecânicos em variações de resistência elétrica. As medições são contínuas e de alta precisão

(micrométrica) e foram posteriormente transformadas em medidas de deslocamento. Neste estudo, utilizamos dendrômetros da marca Midori; é essencial calibrar as medidas de transformação a depender da marca. Os dados obtidos dos sensores instalados sob a casca apresentaram inconsistências e foram ignorados, uma vez que trabalhos similares conseguiram resultados interessantes apenas com dendrômetros instalados sobre a casca (KING et al., 2013; PETERS et al., 2019).

Os dados brutos de tensão e de corrente e transformados em resistência foram obtidos com os dendrômetros sobre a casca transformados em medidas em micrômetros ( $\mu\text{m}$ ,  $1 \times 10^{-6}$  m) a partir dos dados técnicos fornecidos pelo fabricante, Midori, e do fator de transformação aferidos empiricamente em laboratório, com o deslocamento do sensor com precisão em milímetros usando um motor simples de rotação e o posterior cálculo da proporção distância/resistência. Depois desses testes, chegamos aos seguintes valores para transformação:

$$\text{Resistência} = \text{Tensão medida (mV)} / \text{Corrente aplicada (A)}$$

$$\text{Deslocamento máximo} = 20 \text{ mm}$$

$$\text{Resistência total} = 2000 \Omega$$

$$\text{Fator de correção} = \text{Deslocamento/Resistência} = 20\text{mm}/2000 \Omega = 0,01 \text{ mm}/\Omega$$

$$\text{Conversão para } \mu\text{m}: 1 \Omega = 10 \mu\text{m}$$

Ou seja, cada  $\Omega$  de variação registrado pelos dendrômetros corresponde a  $10 \mu\text{m}$

### **Teste de premissas**

Parte relevante do nosso estudo depende das premissas de que a variação do clima nas localidades, mensurado por variações no *VPD*, não possui diferenças significativas entre localidades. Contrariamente, espera-se que as características distintas entre os solos (pH, textura, matéria orgânica etc.) determinem diferenças significativas na disponibilidade hídrica (medida em Conteúdo de Água no Solo) entre as localidades; sendo assim fundamental mensurar essas características e investigar a significância estatística das suas diferenças.

Para testar a similaridade da distribuição e dos valores, os dados foram organizados por área e comparados ao longo do tempo, bem como na distribuição dos valores médios conforme a Figura 2 comparando as medidas com uma localidade em cada eixo e P2 com uma

distribuição de densidade de distribuição dos valores. Por fim, foi feito um teste de Wilcoxon pareado para cada variável em determinada data entre as localidades, permitindo a comparação dos valores ao longo de suas séries temporais sincronizadas.

Além disso, foi necessário estimar o tamanho do efeito da diferença das variáveis padronizadas de Conteúdo de Água no Solo (*CAS*) e do *VPD* entre as duas localidades usadas no Modelo Linear Generalizado Misto (GLMM). Para tanto, foi calculado o coeficiente de “d” de Cohen (COHEN, 1988) usando a função “cohen.d” no ambiente R (R Core Team, 2023) conforme a equação:

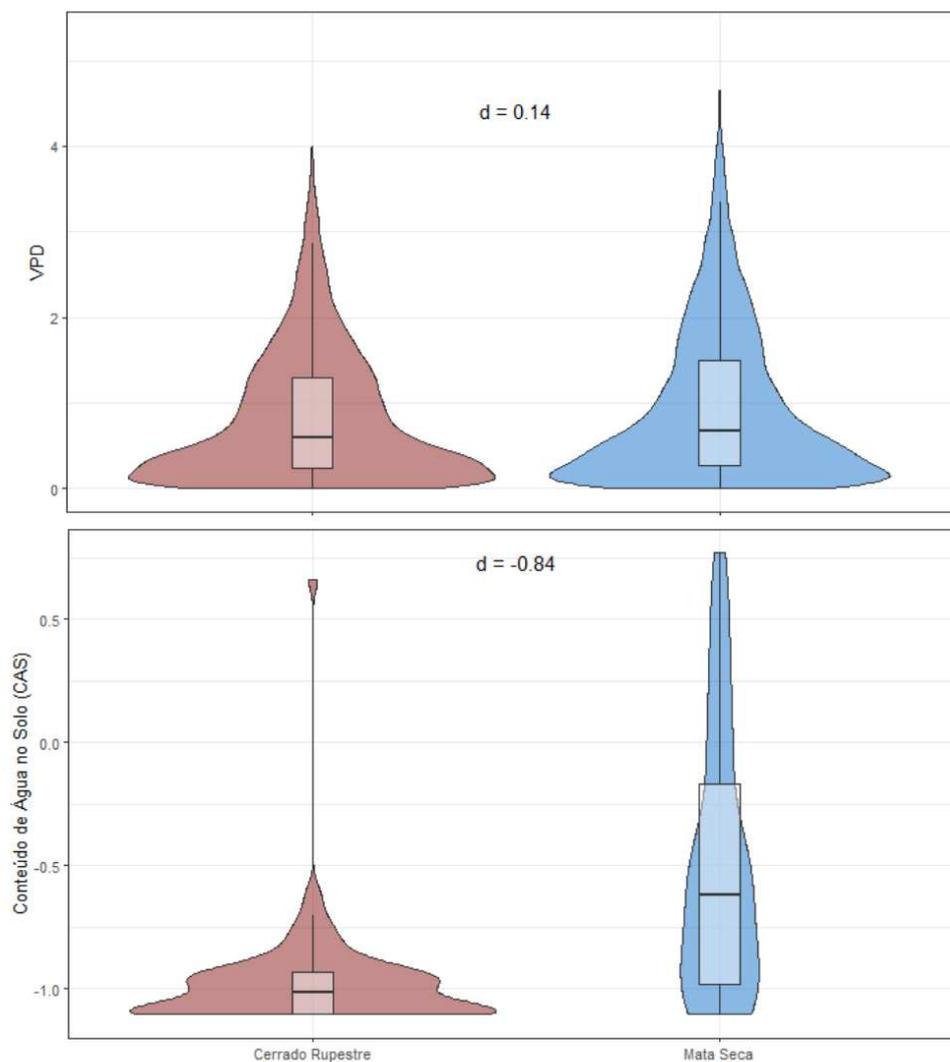
$$d = \bar{X}_1 - \bar{X}_2 / S_p$$

Onde  $\bar{X}_1 - \bar{X}_2$  representa a diferença entre as médias das medidas de cada variável para cada localidade e  $S_p$  representa o desvio padrão combinado (*pooled standard deviation*), calculado conforme a equação:

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1) S_1^2 + (n_2 - 1) S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

Onde  $S_1$  e  $S_2$  correspondem ao desvios padrão das amostras e  $n_1$  e  $n_2$  correspondem aos tamanhos amostrais. Os valores foram interpretados conforme as diretrizes de Cohen (1988) onde valores de “d” próximos a 0,2 indicam um efeito pequeno, próximos a 0,5 indicam um efeito médio e próximos a 0,8 indicam um efeito grande

Adicionalmente, foi necessário construir uma Análise de Componentes Principais (PCA) considerando as variáveis físico-químicos dos solos (proporção de argila, areia, matéria orgânica e quantidade de nutrientes) das localidades em múltiplos eixos, conforme o descrito no tópico inicial de Material e Métodos.



**Figura 2:** Violin plots e box plots mostrando as distribuições dos valores de VPD e de Conteúdo de Água no Solo (CAS) durante o período analisado para as duas localidades de estudo: Cerrado Rupestre (vermelho) e Mata Seca (azul). A estatística “d” representa o teste de tamanho de efeito de Cohen. O efeito de Cohen mede o tamanho do efeito que compara a diferença entre as médias de dois grupos em termos de desvios-padrão independentemente da escala original da variável. No gráfico, o  $d=0,14$  (para VPD) sugere que a diferença entre “Cerrado Rupestre” e “Mata Seca” nessa variável é pequena, enquanto o  $d=-0,84$  (para Conteúdo de Água no Solo) indica uma diferença mais acentuada. O sinal negativo mostra que, em média, o valor do grupo de referência (neste caso, “Mata Seca”) está abaixo do outro grupo.

## Cálculo da Contração Diária Média (CDM) e do Déficit Hídrico Arbóreo (DHA)

A limpeza e análise dos dados foi feita conforme trabalhos recentes a respeito do tratamento de dados de séries temporais de dendrômetros e de fluxo de seiva (KNÜSEL et al. 2021; LUDOVIĆ et al., 2022; POYATOS et al. 2021).

Mesmo após a transformação dos dados dos dendrômetros de resistência elétrica para deslocamento mecânico do caule, essa informação sozinha não traz métricas de dinâmica de água no tronco. Os dados relevantes são extraídos a partir da comparação entre os diâmetros do caule de cada árvore em condições e horários específicos. A **Contração Diária Média** (Figura 3a), por exemplo, é obtida a partir da seguinte fórmula:

