



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA
MESTRADO ACADÊMICO EM ECOLOGIA

RENAN MARQUES SIQUEIRA

**Respostas funcionais de espécies tropicais submetidas a diferentes concentrações
de água**

Belém
2024

RENAN MARQUES SIQUEIRA

Respostas funcionais de espécies tropicais submetidas a diferentes concentrações de água

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia – PPGECO, da Universidade Federal do Pará – UFPA em convênio com a EMBRAPA Oriental, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ecologia.

Área de Concentração: Ecologia

Linha de pesquisa: Ecologia de comunidades e ecossistemas

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Grazielle Sales Teodoro

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Caroline Signori-Müller

Belém
2024

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Siqueira, Renan Marques.

Respostas funcionais de espécies tropicais submetidas a diferentes concentrações de água. / Renan Marques Siqueira. — 2024.

47 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^ª. Dra. Grazielle Sales Teodoro
Coorientação: Prof^ª. Dra. Caroline Signore-müller
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Ciências Biológicas, Programa de Pós-Graduação em
Ecologia, Belém, 2024.

1. Ecofisiologia. 2. Mudanças. 3. Hidráulica de Plantas. 4.
Seca. I. Título.

CDD 581.5264

RENAN MARQUES SIQUEIRA

Respostas funcionais de espécies tropicais submetidas a diferentes concentrações de água

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ecologia – PPGECO, da Universidade Federal do Pará – UFPA, e EMBRAPA Amazônia Oriental como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ecologia pela Comissão Julgadora composta pelos membros.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof^a. Dr^a. GRAZIELLE SALES TEODORO
Universidade Federal do Pará (Presidente)

Prof. Dr. MATEUS CARDOSO SILVA
Universidade de Exeter

Prof^a. Dr^a. ANA LUÍSA FARES BIONDI LIMA
Universidade Federal do Pará

Prof^a. Dr^a. THAÍSA SALA MICHELAN
Universidade Federal do Pará

Aprovado em: 31 de julho de 2024
Local de defesa: Apresentação remota (on-line)

Dedico este trabalho aos meus pais, que, sob muito sol, correram e me fizeram chegar até aqui, caminhando na sombra.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por sempre me guiar e dar forças para seguir em frente, mesmo nos momentos mais difíceis. Sem a presença d'Ele, esse sonho não teria se realizado.

Aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando em cada escolha e acreditando no meu potencial. Todo o esforço de vocês é a razão de eu ter chegado até aqui.

À minha esposa, Jaqueline, minha companheira de todas as horas, por sua paciência, carinho e por me dar forças nos dias mais puxados. Você fez com que essa jornada fosse mais leve e mais especial.

Aos meus amigos, por cada palavra de incentivo, pelas risadas que me ajudaram a manter a sanidade e pela amizade verdadeira que sempre me acompanhou.

Às minhas orientadoras, Grazielle e Carol, por todo o apoio e por acreditarem em mim, mesmo quando eu duvidava. Suas orientações foram essenciais para que eu chegasse até o fim desse projeto.

Aos meus colegas de laboratório, por cada discussão construtiva, cada ajuda e pelos momentos compartilhados que tornaram o trabalho mais agradável e produtivo.

Aos alunos de iniciação científica que me ajudaram ao longo do experimento, pela dedicação e companheirismo. Sem vocês, esse trabalho não seria possível.

À empresa Norsk Hydro ASA pela bolsa de estudos, os recursos financeiros e de insumos para realização deste projeto que foram obtidos gerenciado pela FADESP – Fundação de Amparo e Desenvolvimento da Pesquisa – por meio do projeto: “Efeitos do uso do solo na diversidade e ecofisiologia da vegetação ripária, macrófitas aquáticas e plâncton em igarapés em áreas de mineração em Paragominas SA, Pará, Brasil”, coordenado pela Prof^ª. Dr^ª. Thaísa Sala Michelan.

Respostas funcionais de espécies tropicais submetidas a diferentes concentrações de água

RESUMO

A biodiversidade da floresta Amazônica encontra-se ameaçada devido a crescente degradação florestal, afetando toda a sociedade que se beneficia de forma direta ou indireta da floresta. A Recuperação de Áreas Degradadas (RAD) envolve o plantio de espécies nativas com a finalidade de reestabelecer a funcionalidade dos ecossistemas afetados. Para implementar projetos de restauração bem sucedidos é necessário identificar espécies com maior tolerância a seca, uma vez que períodos de maior sazonalidade de precipitação tem sido cada vez mais frequentes. Em nosso estudo avaliamos as estratégias ecológicas de três espécies de mudas utilizadas em programas de restauração florestal na Amazônia oriental que diferem no grupo sucessional e na deciduidade. As espécies estudadas foram *Bertholletia excelsa* (Tardia, sempre-verde), *Clitoria fairchildiana* (Pioneira, decídua) e *Manilkara elata* (Tardia, sempre-verde), que foram submetidas a quatro diferentes tratamentos de oferta hídrica, sendo eles: supressão total de água, 15%, 50% e 100% da capacidade de campo. Para cada espécie foram avaliados 14 atributos funcionais foliares, hidráulicos e de crescimento. A supressão total de água resultou na morte de todos os indivíduos das três espécies no período de duas semanas, indicando que essas espécies não sobrevivem em condições de seca extrema no estágio de muda. Contudo, uma pequena quantidade de água (15% da capacidade campo) permitiu a sobrevivência das plantas até o final do experimento utilizando de diferentes ajustes morfológicos e fisiológicos. As espécies mostraram estratégias distintas para lidar com a disponibilidade de água. *M. elata* aumentou o conteúdo de matéria seca das folhas (LDMC), indicando um investimento em folhas duráveis e um crescimento mais lento, característico de espécies conservativas com maior resistência à seca. *B. excelsa* manteve uma biomassa constante e maior densidade da madeira (WD) em condições de seca, refletindo uma estratégia conservativa de armazenamento de carbono no caule. *C. fairchildiana*, apresentou menor biomassa e densidade da madeira no tratamento com maior disponibilidade de água, enquanto nos tratamentos de seca observamos menor plasticidade em atributos foliares relacionados com a o ponto de perda de turgor (Ψ_{tp}) e o potencial osmótico (Π_{po}). Essa espécie também aumentou a condutância estomática antes da abscisão foliar. Diante as mudanças ambientais e climáticas a escolha de espécies adequadas é essencial para viabilidade de projetos de RAD. As três espécies estudadas têm potencial para uso em RAD, exibindo diferentes estratégias para lidar com a seca.

Palavras-chave: Ecofisiologia, Mudas, Hidráulica de Plantas, Seca, Mortalidade.

Functional responses of tropical species subjected to different water concentrations

ABSTRACT

The biodiversity of the Amazon rainforest is threatened due to increasing forest degradation, affecting the entire society that benefits directly or indirectly from the forest. The Recovery of Degraded Areas (RAD) involves planting native species to reestablish the functionality of affected ecosystems. To implement successful restoration projects, it is necessary to identify species with greater drought tolerance, as periods of greater precipitation seasonality have become more frequent. In our study, we evaluated the ecological strategies of three seedling species used in forest restoration programs in eastern Amazonia. The species studied were *Bertholletia excelsa*, *Clitoria fairchildiana*, and *Manilkara elata*, which were subjected to three different water availability treatments: total water suppression, 15% of field capacity, 50% of field capacity, and 100% of field capacity. For each species, we evaluated 14 functional leaf, hydraulic, and growth traits. The total suppression of water resulted in the death of all individuals of the three species within two weeks., indicating that these species do not survive under extreme drought conditions at the seedling stage. However, a small amount of water (15% of field capacity) allowed the plants to survive until the end of the experiment by employing different morphological and physiological adjustments. The species exhibited distinct strategies for coping with water availability. *M. elata* increased its leaf dry matter content (LDMC), indicating an investment in durable leaves and slower growth, characteristic of conservative species with greater drought resistance. *B. excelsa* maintained constant biomass and higher wood density (WD) under drought conditions, reflecting a conservative strategy of carbon storage in the stem. *C. fairchildiana* showed lower wood density in the treatment with the highest water availability, while in drought treatments, we observed lower plasticity in leaf traits related to the turgor loss point (Ψ_{tlp}), which is the potential at which the cell loses turgor, and osmotic potential (Π_{po}), which indicates the concentration of solutes in the cell, and also increased stomatal conductance before leaf abscission. In the face of environmental and climate changes, the selection of suitable species is essential for the viability of RAD projects. The three studied species have potential for use in ecological restoration of degraded areas (RAD), showing different strategies to cope with drought.