$$CDM = \frac{|shrink\ amp|}{CDM_{m\acute{a}x}}$$

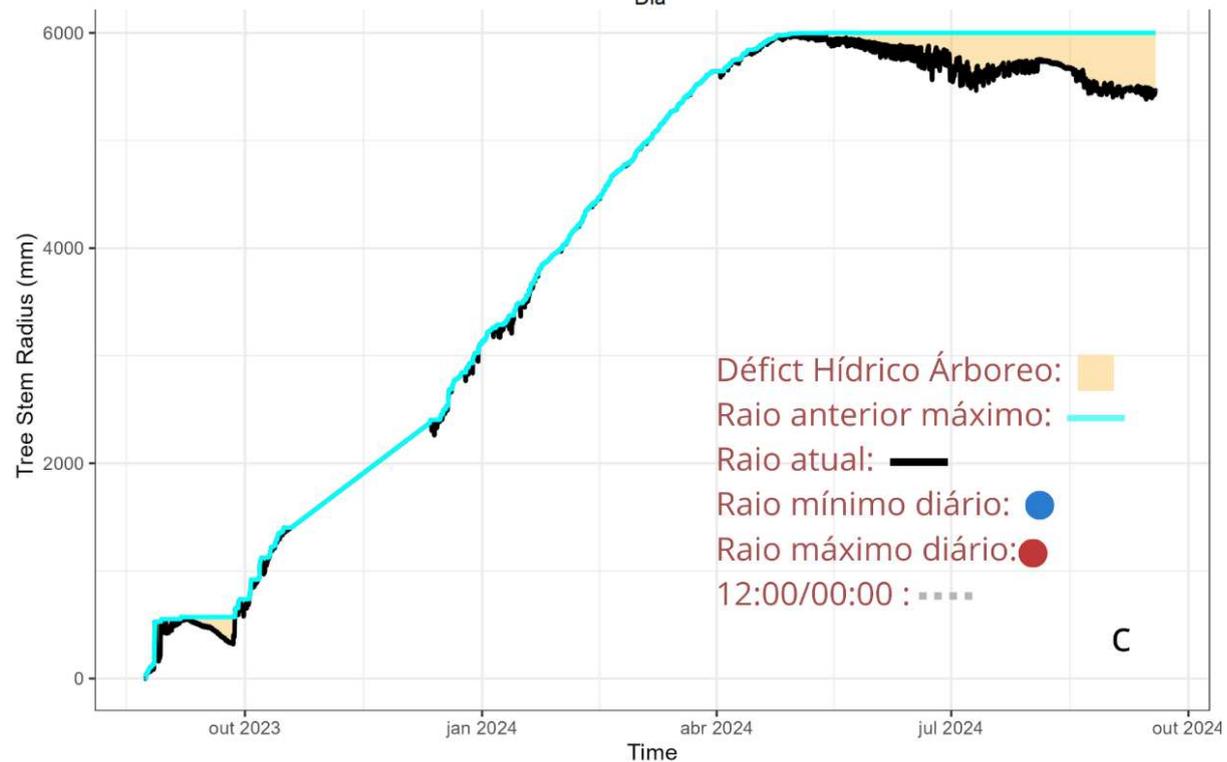
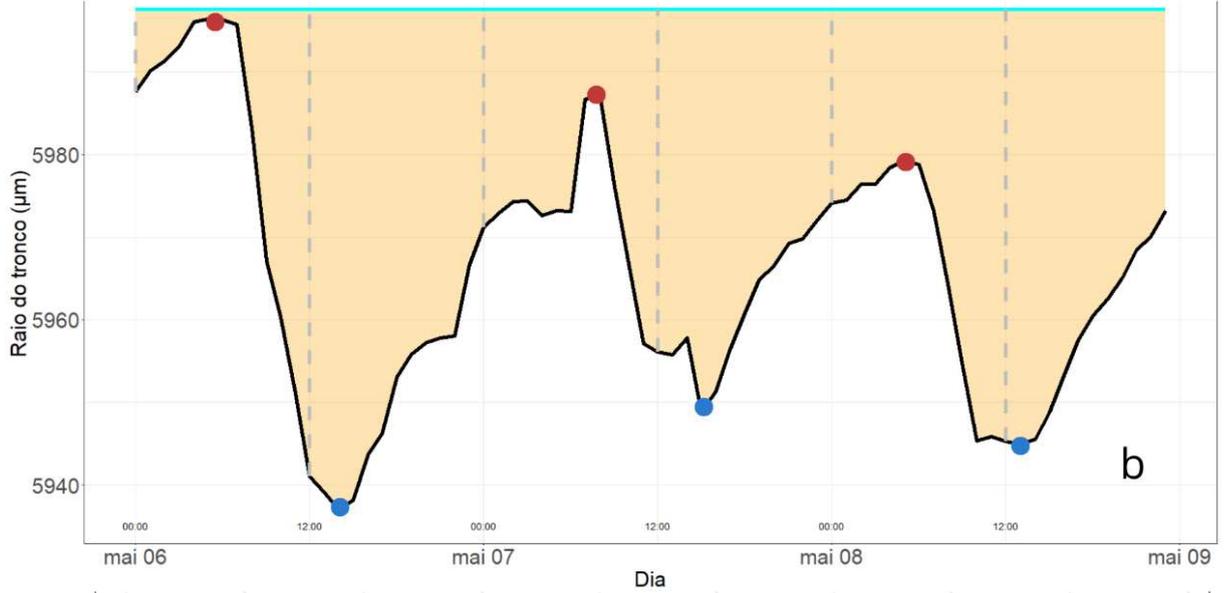
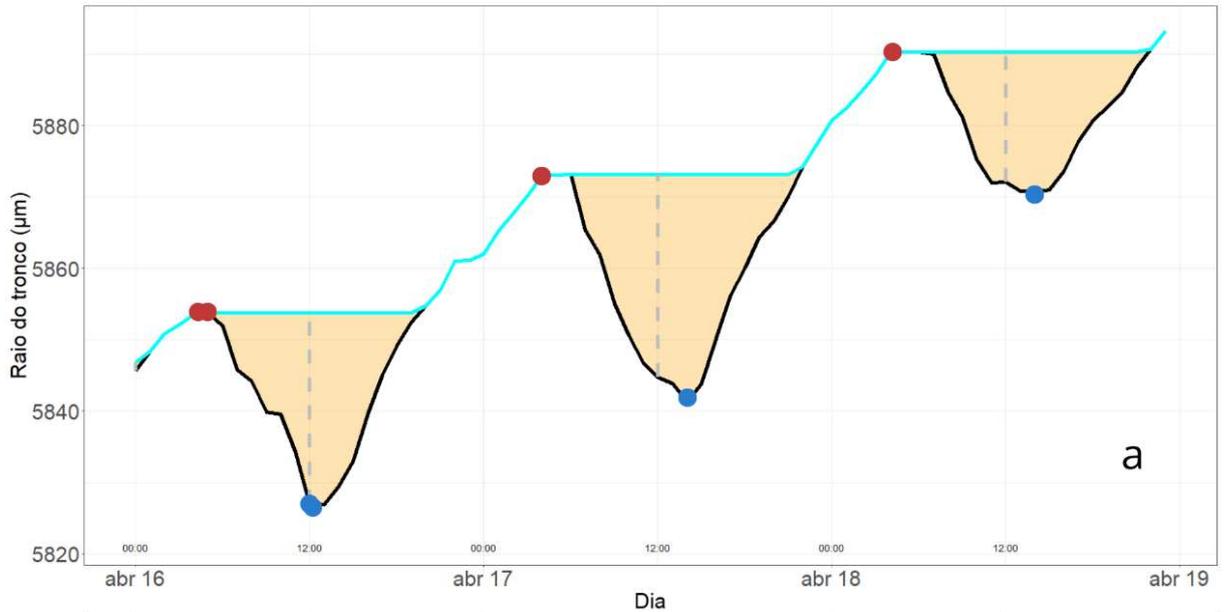
Onde:  $CDM_{m\acute{a}x}$  corresponde ao valor máximo de Contração Diária Média para o indivíduo em questão, que é o divisor do valor absoluto da variável "*shrink amp*" que é calculada pelo pacote "treenetproc" usando a função "proc\_dendro\_L2", que trabalha com a obtenção de métricas fisiológicas relevantes a partir dos dados ambientais (temperatura) e fisiológicos (variação do diâmetro do caule) agregados em escala horária e diária por indivíduo (KNÜSEL et al., 2021). A variável "*shrink amp*" se refere à diferença entre o diâmetro mínimo e o diâmetro máximo de um indivíduo em um mesmo ciclo circadiano, isto é, um período de 24 horas que abrange a madrugada logo antes do amanhecer (*pre-dawn*) e o horário de maior intensidade luminosa (*midday*), geralmente em torno do meio dia. O valor máximo para Contração Diária Média deve ser calculado de maneira independente para cada indivíduo. Desse modo, esse valor é usado como *proxy* do controle estomático, uma vez que o diâmetro do caule varia principalmente em função da abertura e fechamento dos estômatos (DIETRICH et al., 2018; HABERSTROH et al. 2025; KING et al., 2013)

O **Déficit Hídrico Arbóreo (DHA)** em escala horária, por sua vez, obtida com a seguinte fórmula:

$$DHA = Di\grave{a}metro\ m\acute{a}ximo - Di\grave{a}metro\ atual$$

Onde o Diâmetro máximo representa o maior diâmetro atingido pelo indivíduo até o momento de comparação (Figura 3b), ou seja, quando a árvore se encontrava nas condições ideais de hidratação. Assim, o Déficit Hídrico Arbóreo sempre será um valor positivo e aumenta conforme se agravam as condições de seca. É importante notar que, dada a natureza do ciclo circadiano das árvores nesse ambiente, comumente se observa o menor valor de DHA de um indivíduo no mesmo ciclo durante o *pre-dawn* e o maior durante o *midday*. Assim, a medida de mínima de DHA dentro de um ciclo indica a capacidade (ou não) de reidratação noturna da planta. Na Figura 3a, vemos um cenário de estação chuvosa, onde a reidratação noturna é capaz de repor a água perdida durante o dia anterior e há possibilidade de crescimento; na Figura 3b, por outro lado, temos um cenário de seca, onde a reidratação noturna não consegue repor a água perdida durante o dia, configurando, de fato, o déficit hídrico arbóreo. Por esse motivo, utilizamos o valor de Déficit Hídrico Arbóreo correspondente ao período de *pre-dawn*. Por fim, para corrigir pela circunferência e ajustar com uma estimativa do xilema ativo de cada indivíduo, usamos a seguinte fórmula, similar à de Contração Diária Média, para calcular o Déficit Hídrico Arbóreo em escala diária:

$$DHA = \frac{DHA_{pre-dawn}}{CDM_{máx}}$$



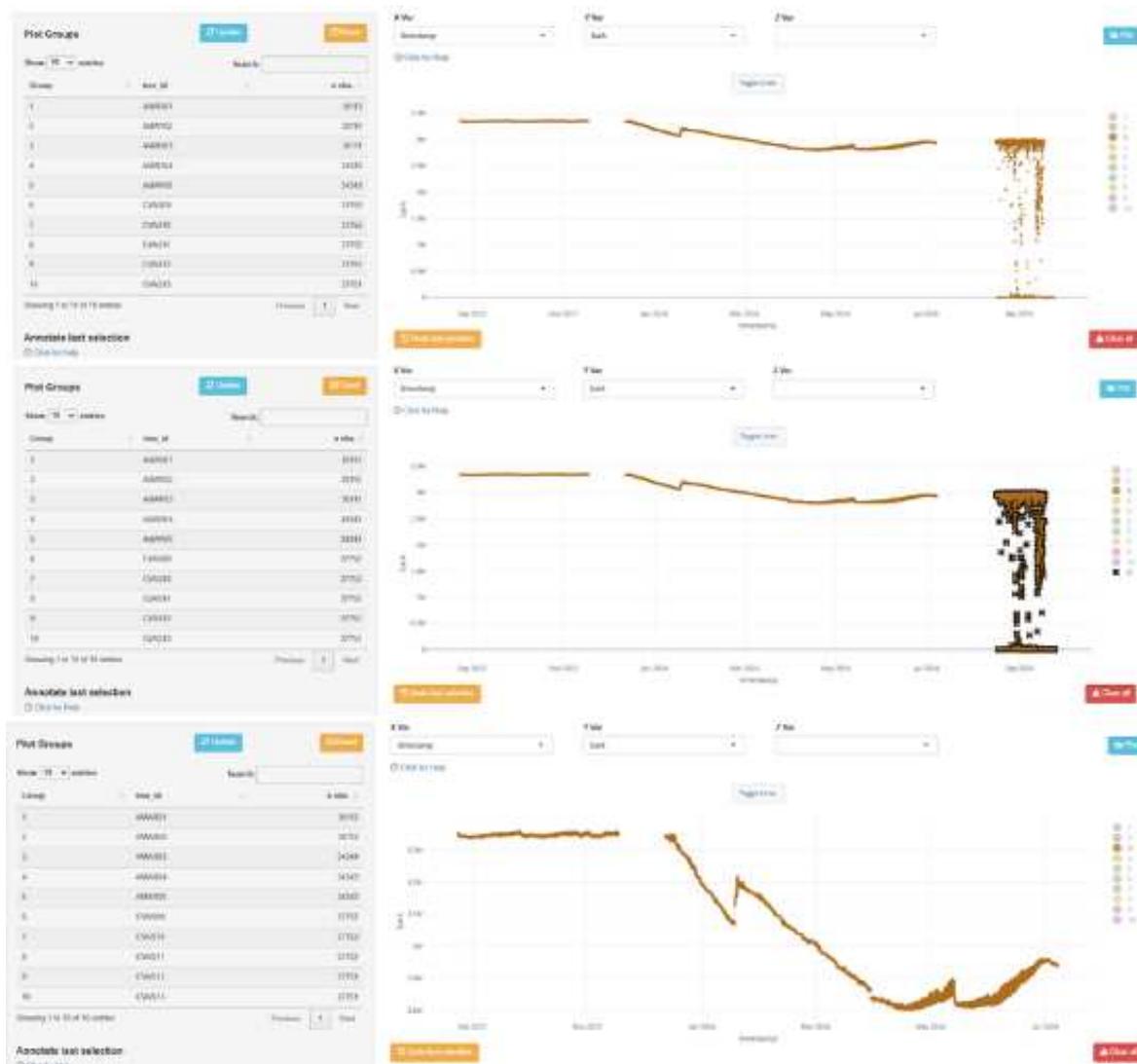
**Figura 3:** Recorte para ilustrar os cálculos da variação radial do tronco e de como são extraídas as métricas para o cálculo da Contração Diária Média (CDM) e do Déficit Hídrico Arbóreo (DHA): a) A CDM é calculada a partir da diferença entre o ponto azul (raio mínimo) e o vermelho (raio máximo) de cada dia dividido pelo máximo que esse valor já alcançou para aquele indivíduo (CDM máximo, conforme os cálculos em Material e Métodos), b) o DHA é calculado como a distância entre o ponto vermelho (raio máximo) até a linha em ciano, que representa o raio máximo anterior daquele indivíduo, essa diferença é dividida também pelo CDM máximo para obter o valor final usando como DHA. Por fim, no painel c), vemos a séries temporal completa de um dos indivíduos acompanhados.

### **Tratamento dos dados**

A inspeção visual dos dados e a remoção de *outliers* foram feitos usando a função “`dcr_app`” do pacote “`datacleanr`” (Figura 4). Com essa ferramenta, é possível interagir com um banco de dados que esteja no ambiente do R de maneira dinâmica, definindo as variáveis em cada eixo, removendo valores selecionados como observado na Figura 4 e filtrando intervalos específicos conforme a necessidade. Posteriormente, foi necessário normalizar os dados limpos, de modo a comparar adequadamente os dados entre localidades e indivíduos.

A padronização das marcações temporais foi feita com `POSIXct`; tanto lacunas pontuais nos dados foram quanto os pequenos desvios identificados automaticamente e ajustados por interpolação linear com o pacote “`treenetproc`”. As variáveis preditoras dos modelos foram padronizadas e reescaladas, de modo a compatibilizá-las com os modelos estatísticos aplicados.

Por fim, as medidas em resolução temporal de 15 minutos foram agregadas usando a função `proc_L1` do pacote `treenetproc`. Assim, foi possível trabalhar com os dados em resolução horária e diária, conforme a necessidade.



**Figura 4:** Exemplo de uso da função `dcrapp` para limpeza interativa de dados. Os gráficos mostram como pontos discrepantes (outliers ou valores inconsistentes) podem ser identificados e removidos por meio de filtros e seleção manual, resultando em um conjunto de dados mais confiável para análises posteriores.

### Abordagens estatísticas e testes de hipóteses

A fim de testar a significância estatística e quantificar a interação das variáveis ambientais com as variáveis fisiológicas, construímos dois modelos com os dados organizados de forma longitudinal, a fim de realizar uma modelagem hierárquica considerando a variação entre os locais e entre os indivíduos dentro do mesmo local. Foram

ajustados Modelos Lineares Mistos Generalizados (GLMMs) usando a função “glmmTMB” do pacote homônimo (BROOKS et al., 2017), dada a sua capacidade de lidar com resíduos não normais e estruturas hierárquicas complexas para medidas contínuas e interdependentes. Também foi necessário usar splines para representar a natureza não-linear das relações entre as variáveis. A seleção das variáveis componentes do modelo foi feita a partir do critério de seleção Akaike (SYMONDS, 2011) e da literatura existente (PETERS et al., 2019; SALOMÓN et al., 2022; ZWEIFEL et al., 2005) com diferentes combinações de variáveis predictoras disponíveis: temperatura e umidade relativas do ar acima do dossel, VPD (calculado a partir das duas variáveis anteriores) e Conteúdo de Água no Solo (CAS). Diferentes modelos foram construídos com combinações distintas dessas variáveis, com ou sem interações com a localidade como fator (\* localidade) e com ou sem as árvores como fatores aleatórios aninhados por localidade (1 | localidade / árvore)

Modelo de Contração Diária Média:

$$\text{CDM} \sim \text{ns}(\text{CAS}, \text{df} = 3) * \text{localidade} + \text{ns}(\text{VPD}, \text{df} = 3) * \text{localidade} + (1 | \text{localidade} / \text{árvore})$$

Modelo de Déficit Hídrico Arbóreo:

$$\text{DHA} \sim \text{bs}(\text{CAS}, \text{df} = 3) * \text{localidade} + \text{bs}(\text{VPD}, \text{df} = 3) * \text{localidade} + (1 | \text{localidade} / \text{árvore})$$

Onde:

ns = spline natural com restrições lineares nas extremidades, ideal para suavização sem extrapolação agressiva.

bs = spline de base B, mais flexível e com maior controle sobre nós, ideal para ajustes locais.

df = graus de liberdade da oscilação

CAS = Conteúdo de Água no Solo, variável preditora contínua

VPD = Déficit de Vapor D'água, variável preditora contínua

CDM = Contração Diária Média, variável resposta contínua

DHA = Déficit Hídrico Arbóreo, variável resposta contínua

localidade = variável categórica representando o local, efeito fixo para as variáveis preditoras

(1 | localidade / árvore) = efeitos aleatório aninhados, considerando a variabilidade entre indivíduos dentro de cada localidade

Após ajustados e representados graficamente usando o pacote `ggplot2`, os modelos tiveram seus resíduos analisados usando o pacote “DHARMA” para garantir os pressupostos de normalidade e homocedasticidade (Figura S1, materiais suplementares). Também testamos a adequação dos modelos calculando  $R^2$  com o pacote “MuMIn” e calculamos os intervalos de confiança usando “emmeans”.

Para averiguar o *overfitting* dos modelos, calculamos os fatores de Inflação da Variância (VIF) para os modelos lineares de CDM e DHA. Os VIF dos modelos variaram entre 1,15 e 1,35 indicando um baixo grau de colinearidade (VIF <5) entre os preditores incluídos nos modelos (CAS e VPD) e o fator categórico (site) e evidenciando independência estatística entre os preditores.

Tabela 1: Lista dos nomes, versões, aplicações e referências de utilização de cada software/pacote utilizado na análise de dados do trabalho

Software, pacote ou ferramenta	Versão	Aplicação	Referência
R	4.3.2002	Ambiente estatístico e de programação	R Core Team (2023)
glmmTMB	1.1.2005	Modelos lineares mistos generalizados	Brooks et al. (2017)

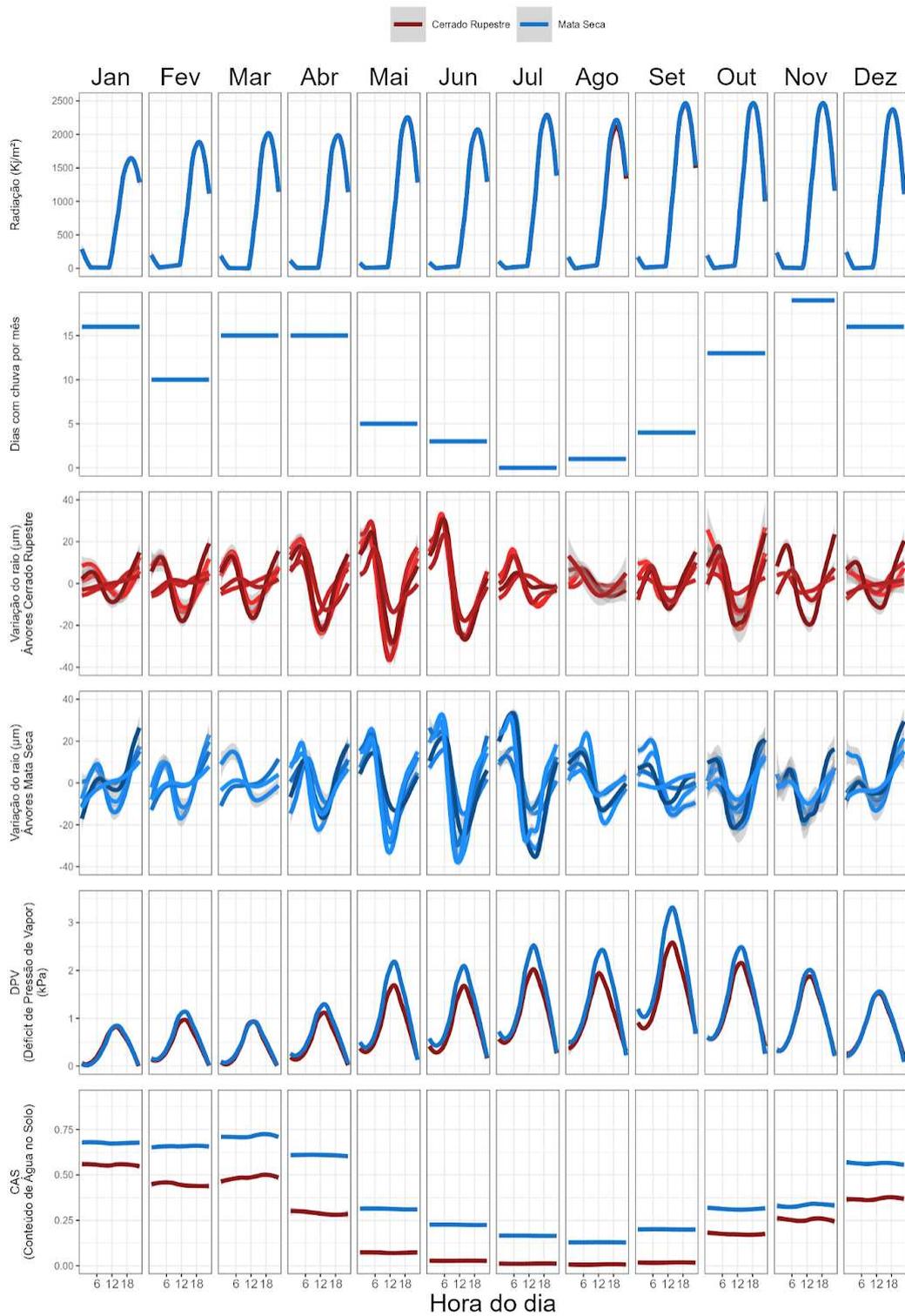
		(GLMM)	
emmeans	1.8.2006	Estimativas marginais e comparações múltiplas	Lenth (2022)
DHARMA	2000.4.6	Diagnóstico de resíduos de GLMM	Hartig (2022)
MuMIn	1.47.5	Cálculo de R2 marginal e condicional	Barton (2023)
datacleanr	1.0.3	Limpeza interativa e remoção de outliers	Beaudet et al. (2021)
car	3.1.2002	Testes de Levene, VIF e ANCOVA	Fox & Weisberg (2019)
splines	Base R	Splines para modelagem não linear	R Core Team (2023)
effsize	2000.8.1	Cálculo do tamanho do efeito (Cohen's d)	Torchiano (2020)
FactoMineR / factoextra	2.8 / 1.0.7	Análise de Componentes Principais (PCA)	Lê et al. (2008); Kassambara (2017)