Keywords: Ecophysiology, Seedlings, Plant Hydraulics, Drought, Mortality.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 10 |
| 2 | MATERIAL E MÉTODOS | 15 |
| 2.1 | ÁREA DE ESTUDO..... | 15 |
| 2.2 | SELEÇÃO DAS ESPÉCIES E DESENHO EXPERIMENTAL..... | 15 |
| 2.3 | ESTABELECIMENTO E ACLIMATAÇÃO DAS MUDAS | 17 |
| 2.4 | ATRIBUTOS FUNCIONAIS AVALIADOS..... | 19 |
| 2.4.1 | ATRIBUTOS MORFOLÓGICOS FOLIARES E DE MADEIRA | 22 |
| 2.4.2 | CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA | 23 |
| 2.5 | POTENCIAL HÍDRICO..... | 23 |
| 2.6 | CURVA PRESSÃO-VOLUME..... | 23 |
| 2.7 | ANÁLISE DE DADOS | 24 |
| 3 | RESULTADOS | 25 |
| 3.1 | SOBREVIVÊNCIA, AJUSTES MORFOLÓGICOS E DE CRESCIMENTO EM RESPOSTA À SECA..... | 25 |
| 3.2 | VARIAÇÃO NO POTENCIAL HÍDRICO, CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA E DEMAIS PARÂMETROS FISIOLÓGICOS EM RESPOSTA À SECA | 27 |
| 4 | DISCUSSÃO | 34 |
| 5 | CONCLUSÃO | 38 |
| 6 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 39 |

1. INTRODUÇÃO

A biodiversidade da Floresta Amazônica encontra-se ameaçada devido a crescente degradação florestal na região, causados por eventos de seca extremas, queimadas e pelo desmatamento para extração de madeira e ampliação de áreas para uso agropecuário e industrial (LONGO et al., 2020; LAPOLA et al., 2023). A emissão de carbono para atmosfera causado pela degradação florestal e desmatamento da Floresta amazônica é progressivo (ASSIS et al., 2020; KRUID et al., 2021). Desta forma, as alterações na utilização e exploração da terra na Amazônia têm impactos consideráveis nos ecossistemas e nas mudanças climáticas, tanto a nível regional quanto global (FEARNSIDE, 2007; NOBRE; SAMPAIO G.; L. SALAZA, 2007; DOLEY; AUDET, 2013).

A gestão responsável e sustentável dos recursos naturais na região amazônica é fundamental para minimizar os impactos ambientais e garantir a preservação da biodiversidade (SASSON; MALPICA, 2018; BERGAMO et al., 2022). A Recuperação de Áreas Degradadas (RAD) envolve um conjunto de medidas para a reabilitação de áreas degradadas em decorrência de atividades antrópicas, e uma das medidas é o plantio de espécies nativas com a finalidade de reestabelecer a funcionalidade dos ecossistemas afetados (DE JESUS et al., 2016; ROMANELLI et al., 2022). Deste modo, a produção de mudas nativas é necessária para possibilitarmos a recuperação e se faz necessário identificar espécies com maior tolerância a seca (RODRIGUES et al., 2023), uma vez que se tem observado elevada mortalidade de mudas ocasionada por estresse hídrico (WILL et al., 2013; ÁLVAREZ-CANSINO et al., 2022).

As mudanças climáticas representam um grande desafio para os projetos de restauração ecológica, especialmente em regiões como a Amazônia, onde a frequência e intensidade de eventos de seca estão aumentando de forma significativa, o que pode comprometer o sucesso a longo prazo dessas áreas restauradas, levando à mortalidade das espécies plantadas após alguns anos ou décadas (ZABIN et al., 2022; SVEJCAR; DAVIES; RITCHIE, 2023). Em várias partes do mundo, os cenários futuros indicam que secas mais severas e prolongadas se tornarão cada vez mais comuns, tornando necessário selecionar espécies que sejam mais tolerantes à seca, tanto para as condições climáticas atuais quanto futuras.(BUTTERFIELD et al., 2017) Deste modo, entender a capacidade de adaptação e resiliência das espécies a esses novos padrões

climáticos é crucial para maximizar a eficácia dos projetos de restauração, garantindo que as áreas restauradas possam resistir aos desafios impostos pelo clima em transformação (LAUGHLIN et al., 2017).

Assim, caracterizar as estratégias das espécies de plantas pioneiras e tardias que são utilizadas para recuperar áreas degradadas revela adaptações distintas que permitem a ocupação de diferentes nichos ecológicos e como respondem às variações ambientais em ambientes perturbados (CHAI et al., 2016). Entre os grupos sucessionais, as espécies pioneiras mostram características como rápido crescimento e a tolerância a condições extremas de luz e nutrientes facilitando sua rápida expansão e estabelecimento em habitats instáveis (VAN BREUGEL; BONGERS; MARTÍNEZ-RAMOS, 2007). Em contraste, as espécies tardias se estabelecem naturalmente em estágios mais avançados de sucessão ecológica, apresentando crescimento mais lento e maior longevidade, essas características garantem sua sobrevivência e a competição por recursos (CASPERSEN; PACALA, 2001). As espécies também diferem na deciduidade foliar, com algumas perdendo suas folhas sazonalmente (plantas decíduas) para economizar recursos durante períodos de seca, enquanto outras mantêm suas folhas durante todo o ano (sempre-verdes), permitindo uma fotossíntese contínua (GIVNISH, 2002; SOH et al., 2019).

De modo geral, nos últimos anos tem-se observado mudança no regime de precipitação ocasionando aumento nos períodos de seca e temperaturas mais elevadas em diversas partes do mundo (MALHI et al., 2008; LEWIS et al., 2011; LAWRENCE; VANDECAR, 2015; HARTMANN et al., 2022). Essas mudanças aumentam substancialmente a mortalidade plantas por limitação hídrica. Algumas espécies de plantas podem operar com potenciais hídricos mais negativos, ficando propensos a formação de embolia no xilema, que pode levar a uma disfunção vascular sistêmica, e, portanto, a perda das funções fisiológicas das plantas (OLIVEIRA et al., 2014; CHOAT et al., 2018). Portanto, avaliar os atributos funcionais de plantas utilizadas em programas de restauração florestal, é fundamental para prever a resistência e resiliência dessas espécies a seca e indicar espécies com maiores taxas de sobrevivência para o uso em projetos de restauração ecológica.

Os atributos funcionais são características das espécies que exercem um papel significativo para a manutenção do funcionamento das plantas (CHAPIN, 2003; SUDING et

al., 2008; LLORET et al., 2016). Esses atributos abrangem diversas características que vão desde aspectos fisiológicos, morfológicos, até atributos relacionados com a eficiência do uso da água (WESTOBY; WRIGHT, 2006; PÉREZ-HARGUINDEGUY et al., 2013; RIGANO et al., 2016). Sob condições ambientais adversas, diferentes espécies de plantas podem apresentar estratégias contrastantes de sobrevivência. As diferenças entre as espécies se dão, entre outros fatores, às suas diferenças em atributos funcionais, que se refletem em diferenças na alocação de recursos (e.g., água, carbono) para determinadas funções em detrimento de outras, o que chamamos de *trade-off* (REICH, 2014; HE; WEBSTER; HE, 2022).

As espécies podem adotar estratégias mais aquisitivas para maximizar a captação de água, possuindo maior eficiência hidráulica, porém mais vulnerável a seca, ou mais conservadoras com uma maior longevidade de seus tecidos e estocando mais recursos, apresentando maior resistência a seca (REICH, 2014; HOCHBERG et al., 2018; HEILMEIER, 2019; PÉREZ-RAMOS et al., 2019). Entre as estratégias que as plantas apresentam para lidar com o estresse hídrico, o controle estomático destaca-se, pois, a partir dele é possível diferenciar duas estratégias distintas. Por um lado, estão as espécies que adotam um comportamento isohídrico, ou seja, que mantêm um controle rigoroso sobre o status hídrico das folhas, regulando ativamente a abertura dos estômatos para minimizar a perda de água. Por outro lado, espécies com estratégia anisohídrica que têm uma resposta mais flexível ao estresse hídrico, que pode maximizar a absorção de carbono em condições variáveis, mas também pode aumentar o risco de desidratação em condições extremas devido ao fato de as espécies tolerarem maiores tensões no xilema (HOCHBERG et al., 2018)

Outros atributos contribuem para uma maior ou menor capacidade das espécies sobreviverem a limitação hídrica. Por exemplo, em ambiente com limitação hídrica, as plantas podem apresentar menor área foliar específica (SLA), que está relacionado ao investimento de carbono para construção foliar, e maior o conteúdo da matéria seca da folha (LDMC), que mostra o quanto a planta está estocando recursos na folha (SKELTON; WEST; DAWSON, 2015; CHATURVEDI et al., 2021). Outro atributo relevante é a densidade da madeira (WD), que está relacionado ao transporte de água das raízes para as folhas e a resistência mecânica da árvore, onde menor WD está positivamente relacionada com maior eficiência de transporte de água (HOFFMANN et al., 2011). A produção de biomassa total também é um bom indicador de resistência a seca, espécies que mantem uma grande produção de biomassa mesmo sob

condições de limitação hídrica, podem ser mais suscetíveis a seca (MÖHL et al., 2023; WEI et al., 2024). Através de variações nesses atributos as plantas podem ajustar sua fisiologia e morfologia com finalidade de garantir e sustentar suas atividades metabólicas e são importantes parâmetros para avaliarmos como as plantas respondem e se adaptam a ambiente de seca (GREENWOOD et al., 2017; GASTAUER et al., 2020).