## Resultados

### Resultados gerais

Analizamos séries temporais de alta frequência de variação do diâmetro do caule de árvores tropicais em duas áreas com solos contrastantes no Cerrado brasileiro: uma Mata Seca (Morada do Sol) e um Cerrado Rupestre (Aldeia Multiétnica). O monitoramento foi feito por onze meses consecutivos (outubro de 2023 a setembro de 2024), englobando parte do período seco de 2023, boa parte da estação chuvosa de 2024 (salvo algumas lacunas no período chuvoso). As análises foram concentradas na transição chuva-seca de 2024. As observações foram realizadas com dendrômetros automáticos e por sensores microclimáticos, totalizando mais de 180.000 registros horários de dados fisiológicos e ambientais. O estudo contou com 10 indivíduos monitorados continuamente, distribuídos entre as duas localidades e duas espécies arbóreas de *Aspidosperma*, permitindo comparações interindividuais, inter-localidades e interespecies. As análises se concentraram na Contração Diária Média (CDM) e no Déficit Hídrico Arbóreo (DHA) como métricas fisiológicas sensíveis à interação entre umidade do solo (CAS), VPD e características edáficas, sobretudo na transição chuva-seca. Essa abordagem permitiu capturar, com resolução inédita no Cerrado brasileiro, os mecanismos de resposta hidráulica em tempo real frente às variações climáticas e edáficas sazonais.

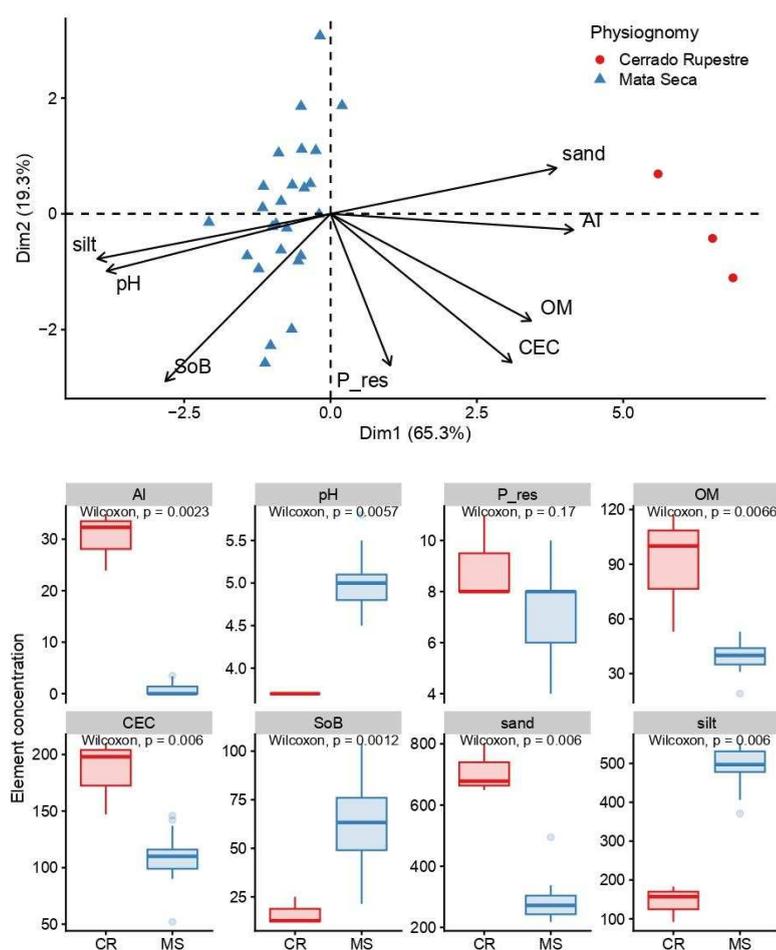
A Figura 5 apresenta as variações absolutas do diâmetro do tronco ao longo do dia para cada mês do ano, permitindo visualizar os padrões sazonais de contração e expansão do caule nas duas localidades. Embora o VPD não tenha diferido significativamente entre os sítios, as árvores do Cerrado Rupestre apresentaram oscilações mais amplas e irregulares ao longo do ano, especialmente nos meses de maio a agosto, enquanto as árvores da Mata Seca mantiveram padrões mais estáveis de variação diária. Esses resultados não expressam diretamente CDM ou DHA, mas revelam, em termos absolutos, que o funcionamento hidráulico das árvores do Cerrado Rupestre é mais sensível às transições sazonais, possivelmente em resposta à menor disponibilidade hídrica do solo. Já na Mata Seca, a menor amplitude e maior regularidade das curvas sugerem uma fisiologia menos vulnerável às oscilações ambientais, mesmo sob VPD semelhante.



**Figura 5:** Variações ao longo das horas do dia para cada mês do estudo para as variáveis ambientais (Radiação, Dias com Chuva, Deficit de Pressão do Vapor - VPD, Conteúdo de Água no Solo) e da dinâmica radial intra-diária das árvores para as duas localidades de estudo: Cerrado Rupestre (vermelho) e Mata Seca (azul).

## Caracterização do contraste entre os solos

A análise das propriedades físicas e químicas do solo evidenciou contrastes marcantes entre as duas fitofisionomias estudadas (Figura 6). Apesar da similaridade climática entre os sítios, a composição textural e os parâmetros químicos dos solos revelam ambientes edáficos funcionalmente distintos. A Mata Seca apresentou solos com maior teor de silte e menores proporções de areia, ao passo que o Cerrado Rupestre mostrou um predomínio de areia, o que implica diretamente em menor capacidade de retenção hídrica e maior suscetibilidade à variação da umidade do solo. Esses padrões de textura influenciam fortemente a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, condicionando diferentes regimes de disponibilidade hídrica para as raízes das árvores.



**Figura 6:** Paineil superior: análise de componentes principais (PCA) das características físico-químicas dos solos das duas localidades de estudo: Cerrado Rupestre (CR, vermelho) e

Mata Seca (MS, azul) quanto à concentração de determinados elementos químicos, características químicas e físicas e proporção de areia, argila e silte. Painel inferior: boxplots mostrando a diferença entre os valores de cada característica-chave do solo para ambas localidades.

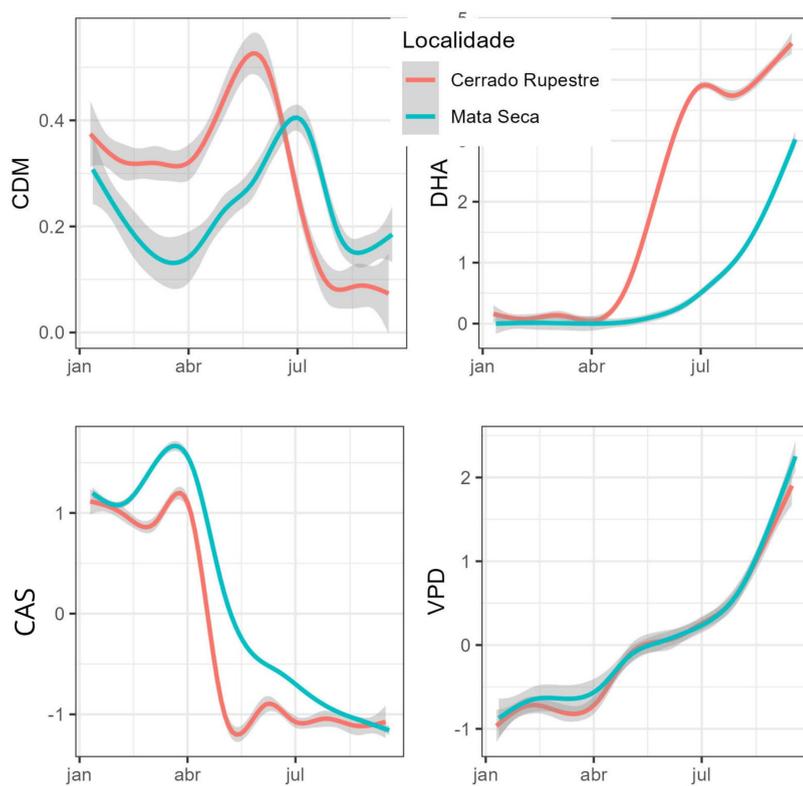
Do ponto de vista químico, os solos da Mata Seca apresentaram maiores valores de Capacidade de Troca Catiônica (CTC), soma de bases (SoB) e matéria orgânica, enquanto os do Cerrado Rupestre se caracterizaram por pH mais ácido, maiores teores de alumínio trocável e baixa fertilidade geral. A Análise de Componentes Principais (PCA), conduzida a partir de variáveis selecionadas (pH, P<sub>res</sub>, OM, Al, CTC, SoB, areia e silte), sintetizou esses eixos de variabilidade e confirmou a separação nítida entre as duas localidades.

Esses dados corroboram a hipótese de que os solos exercem papel modulador sobre o desempenho fisiológico das árvores, ao estabelecerem diferentes limitações hidrológicas e nutricionais. Como discutido por Peters et al. (2013), Salomón et al. (2022) e Zweifel et al. (2021), a capacidade do solo em armazenar e liberar água é determinante para os padrões de reidratação noturna e contração diurna, parâmetros estes sensíveis às variações microambientais e essenciais para a manutenção do turgor cambial.

### **Variação Temporal dos Parâmetros Ambientais e Fisiológicos**

As variações sazonais, mensais, diárias e horárias dos parâmetros fisiológicos e climáticos são apresentadas nas Figuras 5 e 7. Durante a estação seca (de maio em diante), observamos um aumento progressivo no Déficit de Pressão de Vapor (VPD) e uma diminuição acentuada no Conteúdo de Água no Solo (CAS) para ambas as áreas. No entanto, o Cerrado Rupestre mostrou valores de CAS consistentemente mais baixos ao longo do período seco, com a drenagem do solo tendo papel fundamental na diminuição mais acelerada e acentuada do CAS.

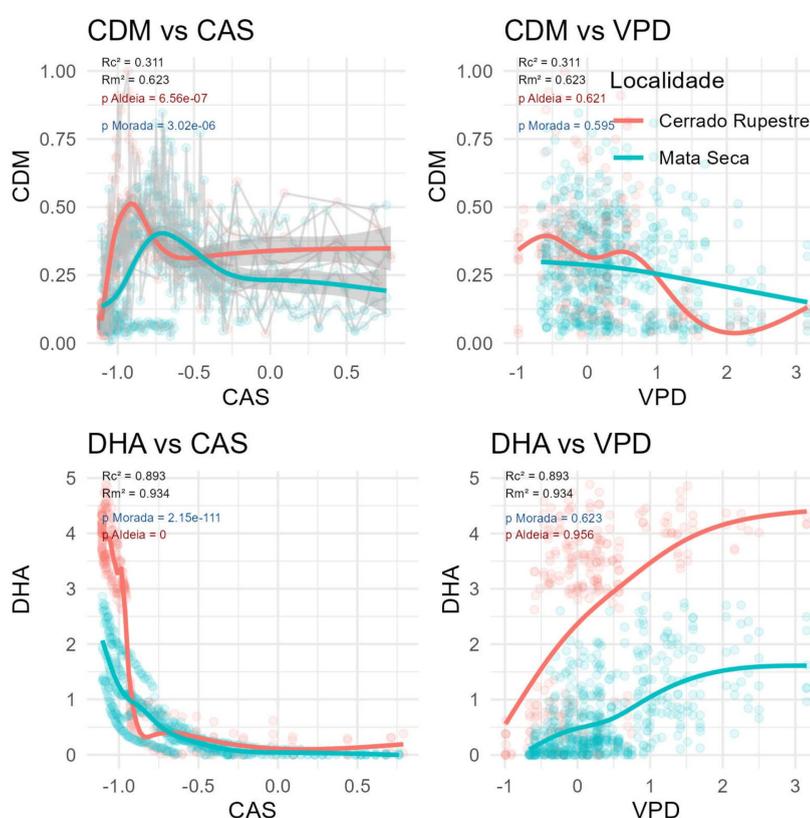
A Contração Diária Média (CDM) aumentou na Aldeia Multiétnica (Cerrado Rupestre) entre junho e agosto, alcançando valores superiores aos observados na Morada do Sol (Mata Seca). O Déficit Hídrico da Árvore (DHA) foi substancialmente maior no Cerrado Rupestre durante a estação seca, refletindo maior estresse hídrico em função da menor disponibilidade de água no solo.



**Figura 7:** Variações da Contração Diária Média (CDM); Déficit Hídrico Arbóreo (DHA); Conteúdo de Água no Solo (CAS) e VPD para as duas localidades de estudo: Cerrado Rupestre (“Aldeia”, em vermelho) e Mata Seca (“Morada”, azul) para os meses de transição da estação chuvosa para a seca.

## Respostas Marginais dos Modelos de CDM e DHA

As relações modeladas entre Contração Diária Média (CDM), Déficit Hídrico Arbóreo (DHA) e os preditores ambientais são detalhadas na Figura 8. O CAS foi o principal fator explicativo para ambos os parâmetros fisiológicos, enquanto VPD não mostrou significância estatística (Tabela 2). Para o CDM, a resposta ao CAS apresenta um padrão não-linear, com maiores amplitudes de contração em condições de solo mais seco no Cerrado Rupestre. O modelo apresentou  $R^2$  marginal = 0,31 e  $R^2$  condicional = 0,62, confirmando uma moderação importante dos efeitos aleatórios de localidade e série (Figura 2, painéis superiores).



**Figura 8:** Relações entre variáveis ambientais e parâmetros fisiológicos derivados de dados dendrométricos em *Aspidosperma* spp. no Cerrado. As curvas mostram os efeitos do Déficit de Pressão de Vapor (VPD) e do Conteúdo de Água no Solo (CAS) sobre a Contração Diária Média (CDM) e o Déficit Hídrico Arbóreo (DHA), proxies de controle estomático e reidratação noturna, respectivamente. As estimativas foram obtidas por modelos mistos generalizados com splines cúbicos ajustados por sítio (Cerrado Rupestre e Mata Seca), considerando variações intraespecíficas. Observa-se maior sensibilidade da CDM ao VPD e

maior limitação de DHA em condições de baixa umidade do solo no Cerrado Rupestre, indicando maior vulnerabilidade hídrica associada às propriedades edáficas locais.

Para o DHA, observou-se uma redução expressiva com o aumento de CAS em ambos os locais, mas com resposta mais acentuada na Morada do Sol. O  $R^2$  marginal = 0,88 e  $R^2$  condicional = 0,93 indicam uma explicação robusta do modelo, com forte dependência da disponibilidade hídrica do solo (Figura 8, painéis inferiores). As análises na Figura 2 mostram que o Cerrado Rupestre apresentou valores significativamente menores de CAS ( $d = -0,84$ ), enquanto os valores de VPD apresentaram diferenças menos marcantes entre os locais ( $d = 0,14$ ).

Tabela 2: valores de p para cada variável preditora em relação à observada

Termo	Resposta	Estimate	Std. Error	z value	p-value
ns(CAS)	CDM	-0,214	0,044	-4,906	9.29e-07 ***
ns(CAS):site	CDM	0,209	0,051	4,120	3.79e-05 ***
ns(VPD)	CDM	-0,015	0,037	-0,405	0,686
ns(VPD):site	CDM	0,014	0,045	0,317	0,751
bs(CAS)	DHA	-3,399	0,102	-33,200	< 2e-16 ***
bs(CAS):site	DHA	1,968	0,128	15,360	< 2e-16 ***
bs(VPD)	DHA	0,078	0,121	0,640	0,520
bs(VPD):site	DHA	-0,080	0,172	-0,460	0,643

### Variações Diárias e Déficit Hídrico

Os padrões de contração e reidratação ao longo dos dias secos indicam que a amplitude de retração diária foi maior nas árvores do Cerrado Rupestre (Figuras 3 e 5), com

recuperação incompleta durante a noite, o que acarretou no acúmulo maior e mais acelerado de Déficit Hídrico da Árvore (DHA) (Figuras 7 e 8). As variações horárias ao longo de cada mês do ano (Figura 5) também revelaram um padrão distinto na disponibilidade hídrica entre as fisionomias: as árvores do Cerrado Rupestre apresentaram maior contração diurna do caule e menor Conteúdo de Água Solo ao longo de todo o período seco (de maio até novembro), enquanto a Mata Seca manteve um padrão de menor variação fisiológica.

## Discussão

### Solos contrastantes e funcionamento hidráulico

Os resultados encontrados indicam que o contraste edáfico entre os sítios influencia de forma significativa o funcionamento fisiológico das árvores. A PCA apontou uma separação clara entre os solos (Figura 6), com o Cerrado Rupestre apresentando condições muito mais limitantes — como baixa fertilidade, pH mais ácido, maior saturação por alumínio e maior proporção de areia —, o que tende a dificultar tanto a retenção de água quanto a sua mobilização pelas raízes. Essas características se refletiram em amplitudes mais elevadas de CDM e acúmulo mais consistente de DHA ao longo da estação seca (Figuras 5, 7 e 8). Tais padrões dialogam com o que vem sendo apontado por estudos anteriores como Lira-Martins et al. (2022), Peters et al. (2019), Steger et al. (2024) e Zweifel et al. (2000): solos com baixa capacidade de retenção e tamponamento hídrico impõem limitações importantes ao funcionamento hidráulico das árvores. Evidências adicionais de Martinetti et al. (2025) corroboram esses achados, demonstrando que a resposta da absorção de água pela raiz está fortemente modulada pelas propriedades físico-químicas do solo, afetando diretamente a transpiração e o crescimento radial em faias (*Fagus sylvatica* L.) e abetos (*Picea abies* (L.) H. Karst.) em ecossistemas temperados, efeito que parece se manifestar de forma análoga nas árvores estudadas do gênero *Aspidosperma*. Os solos da Mata Seca, por outro lado, são mais férteis, com maior conteúdo de matéria orgânica, pH menos ácido e maior CTC. Isso favorece a manutenção do turgor e permite respostas mais moderadas mesmo durante a estação seca. Esse contraste nos dados de solo permite entender a diferença de comportamento fisiológico entre os sítios, uma vez que mostra como o declínio mais acentuado de Conteúdo de Água no Solo se traduz em um acúmulo mais rápido de Déficit Hídrico Arbóreo

### Respostas fisiológicas ao gradiente hídrico

As árvores da Mata Seca apresentaram menor variação tanto na Contração Diária Média (CDM) quanto no Déficit Hídrico Arbóreo (DHA) ao longo da estação seca, indicando um funcionamento mais estável mesmo sob o mesmo clima seco. Essa estabilidade é provavelmente mediada pela maior capacidade de retenção hídrica do solo, que atua amortecendo oscilações no suprimento de água mesmo em períodos de baixa precipitação, permitindo que as árvores neste local recuperem a água transpirada durante o dia, de modo que acumulam relativamente menos Déficit Hídrico Arbóreo. No Cerrado Rupestre, por outro

lado, observou-se um padrão de aumento progressivo tanto da CDM quanto do DHA, sugerindo maior exposição ao estresse hídrico e menor capacidade de reidratação noturna — aspecto fundamental para a manutenção do turgor e da atividade cambial (KING et al., 2013; DIETRICH et al., 2018; ZWEIFEL et al., 2005; PETERS et al., 2023). Esses resultados são coerentes com os achados de Salomón et al. (2022), que identificaram acúmulo de estresse noturno persistente mesmo na ausência de colapso do crescimento, sugerindo que a perda parcial de turgor pode ocorrer de forma não letal, mas retardando o crescimento (PETERS et al., 2023a), e anteceder outros sinais morfofisiológicos evidentes.