O ponto de perda de turgor (Ψ_{tp}), o potencial osmótico (π_{po}) e o módulo de elasticidade (ϵ) são parâmetros fisiológicos essenciais que caracterizam a resposta das plantas ao estresse hídrico (BARTLETT et al., 2014; ÁLVAREZ-CANSINO et al., 2022). O ponto de perda de turgor reflete a capacidade das plantas de manter o turgor celular em estresse hídrico onde plantas com um ponto de perda de turgor mais elevado apresentam maior resistência à seca, pois suas células retêm água com mais eficiência, mesmo durante redução na disponibilidade de água permitindo que os estômatos fiquem abertos até potenciais mais negativos (BARTLETT et al., 2014; MARÉCHAUX et al., 2015). O potencial osmótico indica a concentração de soluto dentro da célula e a capacidade de transferência de água para estas células. Geralmente plantas com potencial osmótico mais negativo possuem maior capacidade de captar água do solo, mesmo em ambientes com solos mais secos, garantindo o turgor celular e a funcionalidade fisiológica (SANDERS; ARNDT, 2012). O módulo de elasticidade interfere na regulação da rigidez da parede celular. Ajustes nesses parâmetros fisiológicos são comumente observados como resposta a ambientes de seca (BARTLETT; SCOFFONI; SACK, 2012). Estudos recentes evidenciam que esses atributos hidráulicos se mostram eficientes preditores de mortalidade plantas (ZHU et al., 2018a; ÁLVAREZ-CANSINO et al., 2022).

O objetivo deste trabalho é avaliar as respostas à seca de três espécies de árvores no estágio de muda. Utilizamos duas espécies tardias, com folhas sempre-verdes, ou seja, que mantem suas folhas até a senescência e uma espécie pioneira de folhas decíduas, que aborta as folhas em condição de seca. Estas espécies selecionadas para o estudo são amplamente utilizadas em programas de restauração florestal na Amazônia oriental e diferem na sua taxa de sobrevivência em viveiro e em campo. Nós testamos as seguintes hipóteses:

- As respostas das espécies à limitação hídrica serão mais acentuadas nas espécies sempre-verdes quando comparado à espécie decídua, uma vez que essa espécie pode perder suas folhas em resposta à seca.

- As espécies sempre-verde tolerarão um potencial hídrico mais negativo e regularão os estômatos nos tratamentos com menor disponibilidade hídrica.
- Haverá ajustes no ponto de perda de turgor e potencial osmótico, com valores mais negativo nos tratamentos com menor disponibilidade hídrica.
- Haverá ajustes nos atributos foliares e de madeira em direção a uma estratégia mais conservativa do uso de recursos (i.e.: maior LDMC e densidade da madeira, menor SLA) com menor disponibilidade hídrica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em casa de vegetação com laterais teladas e telhado de acrílico, localizado no Instituto de Ciências Biológicas – ICB, da Universidade Federal do Pará – UFPA, durante o período de fevereiro de 2023 a outubro de 2023. As coordenadas geográficas são -1.47292, -48.45796, com 11 (onze) metros de elevação em relação ao nível do mar. A classificação do clima é tropical úmido (Af) segundo Köppen e Geiger, a média da temperatura é de 26,8°C e a pluviosidade média anual de 2537 mm (ALVARES et al., 2013).

Ao longo do experimento a temperatura e a umidade relativa do ar foram mensuradas diariamente através de termo-higrômetro digital instalado no interior da casa de vegetação. A temperatura média foi 30.4 °C, com máxima de 38.1 °C e a mínima de 22.8 °C, e a umidade relativa média do ar foi 72.8%, com máxima de 99% e mínima de 46.7%.

2.2 Seleção das espécies e desenho experimental

O experimento foi realizado em delineamento de blocos casualizados, utilizando 3 (três) espécies de interesse da empresa Mineração Paragominas S. A. para implementação de Recuperação de Áreas Degradadas (RAD), sendo elas, *Clitoria fairchildiana*, *Manilkara elata* e *Bertholletia excelsa* (Tabela 1, Figura 1).

Os blocos foram divididos por tratamento e rotacionados aleatoriamente entre as bancadas a cada sete dias. Os tratamentos consistiram em diferentes ofertas de água para as plantas, totalizando 4 (quatro) tratamentos com 11 repetições cada, sendo eles: supressão total de água, 15% da capacidade de campo, 50% da capacidade de campo e 100% da capacidade de campo (ponto em que o solo está completamente saturado com água).

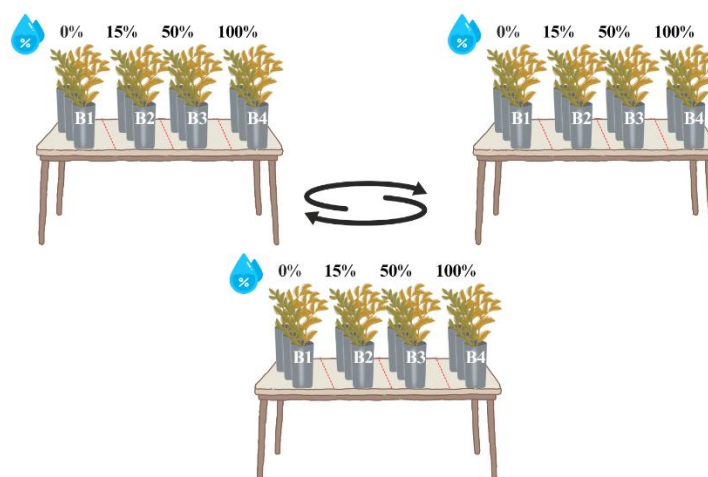


Figura 1 – Ilustração do desenho experimental utilizado

Fonte: Elaborado pelo Autor

Para determinarmos o volume de água aplicado em cada tratamento, nove vasos, sendo seis vasos de 5 litros e três vasos de 8l, foram separados e saturados de água até a capacidade de campo. Com isso, calculamos as proporções de água para cada um dos tratamentos. Irrigamos os vasos nas primeiras horas do dia, diariamente, com auxílio de uma proveta graduada, a fim de estimar corretamente a quantidade de água fornecida às plantas em cada tratamento. Verificamos a umidade do solo com um sensor analógico de umidade do solo (RESWAT/S-01).

Tabela 1 – Espécies tropicais utilizadas em RAD pós extração de minérios

| Nome Comum | Espécie | Família | Grupo funcional | Motivo da seleção | Quantidade de mudas |
|--------------------|-------------------------------|------------|---|---|---------------------|
| Palheteira | <i>Clitoria fairchildiana</i> | Fabaceae | Pioneira, decídua. (AMARAL et al., 2009) | Na área do PRAD esta espécie apresenta baixa mortalidade. | 44 |
| Maçaranduba | <i>Manilkara elata</i> | Sapotaceae | Tardia, sempre verde | Apresenta alta mortalidade no viveiro. | 44 |

| | | | | | |
|--------------------|-----------------------------|---------------|--|--|----|
| | | | (AMARAL et al., 2009) | | |
| Castanheira | <i>Bertholletia excelsa</i> | Lecythidaceae | Tardia, sempre verde (CARVALHO, 2014) | Nova espécie que está sendo produzido no viveiro da empresa para implantação em RAD. | 44 |

2.3 Estabelecimento e aclimação das mudas

Os indivíduos utilizados no experimento foram obtidos no viveiro de mudas vinculado à empresa Mineração Paragominas S.A. cuja coordenadas são -3.253485, -47.735877. As mudas, com idade de 5 (cinco) meses foram transplantadas para vasos após 60 dias de aclimação na casa de vegetação. Os vasos utilizados para o experimento possuem volume de 8 (oito) litros para as mudas de *Bertholletia excelsa* e volume de 5 (cinco) litros para as mudas de *Clitoria fairchildiana*, *Manilkara elata*. Utilizamos vasos de volume maior para a *Bertholletia excelsa* devido a mesma ter maior porte.