A Contração Diária Média (CDM) mostrou um pico na transição da estação chuvosa para seca, seguido de uma redução com o avanço do déficit hídrico ao longo da estação seca. Um padrão similar também foi descrito por Dietrich et al. (2018), King et al. (2013) e De Swaef et al. (2009). Como a CDM expressa o uso diário de água pela planta e indiretamente também seu controle estomático (PETERS et al., 2019), esse declínio tardio pode estar associado à redução dos estoques de água no tronco pela reidratação insuficiente durante a noite. A partir de certo ponto, a queda da CDM evidencia a limitação hídrica acumulada, pois o volume de água perdido durante o dia não é mais recuperado à noite. Essa inflexão na resposta ocorre mais cedo nas árvores do Cerrado Rupestre, indicando uma antecipação no impacto do estresse hídrico neste ambiente. Isso reforça o papel da Contração Diária Média como um proxy sensível ao estado hídrico da árvore, especialmente em escalas de tempo curtas (semanas a meses) (KING et al., 2013; KNÜSSEL et al., 2021; PETERS et al., 2019). No entanto, em escalas temporais mais longas e em contextos de estresse prolongado, a interpretação desse indicador exige cautela, uma vez que a resposta pode se reverter mesmo diante da intensificação do estresse (DIETRICH et al., 2018).

Em contraste com a CDM, o DHA aumentou continuamente ao longo da estação seca, devido à redução do conteúdo de água no solo. Isso corrobora nossas hipóteses de que o DHA deveria aumentar com o estresse hídrico. Estudos em áreas temperadas (DIETRICH et al. 2018; STEGER et al. 2024; ZWEIFEL et al. 2000) demonstraram o potencial do DHA como proxy do estado hídrico e os resultados aqui encontrados sugerem que esse potencial se estende também a espécies tropicais. Notadamente, o Cerrado Rupestre — que apresentou os menores valores de conteúdo de água no solo — concentrou as maiores amplitudes de DHA, sugerindo que a limitação edáfica impôs um acúmulo mais rápido e intenso de estresse hídrico. A menor profundidade, maior proporção de areia e a menor capacidade de retenção

de água dos solos do Cerrado Rupestre reduzem a conectividade hidráulica entre raízes e solo e antecipam os efeitos fisiológicos do estresse, mesmo sob VPDs semelhantes aos da Mata Seca. Maiores DHAs também foram encontrados em solos com menor capacidade de retenção hídrica (STEGER et al. 2024) em regiões temperadas e solos explicam melhor padrões globais de atributos foliares do que clima (WRIGHT et al., 2017). Características edáficas podem, portanto, atuar como um dos principais eixos estruturantes das respostas ecofisiológicas de árvores, o que reforça a importância de incorporar solos nas previsões de respostas da dinâmica da vegetação global, (KÜHN et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2021).

### **Vulnerabilidade ecológica e projeções climáticas**

A fisiologia observada nas árvores do Cerrado Rupestre, com acúmulo de déficit mesmo durante a noite, aponta para uma operação próxima dos limites hidráulicos dessas plantas durante a estação seca. Essa condição, que já vem sendo observada em outras regiões (PETERS et al., 2023; SALOMÓN et al., 2022), indica que essas árvores podem estar mais suscetíveis à mortalidade induzida por falha hidráulica em contextos de intensificação do estresse climático (ROWLAND et al., 2015). Atributos funcionais como CDM e DHA — extraídos de dados dendrométricos de alta resolução — representam uma via promissora para alimentar e aprimorar os Modelos Globais de Dinâmica de Vegetação (DGVMs) (SCHEITER et al., 2013). A maioria desses modelos ainda trata a vegetação de forma genérica, com baixa parametrização funcional para espécies tropicais e não incluem efeitos da variabilidade edáfica. Os resultados obtidos aqui podem ajudar a superar essa limitação via uma abordagem mecanística e podem ajudar a refinar modelos de variabilidade intraespecífica, fornecendo dados detalhados que permitem a quantificação de respostas ecofisiológicas das árvores às mudanças climáticas (LENS et al., 2013; PETERS, 2023; POWELL, 2013).

### **Integração com outras avaliações de crescimento**

Os dados de dendrômetro tornam-se especialmente informativos quando integrados a outras abordagens de avaliação de crescimento e dinâmica hídrica, como xilogênese, análise de anéis, medidas de potencial hídrico e modelagem mecanística. O uso combinado de técnicas anatômicas, proxies hidráulicos e sensores de pressão do caule têm se mostrado promissor para a identificação de limiares fisiológicos críticos com alta resolução temporal (HABERSTROH et al., 2025).

A análise de anéis de crescimento, nesse contexto, contribui com informações interanuais valiosas, sendo útil tanto para reconstruções climáticas quanto para validação de padrões de crescimento em longo prazo (ZUIDEMA et al., 2022; GROENENDIJK et al., 2025). Para o gênero *Aspidosperma*, a formação de anéis anuais foi confirmada por Aragão et al. (2022), abrindo caminho para a calibração de modelos mecanísticos (LISI et al., 2008; SCHIPPERS et al., 2015a) e integração com padrões intraanuais detectáveis por sensores de alta frequência (STEPPE et al., 2015), especialmente frente a eventos climáticos extremos (BABST et al., 2018).

No nível subcelular, abordagens baseadas em xilogênese vêm ganhando espaço por permitir a separação direta entre processos de expansão celular e deposição de parede secundária. O método desenvolvido por Noyer et al. (2023) possibilita quantificar a duração das fases de expansão, espessamento e lignificação, oferecendo um referencial anatômico valioso para interpretar a variação diamétrica com base em atividade cambial efetiva. A integração entre esses dados e proxies como CDM e DHA permite distinguir flutuações elásticas associadas ao estado hídrico da deposição de biomassa.

Existe, ainda, a possibilidade de integração dos dados de variações de diâmetro com dados de fluxo de seiva e de potencial hídrico da folha. Estudos como Zweifel et al. (2000) e Kahmen et al. (2022) mostram que essas variações diamétrica estão fortemente ligadas à transpiração e à dinâmica dos tecidos vivos da casca. Dietrich et al. (2018), além de proporem uma separação explícita entre os sinais de crescimento irreversível e as variações elásticas associadas ao turgor, validaram o uso de proxies como o DHA por meio de medições de potencial hídrico foliar, reforçando a robustez desse indicador mesmo em sistemas de monitoramento indireto. Complementarmente, Deslauriers et al. (2007) demonstraram que é possível inferir com precisão a fenologia cambial a partir de dados dendrométricos contínuos, mesmo sob estresse hídrico.

Apesar de ainda pouco explorada em ecossistemas tropicais (MOREL et al., 2015), essa abordagem integrada se mostra particularmente promissora nesse contexto, dada a variabilidade sazonal expressiva e as fortes interações entre solo e fisiologia. Aplicada ao Cerrado, essa combinação metodológica contribui para a identificação de respostas fisiológicas finas e para a definição de estratégias hidráulicas com sensibilidade ecológica elevada.

## Potencial de aplicação e continuidade

Há grande potencial na aplicação dessa abordagem a outros gêneros neotropicais amplamente distribuídos, como *Amburana*, *Anadenanthera*, *Cedrela*, *Copaifera*, *Handroanthus* e *Pterogyne*, que ocorrem em distintos domínios fitogeográficos, tipos de vegetação e classes de solo (Flora do Brasil, 2025). Além de sua relevância para espécies nativas, essa abordagem também se mostra altamente aplicável a espécies de interesse econômico, como *Eucalyptus spp.*, *Tectona grandis* (teca) e *Pinus spp.*, que sustentam a base da produção florestal comercial em diversas regiões do Brasil.

Aplicações similares em ambientes naturais, plantios e experimentos controlados permitiriam testar como as estratégias hidráulicas e de crescimento arbóreo respondem a diferentes contextos climáticos e edáficos. Um ponto importante é a escolha das espécies. Neste trabalho, escolhemos espécies distintas em cada sítio: *Aspidosperma rizzoanum* no Cerrado Rupestre e *A. subincanum* na Mata Seca. Essa decisão buscou equilibrar o controle evolutivo com a adequação ecológica às fitofisionomias estudadas, dada a marcante diferenciação florística entre essas vegetações e a ausência de uma espécie arbórea abundante em ambos os ambientes. No entanto, é possível que traços específicos de cada espécie — relacionados à fenologia, anatomia ou alocação de carbono — tenham influenciado os padrões observados. Trabalhos futuros com espécies comuns aos dois ambientes (considerando vegetações com maior sobreposição florística) ou com maior abrangência taxonômica poderiam contribuir para isolar de maneira mais precisa os efeitos edáficos das respostas funcionais mais idiossincráticas.

Avanços nesse sentido contribuiriam para o desenvolvimento de uma base mecanística e preditiva mais robusta sobre as respostas fisiológicas das árvores. Tal base é fundamental para orientar práticas de manejo mais resilientes às mudanças climáticas, incluindo a seleção de áreas prioritárias para conservação, restauração de paisagens e identificação de espécies ou genótipos com maior resiliência hídrica para plantios florestais. Diante da intensificação dos eventos climáticos extremos, a construção de modelos preditivos baseados em mecanismos ecofisiológicos representa uma estratégia cada vez mais urgente para qualificar o planejamento em múltiplas escalas — local, regional e global — e antecipar respostas da vegetação frente às novas condições ambientais.

## Conclusão

Este estudo demonstrou que a disponibilidade hídrica do solo, modulada por suas propriedades físicas e químicas, é o principal fator determinante das respostas fisiológicas relativas ao controle estomático e à reidratação noturna das árvores tropicais durante a estação seca. Árvores em solos mais rasos, ácidos e arenosos, como no Cerrado Rupestre, apresentaram maiores amplitudes de contração diária (CDM) e acúmulo de Déficit Hídrico Arbóreo (DHA), refletindo maior exposição ao estresse hídrico e limitações na reidratação noturna. Em contrapartida, árvores em solos mais profundos e férteis, como na Mata Seca, exibiram respostas mais estáveis, mesmo sob condições atmosféricas similares.

O Conteúdo de Água no Solo, em especial, emergiu como um fator importante, limitando a reidratação noturna e acentuando o estresse em condições de alto VPD — um cenário que tende a se intensificar com o avanço das mudanças climáticas. Os resultados indicam que a variação edáfica influencia diretamente o funcionamento hidráulico e se mostra crucial para entender os riscos fisiológicos associados à intensificação dos extremos climáticos. A integração de dados climáticos, fisiológicos e edáficos via sensoriamento contínuo representa um caminho promissor para aprimorar modelos mecanísticos de crescimento arbóreo e Modelos Globais de Dinâmica de Vegetação para melhor prever os limites funcionais e a resiliência das florestas tropicais frente ao clima futuro.