Figura 2 – Blocos com mudas de *Manilkara elata* (a), *Bertholletia excelsa* (b), *Clitoria fairchildiana* (c).
Fonte: Autor

O substrato utilizado nos vasos seguiu uma proporção de 2:1:1, respectivamente de solo, composto orgânico e areia branca (Figura 2). O material foi misturado manualmente com auxílio de pás, enxadas e pá de jardinagem, até sua homogeneização.



Figura 3 – Compostos usados para substrato, sem sentido horário, respectivamente: Composto orgânico, solo e areia branca.

Fonte: Arquivo pessoal

2.4 Atributos funcionais avaliados

As 11 mudas de cada espécie usadas em cada tratamento foram divididas em análises foliares e de crescimento ($n = 5$ indivíduos.), potencial hídrico ($n = 3$ indivíduos) e curvas pressão-volume ($n = 3$ indivíduos). Em nosso experimento foi realizado a mensuração de 11 atributos funcionais relacionados a características de crescimento e hidráulicos (Tabela 2). Algumas das medidas foram realizadas durante o experimento na casa de vegetação e outras realizadas somente ao final do experimento, onde as mudas foram conduzidas ao Laboratório de Ecologia de Produtores Primários – ECOPRO, vinculado a Universidade Federal do Pará para mensuração.

Tabela 2 – Atributos funcionais que foram avaliados no experimento e seu significado.

| Atributo | Sigla e Unidade | Significado Funcional | Frequência de medida |
|---|-------------------------------|---|-----------------------------|
| Área foliar* | LA (mm ²) | Está relacionado a estratégia ecofisiológica da planta, em condições de estresse hídrico as plantas tendem a diminuir sua área foliar para evitar perda de água por evapotranspiração (ANYIA, 2004; PÉREZ-HARGUINDEGUY et al., 2016) | Ao final do experimento |
| Área foliar específica* | SLA (m ² /g) | Refere-se a captação e estocagem de recursos, onde em condições de falta de água as plantas tendem a ter um maior investimento em carbono por unidade de área para produção da folha e maior longevidade, adotando estratégia mais conservadora (PÉREZ-HARGUINDEGUY et al., 2016) | Ao final do experimento |
| Conteúdo de matéria seca da folha* | LDMC (mg g ⁻¹) | Atributo relacionado a estocagem de carbono, em condições de déficit de água as plantas adotam estratégia mais conservadora, o que tende a aumentar o LDMC.(PÉREZ-HARGUINDEGUY et al., 2016; PÉREZ-RAMOS et al., 2019) | Ao final do experimento |
| Densidade da madeira* | WD (g cm ³) | É o parâmetro referente ao crescimento e tolerância à seca, na qual os indivíduos que possuem madeira mais leve crescem rápido e indivíduos que possuem madeira mais densa tendem a ter um maior número de vasos pequenos, o que reduz a | Ao final do experimento |

| | | | |
|--|---|---|--|
| | | chance de embolismo e permite a planta tolerar potenciais hídricos mais negativos (CHAVE et al., 2009) | |
| Condutância estomática | GS (mmol m ⁻² s ⁻¹) | É a medida referente a abertura e fechamento estomático durante as trocas gasosas. Em ambiente com baixa disponibilidade hídrica essa taxa tende a ser menor, uma vez que as plantas diminuem as aberturas dos estômatos com intuito de evitar a perda de água excessiva por evapotranspiração (MARCHIN et al., 2022) | Semanalmente durante o experimento |
| Potencial hídrico antes do amanhecer | Ψ_{PD} (MPa) | Medida referente ao grau de hidratação da planta, sendo antes do amanhecer o ponto em que a planta está mais hidratada e ao meio-dia o ponto que a planta está mais desidratada (KNIPFER et al., 2020) | Semanalmente durante o experimento |
| Potencial hídrico ao meio-dia | Ψ_{MD} (Mpa) | | |
| Potencial hídrico do ponto de perda de turgor | Ψ_{TLP} (Mpa) | Está relacionado ao potencial hídrico no qual as plantas perdem a turgescência das células. Um valor mais negativo do Ψ_{TLP} indica uma maior resistência a seca (BARTLETT; SCOFFONI; SACK, 2012; BARTLETT et al., 2016) | Três medidas, sendo a primeira antes do experimento, a segunda na metade do período do experimento, e a terceira ao fim. |
| Potencial Osmótico | π_{Po} (Mpa) | Está relacionado a concentração de solutos nas células vegetais, indicando maior quantidade de soluto em menores valores de potencial osmótico(BARTLETT; SCOFFONI; SACK, 2012) | Três medidas, sendo a primeira antes do experimento, a segunda na metade do período do experimento, e a terceira ao fim. |

| | | | |
|------------------------------------|---------------------|---|--|
| Módulo de elasticidade | ϵ (Mpa) | Indica a rigidez da parede celular(BARTLETT; SACK, 2012) | Três medidas, sendo a primeira antes do experimento, a segunda na metade do período do experimento, e a terceira ao fim. |
| Produção de biomassa total* | - (g) | Está relacionado a produção de matéria seca total da planta. Em ambientes com déficit hídrico a biomassa tende a diminuir (MÖHL et al., 2023) | Ao final do experimento |

Atributos Marcados (*) foram mensurados após o desbaste dos indivíduos.

2.4.1 Atributos morfológicos foliares e de madeira

Após o final do experimento, utilizamos 5 (cinco) mudas de cada tratamento em cada uma das espécies e fizemos a mensuração dos atributos foliares e de crescimento: área foliar específica (SLA), conteúdo da matéria seca da folha (LDMC), biomassa total e densidade da madeira (WD).

Para obtenção do LDMC as folhas frescas foram pesadas, e após, levadas a estufa, onde permaneceram secando a 60 °C pelo período de 48 (quarenta e oito) horas. Em seguida pesamos as folhas em balança de precisão e calculamos o LDMC como a razão da massa seca em estufa e da massa fresca (PÉREZ-HARGUINDEGUY et al., 2016). O SLA, foi obtido através da razão das médias de todas as folhas de cada indivíduo, pelo peso seco das respectivas folhas, a área foliar foi calculada utilizando o software ImageJ.

Determinamos a Densidade da madeira (WD) utilizando o método de imersão que tem como base o princípio de Arquimedes, onde o volume do corpo é igual o peso do volume de água deslocado.

$$WD = \frac{m}{V}$$

2.4.2 Condutância estomática

Ao longo do experimento mensuramos a condutância estomática (GS) duas vezes ao longo do dia, utilizando duas folhas de três indivíduos por tratamento por espécie. Realizamos as medidas duas vezes por semana, às segundas-feiras e às sextas-feiras, com auxílio de porômetro portátil (METER/SC-1). As medidas foram realizadas no horário das 08:00h às 10:00h e no horário das 13:00h às 15:00h.

2.5 Potencial hídrico

Realizamos as medidas de potencial hídrico ao longo do experimento entre os horários: 05:00h e 06:00h da manhã, para obtermos o potencial hídrico antes do amanhecer (Ψ_{PD}), momento em que a planta está mais hidratada e entre 12:00h e 13:00h para obtenção do potencial hídrico do meio-dia (Ψ_{MD}), ponto em que o vegetal está mais desidratado. Sempre utilizamos os mesmos indivíduos para mensuração das medidas ao amanhecer e ao meio-dia. Mensuramos o potencial hídrico em 1 folha em 3 indivíduos por espécie por tratamento, utilizando uma câmara de pressão do tipo Scholander (1505D-EXP) para esta finalidade. Nas duas primeiras semanas de experimento mensuramos o potencial hídrico em três dias ao longo da semana para detalharmos a resposta inicial à seca das espécies, principalmente devido ao tratamento de omissão total de água. A partir da terceira semana de experimento realizamos apenas uma medida por semana devido a limitação do número de folhas.

2.6 Curva Pressão-Volume

Para construção das curvas pressão-volume, ao longo do experimento, utilizamos três mudas de cada espécie em cada um dos tratamentos, em intervalos de 40 (quarenta) dias. Utilizamos uma folha de cada indivíduo, cortadas na base do pecíolo e que permaneceram reidratando por um período de 12h. Em seguida, iniciamos as medidas de Ψ utilizando a câmara de pressão de Scholander, após a obtenção do valor, as folhas eram imediatamente levadas a balança de precisão digital para terem seu peso aferido. Essas medidas eram repetidas até o limite de segurança da câmara de pressão. Ao término das medições as folhas foram levadas a estufa, onde permaneceram secando a 60 °C por período de 48h e, em seguida, pesadas para se

determinar o conteúdo de água relativa (CRA). A partir das curvas calculamos o potencial hídrico do ponto de perda de turgor, potencial osmótico e módulo de elasticidade, como demonstra a metodologia descrita por Bartlett, et al. (2012).