## Bibliografia

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Roma: FAO, 1998.

ANDEREGG, W. R. L.; BERRY, J. A.; BRODRIBB, T. J.; et al. Plant hydraulic traits explain mortality risk in drought. *Nature Climate Change*, [S.l.], v. 8, n. 7, p. 723-728, 2018.

ARAGÃO, José Roberto V.; ZUIDEMA, Pieter A.; GROENENDIJK, Peter. Climate-growth relations of congeneric tree species vary across a tropical vegetation gradient in Brazil. *Dendrochronologia*, v. 71, p. 125913, 2022.

BABST, Flurin et al. When tree rings go global: Challenges and opportunities for retro-and prospective insight. *Quaternary Science Reviews*, v. 197, p. 1-20, 2018.

BARTON, Kamil. MuMIn: Multi-Model Inference. R package version 1.47.5, 2023. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=MuMIn>. Acesso em: 23 mar. 2025.

BEAUDET, Méline et al. datacleanr: Interactive and Reproducible Data Cleaning. R package version 1.0.3, 2021. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=datacleanr>. Acesso em: 23 mar. 2025.

BRIGGS, L. J.; SHANTZ, H. L. The wilting coefficient for different plants: and its indirect determination. US Government Printing Office, 1912.

BROOKS, Mollie E. et al. glmmTMB Balances Speed and Flexibility Among Packages for Zero-inflated Generalized Linear Mixed Modeling. *The R Journal*, v. 9, n. 2, p. 378–400, 2017. DOI: 10.32614/RJ-2017-066. Disponível em: <https://journal.r-project.org/archive/2017/RJ-2017-066/index.html>. Acesso em: 23 mar. 2025.

CARDOSO, Murilo Raphael Dias; MARCUZZO, Francisco Fernando Noronha; BARROS, Juliana Ramalho. Classificação climática de Köppen-Geiger para o estado de Goiás e o Distrito Federal. *Acta Geográfica, Boa Vista*, v. 8, n. 16, jan./mar. 2014, p. 40-55. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/handle/ri/21043>. Acesso em: 25 mar. 2025.

CASTELLO, A. C. D.; PEREIRA, A. S. S.; SIMÕES, A. O.; KOCH, I. *Aspidosperma* in Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB604356>. Acesso em: 04 mar. 2025.

COCOZZA, C. et al. Monitoring intra-annual dynamics of wood formation with microcores and dendrometers in *Picea abies* at two different altitudes. *Tree Physiology*, v. 36, p. 832–846, 2016.

COHEN, J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. 2. ed. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 1988.

COSTA, J.A.S. Copaifera. In: Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB22896>. Acesso em: 01 Mar. 2025.

CRANSTON, B. M. et al. Inexpensive throughfall exclusion experiment for single large trees. *Applications in Plant Sciences*, v. 8, n. 2, p. e11325, 2020.

DESLAURIERS, A. et al. Dendrometer and intra-annual tree growth: What kind of information can be inferred? *Dendrochronologia*, v. 25, p. 113–124, 2007.

DE SWAEF, Tom et al. Stem diameter variations as a versatile research tool in ecophysiology. *Tree Physiology*, v. 35, n. 10, p. 1047-1061, 2015.

DIETRICH, L. et al. Daily stem diameter variations can predict the canopy water status of mature temperate trees. *Tree Physiology*, v. 38, p. 941–952, 2018.

FALCÃO, M.J.A.; Mansano, V.F. Apuleia. In: Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB22796>. Acesso em: 01 Mar. 2025.

FERNANDEZ, Eduardo; AMORIM, Eduardo. *Aspidosperma rizzoanum* (Apocynaceae). In: LISTA VERMELHA DA FLORA BRASILEIRA: Centro Nacional de Conservação da Flora / Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2020.

FOX, John; WEISBERG, Sanford. *An R Companion to Applied Regression*. 3. ed. Thousand Oaks: Sage, 2019. Disponível em: <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>. Acesso em: 23 mar. 2025.

GRAMS, T. E. E. et al. The Kroof experiment: realization and efficacy of a recurrent drought experiment plus recovery in a beech/spruce forest. *Ecosphere*, v. 12, n. 3, p. e03399, 2021.

GROENENDIJK, Peter et al. The importance of tropical tree-ring chronologies for global change research. *Quaternary Science Reviews*, v. 355, p. 109233, 2025.

HABERSTROH, S. et al. Continuous stem water potential measurements of a diffuse-porous tree species offer new insights into tree water relations. *Ecophysiology*, v. 18, p. e2761, 2025.

HARTIG, Florian. DHARMa: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models. R package version 0.4.6, 2022. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=DHARMa>. Acesso em: 23 mar. 2025.

KAHMEN, A. et al. Root water uptake depth determines the hydraulic vulnerability of temperate European tree species during the extreme 2018 drought. *Plant Biology*, v. 24, p. 1224–1239, 2022.

KING, G. et al. Climatic drivers of hourly to yearly tree radius variations along a 6°C natural warming gradient. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 168, p. 36–46, 2013.

KASSAMBARA, Alboukadel; MUNDT, Fabian. *factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses*. R package version 1.0.7, 2017. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>. Acesso em: 23 mar. 2025.

KNIPFER, T. et al. Predicting stomatal closure and turgor loss in woody plants using predawn and midday water potential. *Plant Physiology*, v. 184, p. 881–894, 2020.

KNÜSEL, S. et al. Processing and extraction of seasonal tree physiological parameters from stem radius time series. *Forests*, v. 12, art. 765, 2021. Disponível em: <https://github.com/treenet/treenetproc>. Acesso em: 04 mar. 2025.

KÖPPEN, Wladimir. Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. *Geographische Zeitschrift*, v. 6, n. 11. H, p. 593-611, 1900.

KÜHN, Nicola et al. Globally important plant functional traits for coping with climate change. *Frontiers of Biogeography*, v. 13, n. 4, 2021.

LENS, Frederic et al. Embolism resistance as a key mechanism to understand adaptive plant strategies. *Current opinion in plant biology*, v. 16, n. 3, p. 287-292, 2013.

LENTH, Russell V. *emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means*. R package version 1.8.6, 2022. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>. Acesso em: 23 mar. 2025.

LÊ, Sébastien; JOSSE, Julie; HUSSON, François. *FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis*. *Journal of Statistical Software*, v. 25, n. 1, p. 1–18, 2008. DOI: 10.18637/jss.v025.i01. Disponível em: <https://www.jstatsoft.org/article/view/v025i01>. Acesso em: 23 mar. 2025.

LEWIS, Simon L. Tropical forests and the changing earth system. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 361, n. 1465, p. 195-210, 2006.

LIRA-MARTINS, Demetrius et al. Soil properties and geomorphic processes influence vegetation composition, structure, and function in the Cerrado Domain. *Plant and Soil*, v. 476, p. 549–588, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05517-y>.

LISI, Claudio S. et al. Tree-ring formation, radial increment periodicity, and phenology of tree species from a seasonal semi-deciduous forest in southeast Brazil. *Iawa Journal*, v. 29, n. 2, p. 189-207, 2008.

LUKOVIĆ, M. et al. Reconstructing radial stem size changes of trees with machine learning. *Journal of the Royal Society Interface*, v. 19, art. 20220349, 2022.

MACHADO, Lilian Aline; ASSIS, Wellington Lopes. Caracterização do regime pluviométrico no entorno do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros (GO). *Revista Brasileira de Climatologia*, Dourados, MS, v. 27, n. 0, p. [páginas], jul./dez. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.71611>.

MARTINETTI, S. et al. Contrasting the soil–plant hydraulics of beech and spruce by linking root water uptake to transpiration dynamics. *Tree Physiology*, v. 45, art. tpae158, 2025.

MOREL, Hélène et al. Seasonal variations in phenological traits: leaf shedding and cambial activity in *Parkia nitida* Miq. and *Parkia velutina* Benoist (Fabaceae) in tropical rainforest. *Trees*, v. 29, p. 973-984, 2015.

MORIM, M.P. *Anadenanthera*. In: *Flora e Funga do Brasil*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB18071>. Acesso em: 01 Mar. 2025.

NOVICK, Kimberly A. et al. The impacts of rising vapour pressure deficit in natural and managed ecosystems. *Plant, Cell & Environment*, v. 47, n. 9, p. 3561-3589, 2024.

NOYER, E. et al. Toward a better understanding of angiosperm xylogenesis: a new method for a cellular approach. *New Phytologist*, v. 239, p. 792–805, 2023.

OLIVEIRA, Rafael S. et al. Linking plant hydraulics and the fast–slow continuum to understand resilience to drought in tropical ecosystems. *New Phytologist*, v. 230, n. 3, p. 904-923, 2021.

PETERS, R. L. et al. Contrasting stomatal sensitivity to temperature and soil drought in mature alpine conifers. *Plant, Cell & Environment*, v. 42, p. 1674–1689, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/pce.13500>.

PETERS, R. L. et al. Daytime stomatal regulation in mature temperate trees prioritizes stem rehydration at night. *New Phytologist*, v. 239, p. 533–546, 2023.

PETERS, R. L. et al. High vapour pressure deficit enhances turgor limitation of stem growth in an Asian tropical rainforest tree. *Plant, Cell & Environment*, v. 46, n. 10, p. 3164–3178, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1111/pce.14661>.

POWELL, T. L. et al. Confronting model predictions of carbon fluxes with measurements of Amazon forests subjected to experimental drought. *New Phytologist*, Oxford, v. 200, n. 2, p. 350–365, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.12390>.

POYATOS, R. et al. Global transpiration data from sap flow measurements: the SAPFLUXNET database. *Earth Syst. Sci. Data*, v. 13, p. 2607–2649, 2021.

QUESADA, Carlos Alberto et al. Basin-wide variations in Amazon forest structure and function are mediated by both soils and climate. *Biogeosciences*, v. 9, n. 6, p. 2203–2246, 2012.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 23 mar. 2025.

RAB, M. A. et al. Modelling and prediction of soil water contents at field capacity and permanent wilting point of dryland cropping soils. *Soil Research*, v. 49, n. 5, p. 389–407, 2011.

RANDO, J.G.; Carvalho, D.A.S.; Silva, T.S. Pterogyne. In: *Flora e Funga do Brasil*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB28161>. Acesso em: 01 Mar. 2025.

ROWLAND, Lucy et al. Death from drought in tropical forests is triggered by hydraulics not carbon starvation. *Nature*, v. 528, n. 7580, p. 119–122, 2015.

SALOMÓN, R. L. et al. The 2018 European heatwave led to stem dehydration but not to consistent growth reductions in forests. *Nature Communications*, v. 13, art. 28, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27579-9>.

SAXTON, Keith E.; RAWLS, Walter J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal*, v. 70, n. 5, p. 1569–1578, 2006.