2.7 Análise de dados

Previamente às análises testamos a normalidade e a homoscedasticidade dos resíduos, os dados foram transformados sempre que necessário para atender aos pressupostos de normalidade. Para avaliarmos se os tratamentos de seca influenciaram nos atributos LDMC, SLA, WD e produção de biomassa utilizamos análise de variância (ANOVA) e a posteriori utilizamos teste “*post-hoc*” de Tukey para a comparação entre pares e para medição do tamanho do efeito.

Para testarmos a relação entre disponibilidade hídrica e os atributos Ψ_{PD} , Ψ_{MD} , Ψ_{TLP} , π_{Po} , ε e a GS, utilizamos o modelo linear de análise mista utilizando o pacote “lme4” proposto por (BATES et al., 2015). Nos modelos as espécies, os tratamentos e os dias em que as medidas foram realizadas foram considerados os fatores fixos e os atributos mensurados de cada indivíduo as nossas variáveis respostas. Os dados foram transformados sempre que necessário para atender aos pressupostos de normalidade. As análises foram realizadas utilizando o software R (VERSÃO 4.6.2, R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2023) juntamente com o software Jamovi (THE JAMOVI PROJECT, 2024).

3. RESULTADOS

3.1 Sobrevivência, ajustes morfológicos e de crescimento em resposta à seca

Após a primeira semana do início do experimento todos os indivíduos da espécie decídua e pioneira - *Clitoria fairchildiana* - que pertenciam ao tratamento de supressão total de água morreram. Na segunda semana, registramos a mortalidade de todos os indivíduos das espécies sempre-verde e tardias - *Manilkara elata* e *Bertholletia excelsa*. Devido a isto os indivíduos do tratamento de 0% da capacidade de campo não puderam ser utilizados para às medidas referentes às curvas pressão-volume e às medidas referentes ao LDMC, SLA, WD, Biomassa.

O conteúdo de matéria seca da folha (LDMC) apresentou diferenças significativas entre os tratamentos de disponibilidade hídrica para os indivíduos das espécies *Manilkara elata* (tardia e sempre-verde) e *Clitoria fairchildiana* (pioneira e decídua), porém a comparação entre pares não apontou diferença entre os tratamentos para a *C. fairchildiana*. Na espécie *Manilkara elata* o LDMC aumentou em resposta ao estresse hídrico. Especificamente, os indivíduos submetidos ao tratamento com 15% da capacidade de campo do substrato apresentaram LDMC em média 0.0523 (mg g^{-1}) maior ($p < 0.01$) que o tratamento de 50% da capacidade de campo e 0.06232 (mg g^{-1}) maior ($p < 0.01$) que o tratamento de 100% da capacidade de campo (Figura 4).

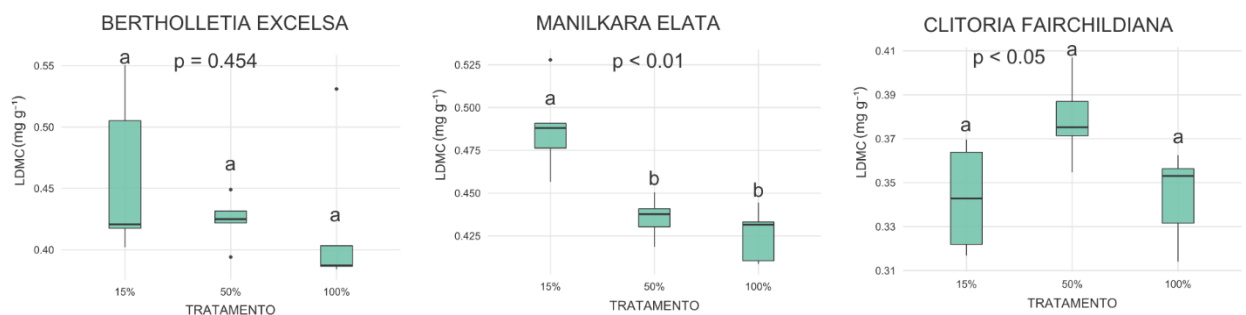


Figura 4 – Variação no conteúdo de matéria seca da folha (LDMC – Leaf Dry Matter Content) para três espécies utilizadas em RAD sob diferentes tratamentos de oferta de água. Letras diferentes sugerem resultados com diferença significativa ($p < 0.05$). Tratamentos 15% da capacidade de campo do substrato, 50% da capacidade de campo do substrato e 100% da capacidade de campo do substrato.

Para o atributo área foliar específica (SLA) o resultado da ANOVA evidenciou significância apenas para a *Clitoria fairchildiana* (pioneira e decídua), onde o SLA tendeu a aumentar com o estresse hídrico: foi observado que o tratamento com 15% de água no substrato

apresentou SLA maior que o tratamento com 50% ($p < 0.05$), e o tratamento 100% não diferenciou do tratamento 15% e do tratamento 50% (Figura 5).

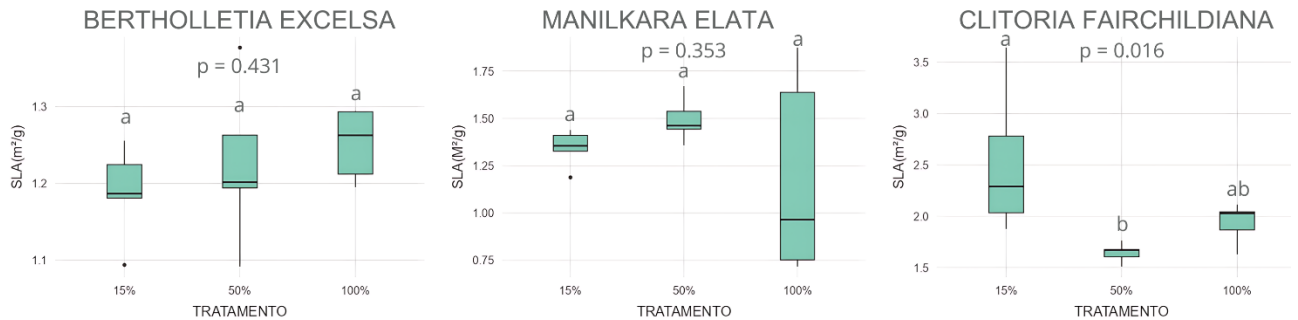


Figura 5 – Variação na Área foliar específica (SLA – Specific Leaf Area) para três espécies utilizadas em RAD sob diferentes tratamentos de oferta de água. Letras diferentes sugerem resultados com diferença significativa ($p < 0.05$). Tratamentos: 15% da capacidade de campo do substrato, 50% da capacidade de campo do substrato e 100% da capacidade de campo do substrato.

A densidade da madeira diferiu entre os tratamentos nas espécies *Bertholletia excelsa* (tardia e sempre-verde) ($p < 0.001$) e *Clitoria fairchildiana* (pioneira e decídua) ($p < 0.05$). A média da densidade da madeira dos indivíduos do tratamento de 15% da capacidade de campo foi maior em 0.104 g cm^{-3} ($p < 0.01$) quando comparado com o tratamento de 50% de água e maior em 0.1335 g cm^{-3} quando comparado ao tratamento de 100% da capacidade de campo ($p < 0.01$). Na espécie *Clitoria fairchildiana* a densidade da madeira do tratamento 50% da capacidade de campo foi maior em média 0.0842 g cm^{-3} que o tratamento de 15% da capacidade de campo, porém não houve diferença quando comparado ao tratamento 100% da capacidade de campo (Figura 6).

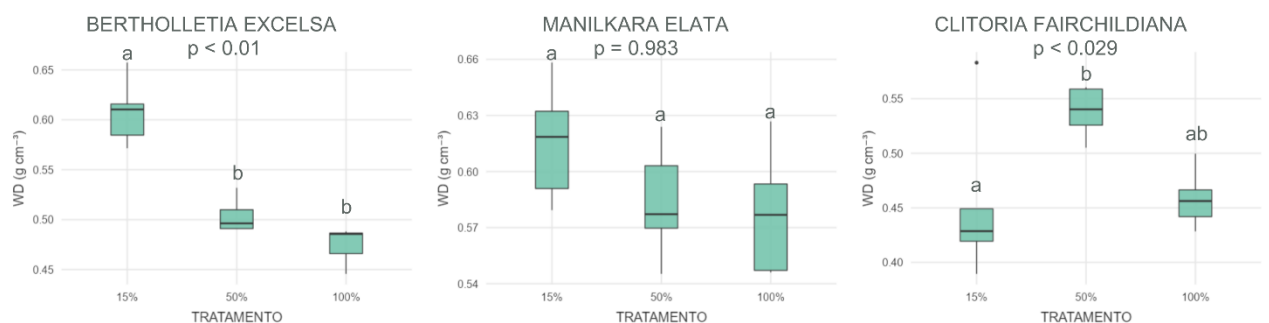


Figura 6 – Variação na densidade da madeira (WD – Wood density) para três espécies utilizadas em RAD sob diferentes tratamentos de oferta de água. Letras diferentes sugerem resultados com diferença significativa ($p < 0.05$). Tratamentos: 15% da capacidade de campo do substrato, 50% da capacidade de campo do substrato, 100% da capacidade de campo do substrato.

A biomassa total diferiu entre os tratamentos em duas espécies, *Manilkara elata* (tardia e sempre-verde) ($p < 0.05$) e *Clitoria fairchildiana* (pioneira e decídua) ($p < 0.01$). Para *Manilkara elata*, a biomassa total do tratamento 2, foi em média 19.6g menor que o encontrado no tratamento 50% da capacidade de campo ($p < 0.05$) e 16.67g menor que o tratamento 100% da capacidade de campo ($p < 0.05$). Para a *Clitoria fairchildiana* o tratamento 15% da capacidade de campo foi em média 46.3g menor que o tratamento 3 ($p < 0.01$) e 91.4g menor que o tratamento 100% capacidade de campo ($p < 0.01$). Já o tratamento 15% da capacidade de campo foi em média 45,1 g menor que o tratamento 4 ($p < 0.01$) (Figura 7).

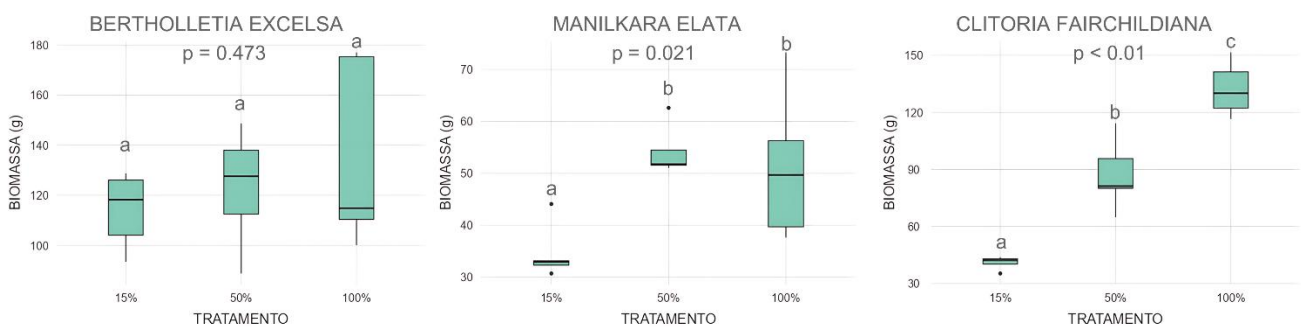


Figura 7 – Variação na biomassa total para três espécies utilizadas em RAD sob diferentes tratamentos de oferta de água. Letras diferentes sugerem resultados com diferença significativa ($p < 0.05$). Tratamentos = 15% da capacidade de campo do substrato, 50% da capacidade de campo do substrato e 100% da capacidade de campo do substrato.

3.2 Variação no potencial hídrico, condutância estomática e demais parâmetros fisiológicos em resposta à seca

Tanto o potencial hídrico do amanhecer (Ψ_{PD}) quanto o potencial hídrico do meio-dia (Ψ_{MD}) variaram em resposta ao tratamento e ao tempo de exposição do experimento (variável medida) (Tabela 3). O Ψ_{PD} e o Ψ_{MD} apresentou valores mais negativos no tratamento com menor disponibilidade hídrica (15% da capacidade de campo) (Figura 8). Na medida 9 (03 de novembro) houve uma diferença bastante acentuada nos valores de Ψ_{PD} e Ψ_{MD} para a espécie *Clitoria fairchildiana* e para o valor do Ψ_{MD} para a espécie *Manilkara elata* (Figura 8). A espécie *Bertholletia excelsa* apresentou os valores mais negativos tanto do Ψ_{PD} quanto do Ψ_{MD} (Figura 8).

Tabela 3 - Resultado dos modelos mistos lineares para o potencial hídrico do amanhecer (Ψ_{PD}) e o potencial hídrico do meio-dia (Ψ_{MD}) de três espécies utilizadas em RAD.

| <i>Bertholletia Excelsa</i> | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|----|-------|-------------------|-------|----|-------|
| Ψ_{PD} | F | dF | p | Ψ_{MD} | F | dF | p |
| Tratamento | 30.89 | 3 | <0.01 | Tratamento | 11.13 | 3 | 0.007 |
| Medida | 11.62 | 13 | <0.01 | Medida | 6.49 | 13 | <0.01 |
| Tratamento*Medida | 5.40 | 31 | <0.01 | Tratamento*Medida | 3.92 | 31 | <0.01 |
| <i>Manilkara elata</i> | | | | | | | |
| Ψ_{PD} | F | dF | P | Ψ_{MD} | F | dF | p |
| Tratamento | 14.98 | 3 | <0.01 | Tratamento | 86.18 | 3 | <0.01 |
| Medida | 3.19 | 12 | <0.01 | Medida | 45.44 | 12 | <0.01 |
| Tratamento*Medida | 2.45 | 29 | <0.01 | Tratamento*Medida | 3.78 | 29 | <0.01 |
| <i>Clitoria Fairchildiana</i> | | | | | | | |
| Ψ_{PD} | F | dF | P | Ψ_{MD} | F | dF | p |
| Tratamento | 5.53 | 3 | 0.034 | Tratamento | 44.18 | 3 | <0.01 |
| Medida | 3.18 | 14 | <0.01 | Medida | 20.14 | 14 | <0.01 |
| Tratamento*Medida | 2.92 | 32 | <0.01 | Tratamento*Medida | 7.87 | 32 | <0.01 |

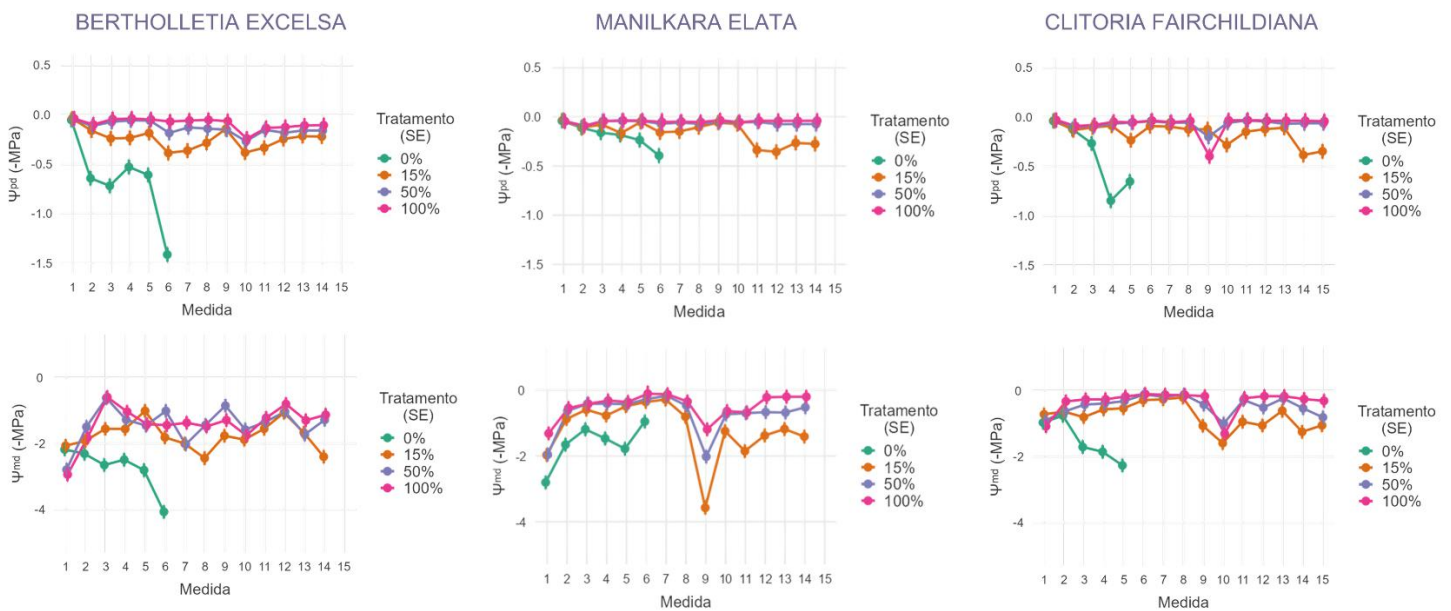


Figura 8 - Variação no potencial hídrico do amanhecer (Ψ_{PD}) e o potencial hídrico do meio-dia (Ψ_{MD}) de três espécies utilizadas em RAD, durante três meses de acompanhamento. Tratamentos = 0% da capacidade de campo do substrato, 15% da capacidade de campo do substrato, 50% da capacidade de campo do substrato e 100% da capacidade de campo do substrato.