SCHEITER, Simon; LANGAN, Liam; HIGGINS, Steven I. Next-generation dynamic global vegetation models: learning from community ecology. *New Phytologist*, v. 198, n. 3, p. 957–969, 2013.

SCHIPPERS, Peter et al. Sapwood allocation in tropical trees: a test of hypotheses. *Functional Plant Biology*, v. 42, n. 7, p. 697–709, 2015.

SCHIPPERS, Peter et al. Tree growth variation in the tropical forest: understanding effects of temperature, rainfall and CO<sub>2</sub>. *Global change biology*, v. 21, n. 7, p. 2749–2761, 2015.

SELEME, E.P. Amburana. In: Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB22781>. Acesso em: 01 Mar. 2025.

STEGER, David N. et al. Site matters-Canopy conductance regulation in mature temperate trees diverges at two sites with contrasting soil water availability. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 345, p. 109850, 2024.

STEPPE, Kathy; STERCK, Frank; DESLAURIERS, Annie. Diel growth dynamics in tree stems: linking anatomy and ecophysiology. *Trends in plant science*, v. 20, n. 6, p. 335-343, 2015.

SYMONDS, M. R. E.; MOUSSALLI, A. A brief guide to model selection, multimodel inference and model averaging in behavioural ecology using Akaike's information criterion. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, v. 65, p. 13–21, 2011.

TEIXEIRA, Wenceslau Geraldes et al. Predição da água disponível no solo em função da granulometria para uso nas análises de risco no zoneamento agrícola de risco climático. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2021. Boletim técnico, v. 272, 2021.

TORCHIANO, Marco. effsize: Efficient Effect Size Computation. R package version 0.8.1, 2020. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=effsize>. Acesso em: 23 mar. 2025.

VEHTARI, Aki; GELMAN, Andrew; GABRY, Jonah. loo: Efficient Leave-One-Out Cross-Validation and WAIC for Bayesian Models. R package version 2.6.0, 2021. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=loo>. Acesso em: 23 mar. 2025.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. *Soil Science*, v. 32, n. 3, p. 181–194, 1931.

WALTHERT, L. et al. From the comfort zone to crown dieback: Sequence of physiological stress thresholds in mature European beech trees across progressive drought. *Science of the Total Environment*, v. 753, art. 141792, 2020.

WRIGHT, Ian J. et al. Global climatic drivers of leaf size. *Science*, v. 357, n. 6354, p. 917-921, 2017.

ZIEGLER, Y. et al. Capturing drought stress signals: the potential of dendrometers for monitoring tree water status. *Tree Physiology*, v. 44, art. tpae140, 2024.

ZUIDEMA, P. A. et al. Seeing the forest through the trees: how tree-level measurements can help understand forest dynamics. *New Phytologist*, v. 234, p. 1544–1546, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.18144>.

ZUIDEMA, P. A. et al. Tropical forests and global change: filling knowledge gaps. *Trends in Plant Science*, v. 18, n. 8, p. 413–419, 2013.

ZUIDEMA, P. A. et al. Tropical tree growth driven by dry-season climate variability. *Nature Geoscience*, v. 15, p. 269–276, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00911-8>.

ZWEIFEL, Roman et al. Why trees grow at night. *New Phytologist*, v. 231, n. 6, p. 2174-2185, 2021.

ZWEIFEL, R. et al. Modeling tree water deficit from microclimate: an approach to quantifying drought stress. *Tree Physiology*, v. 25, p. 147–156, 2005.

ZWEIFEL, R. et al. Stem radius changes and their relation to stored water in stems of young Norway spruce trees. *Trees*, v. 15, p. 50–57, 2000.

## Apêndices:

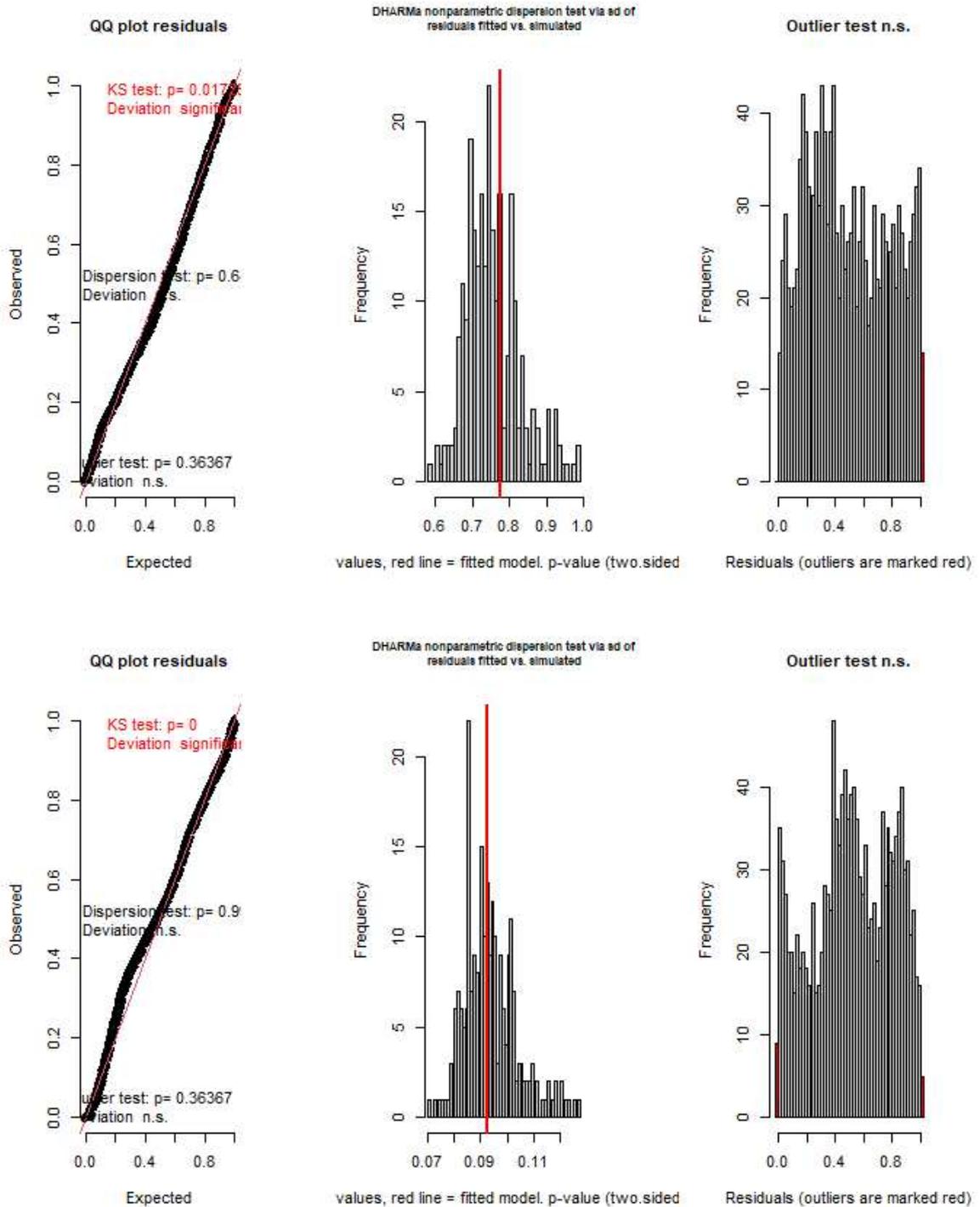


Figura S1: Avaliação dos resíduos do modelo utilizando o pacote DHARMA. Primeira linha de imagens referentes ao modelo de Contração Diária Média; segunda linha referente ao modelo de Déficit Hídrico Arbóreo. Esquerda: QQ-plots dos resíduos simulados em comparação à distribuição esperada, acompanhados de testes de Kolmogorov-Smirnov (KS) e de dispersão. Centro: Histogramas dos resíduos simulados (barras) sobrepostos à distribuição

teórica (linha vermelha), incluindo testes não paramétricos para verificar desvio significativo em relação à expectativa. Direita: Teste de outliers, indicando em vermelho os valores residuais considerados atípicos. Os valores de  $p$  apresentados em cada teste fornecem evidências estatísticas sobre possíveis desvios dos pressupostos do modelo.

## Folhas de anexo



COORDENADORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
 INSTITUTO DE BIOLOGIA  
 Universidade Estadual de Campinas  
 Caixa Postal 6109. 13083-970, Campinas, SP, Brasil  
 Fone (19) 3521-6378. email: cpgib@unicamp.br



### DECLARAÇÃO

Em observância ao **§5º do Artigo 1º da Informação CCPG-UNICAMP/001/15**, referente a Bioética e Biossegurança, declaro que o conteúdo de minha Dissertação de Mestrado, intitulada **“MODULADORES CLIMÁTICOS DE FISIOLOGIA DE ÁRVORES TROPICAIS SOB SOLOS CONTRASTANTES DO CERRADO BRASILEIRO”**, desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Ecologia do Instituto de Biologia da Unicamp, não versa sobre pesquisa envolvendo seres humanos, animais ou temas afetos a Biossegurança.

Documento assinado digitalmente  
 **JOAO GABRIEL LEAL MARTINS**  
 Data: 07/05/2025 02:46:34-0300  
 Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Assinatura: \_\_\_\_\_  
 Nome do(a) aluno(a): **JOÃO GABRIEL LEAL MARTINS**

Documento assinado digitalmente  
 **PETER STOLTENBORG GROENENDYK**  
 Data: 05/05/2025 16:22:11-0300  
 Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Assinatura: \_\_\_\_\_  
 Nome do(a) orientador(a): **Peter Stoltenborg Groenendyk**

Data: 05/05/2025

## Declaração

As cópias de artigos de minha autoria ou de minha co-autoria, já publicados ou submetidos para publicação em revistas científicas ou anais de congressos sujeitos a arbitragem, que constam da minha Dissertação/Tese de Mestrado/Doutorado, intitulada **MODULADORES CLIMÁTICOS DE FISIOLÓGIA DE ÁRVORES TROPICAIS SOB SOLOS CONTRASTANTES DO CERRADO BRASILEIRO**, não infringem os dispositivos da Lei n.º 9.610/98, nem o direito autoral de qualquer editora.

Campinas, 05 de maio de 2025

Documento assinado digitalmente  
 **JOAO GABRIEL LEAL MARTINS**  
Data: 07/05/2025 02:46:34-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura : \_\_\_\_\_  
Nome do(a) autor(a): **JOÃO GABRIEL LEAL MARTINS**  
RG n.º 20080770309

Documento assinado digitalmente  
 **PETER STOLTENBORG GROENENDYK**  
Data: 05/05/2025 16:22:11-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura : \_\_\_\_\_  
Nome do(a) orientador(a): **Peter Stoltenborg Groenendyk**  
RG n.º 35.218.864-9