A condutância estomática da manhã e da tarde variou em resposta ao tratamento e ao tempo de exposição do experimento (Tabela 4). Tanto no período da manhã quanto no período

da tarde nossos resultados mostraram maiores gs nos tratamentos com menor disponibilidade hídrica (Figura 9). No período da tarde a gs foi maior do que o observado no período da manhã (Figura 9). O tratamento de supressão de água resultou em aumento acentuado da condutância em todas as espécies pela manhã e à tarde (Figura 9). Dentre as espécies, após a morte dos indivíduos do tratamento de supressão d'água, a *Manilkara elata* no tratamento 15% da capacidade de campo apresentou maiores valores de condutância no período da tarde e a *Clitoria fairchildiana* no tratamento 15% da capacidade de campo apresentou maiores valores de condutância no período matutino (Figura 9).

Tabela 4 - Resultado dos modelos mistos lineares para a condutância estomática (gs) do período da manhã e a condutância estomática (gs) do período da tarde em de três espécies utilizadas em RAD.

| <i>Bertholletia Excelsa</i> | | | | | | | |
|-------------------------------|--------|----|-------|-------------------|--------|----|-------|
| gs Manhã | F | dF | p | gs Tarde | F | dF | p |
| Tratamento | 2.96 | 3 | <0.01 | Tratamento | 17.79 | 3 | 0.002 |
| Medida | 64.86 | 22 | <0.01 | Medida | 5.02 | 22 | <0.01 |
| Tratamento*Medida | 4.08 | 51 | <0.01 | Tratamento*Medida | 2.78 | 51 | <0.01 |
| <i>Manilkara elata</i> | | | | | | | |
| gs Manhã | F | dF | p | gs Tarde | F | dF | p |
| Tratamento | 31.82 | 3 | <0.01 | Tratamento | 26.81 | 3 | <0.01 |
| Medida | 5.02 | 22 | <0.01 | Medida | 3.52 | 22 | <0.01 |
| Tratamento*Medida | 4.81 | 51 | <0.01 | Tratamento*Medida | 2.74 | 51 | <0.01 |
| <i>Clitoria Fairchildiana</i> | | | | | | | |
| gs Manhã | F | dF | p | gs Tarde | F | dF | p |
| Tratamento | 103.35 | 3 | <0.01 | Tratamento | 115.61 | 3 | <0.01 |
| Medida | 4.89 | 24 | <0.01 | Medida | 3.23 | 24 | <0.01 |
| Tratamento*Medida | 4.04 | 54 | <0.01 | Tratamento*Medida | 2.69 | 54 | <0.01 |

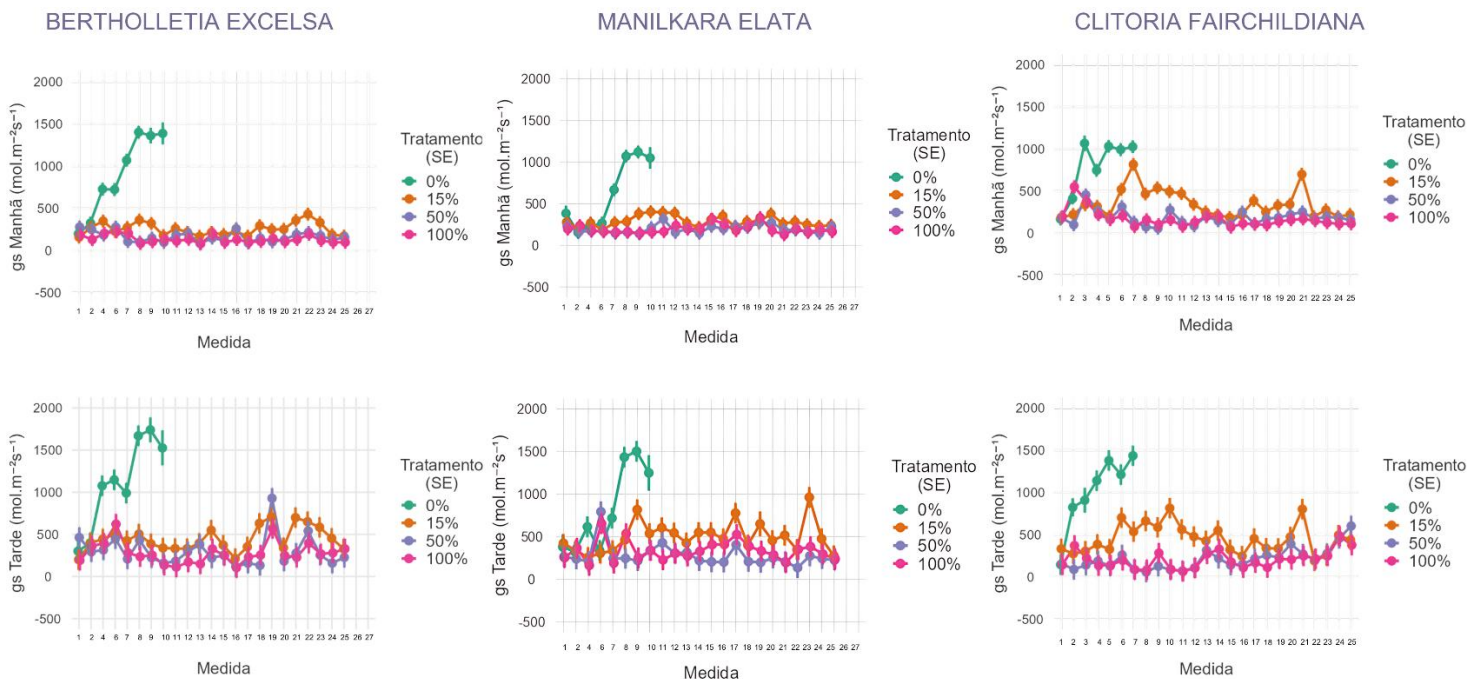


Figura 9 - Variação na condutância estomática (gs) do período da manhã e a condutância estomática (gs) do período da tarde em três espécies utilizadas em RAD, durante três meses de acompanhamento. Tratamento = 0% da capacidade de campo do substrato, 15% da capacidade de campo do substrato, 50% da capacidade de campo do substrato e 100% da capacidade de campo do substrato.

O ponto de perda de turgor (Ψ_{tlp}) não diferiu entre os tratamentos em nenhuma das espécies estudadas (Tabela 5). Observamos uma variação entre as medidas (início, meio e final do experimento) para as espécies *M. elata* ($p = 0.036$) e *C. fairchildiana* ($p < 0.01$). *M. elata* apresentou potencial hídrico mais negativo no final do experimento em todos os tratamentos analisados. *C. fairchildiana* apresentou o comportamento oposto, com valores menos negativo de Ψ_{tlp} ao final do experimento (Figura 10).

O potencial osmótico também não diferiu entre os tratamentos. No entanto, observamos diferenças ao longo da execução do experimento para as espécies *M. elata* e *C. fairchildiana*. (Tabela 5). A *M. elata* apresentou valores mais negativos nos três tratamentos no final do experimento (3ª medida) quando comparado ao início do experimento (1ª medida). Para a *C. fairchildiana* foi observado valores mais positivos em todos os três tratamentos na medida final do experimento (Figura 10).

Para o módulo de elasticidade (ϵ) houve diferença na interação entre os tratamentos e as medidas em *M. elata* ($p < 0.01$) (tabela 5). Na segunda medida (metade do experimento) observamos um aumento considerável da ϵ das plantas do tratamento de 15% comparado com

os demais tratamentos (Figura 10). Ao fim do experimento a *Bertholletia excelsa* mostrou diferença nos tratamentos ($p = 0.043$) de 15% e 100%, apresentando valores de ε maiores nas plantas submetidas ao tratamento de 100% da capacidade de campo (Figura 10).

Tabela 5 – Resultado dos modelos mistos lineares para ponto de perda de turgor (Ψ_{tp}), potencial osmótico (Π_{po}), e no módulo de elasticidade (ε) em de três espécies utilizadas em RAD.

| Modelo Linear misto – <i>Bertholletia excelsa</i> | | | | | | | | | | | |
|--|-------|----|--------------|--------------------------|-------|----|-----------------|--------------------------|-------|----|--------------|
| Ψ_{tp} | F | dF | P | π_{PO} | F | dF | p | ε | F | dF | p |
| Tratamento | 2.26 | 2 | 0.133 | Tratamento | 1.493 | 2 | 0.251 | Tratamento | 3.76 | 2 | 0.043 |
| Medida | 1.33 | 2 | 0.289 | Medida | 1.469 | 2 | 0.256 | Medida | 1.63 | 2 | 0.223 |
| Tratamento*medida | 1.97 | 4 | 0.143 | Tratamento*medida | 0.440 | 4 | 0.778 | Tratamento*medida | 2.44 | 4 | 0.084 |
| Modelo Linear misto – <i>Manilkara elata</i> | | | | | | | | | | | |
| Ψ_{tp} | F | dF | P | π_{PO} | F | dF | p | ε | F | dF | p |
| Tratamento | 0.864 | 2 | 0.438 | Tratamento | 1.551 | 2 | 0.239 | Tratamento | 4.82 | 2 | 0.021 |
| Medida | 4.028 | 2 | 0.036 | Medida | 7.889 | 2 | 0.003 | Medida | 1.61 | 2 | 0.227 |
| Tratamento*medida | 0.250 | 4 | 0.906 | Tratamento*medida | 0.453 | 4 | 0.769 | Tratamento*medida | 4.96 | 4 | 0.007 |
| Modelo Linear misto – <i>Clitoria fairchildiana</i> | | | | | | | | | | | |
| Ψ_{tp} | F | dF | P | π_{PO} | F | dF | p | ε | F | dF | p |
| Tratamento | 0.348 | 2 | 0.712 | Tratamento | 3.42 | 2 | 0.06 | Tratamento | 0.605 | 2 | 0.558 |
| Medida | 7.67 | 2 | 0.005 | Medida | 16.67 | 2 | <0.01 | Medida | 0.321 | 2 | 0.73 |
| Tratamento*medida | .935 | 4 | 0.469 | Tratamento*medida | 1.97 | 4 | 0.147 | Tratamento*medida | 1.666 | 4 | 0.207 |

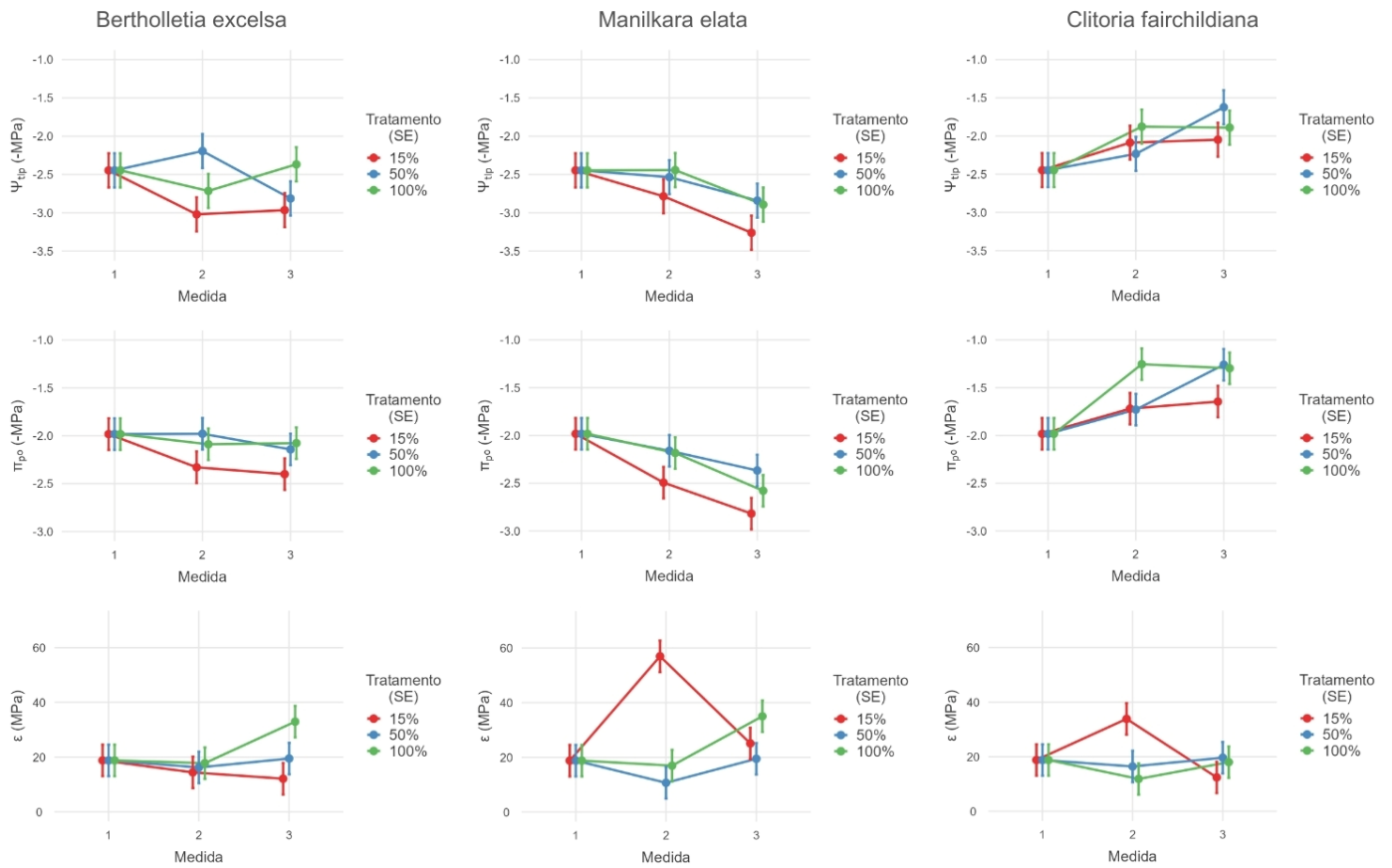


Figura 10 – Variação do ponto de perda de turgor (Ψ_{wp}), potencial osmótico (Π_{po}), e no módulo de elasticidade (ϵ). Tratamentos (T): 15% da capacidade de campo do substrato, 50% da capacidade de campo do substrato e 100% da capacidade de campo do substrato.

4. DISCUSSÃO

Nossos resultados indicam que as três espécies de nosso estudo, no estágio de muda, apresentam diferentes estratégias para lidar com os distintos cenários de disponibilidade de água no substrato. Mostramos que, uma seca severa, com a supressão total de água, leva a mortalidade de todos os indivíduos em um intervalo de tempo curto para as três espécies. No entanto, uma pequena quantidade de água (15% da capacidade de campo) é suficiente para as espécies manterem seu funcionamento por meio de ajustes morfológicos e fisiológicos, ou seja, as três espécies conseguiram aclimatar e apresentaram respostas plásticas à variação na disponibilidade de água.

As três espécies diferem quanto a alocação de recursos ao longo do experimento em resposta à variação na disponibilidade hídrica. As duas espécies sempre verdes e tardias apresentaram estratégia mais conservativa no tratamento com 15% da capacidade de campo. No entanto, os órgãos de ajuste diferiram entre as espécies, no qual, *M. elata* apresentou ajustes na construção foliar e *B. excelsa* na madeira. *M. elata* investiu em alocar mais recursos para construção foliar, enquanto as outras duas espécies não seguiram a mesma estratégia e mantiveram valores aproximados de LDMC nos três tratamentos. O aumento do LDMC na *M. elata* reflete o crescimento mais lento das folhas e a longevidade destas (WRIGHT; CANNON, 2001), o que pode estar refletindo a capacidade de maior resistência ao estresse ambiental causado pela seca (SUTER; EDWARDS, 2013; PÉREZ-RAMOS et al., 2019). Para o SLA na espécie *C. fairchildiana* houve uma diminuição nesse atributo nos indivíduos do tratamento de 50% da capacidade de campo. Já as demais espécies não diferiram, estes resultados são dissimilares a estudos que apontam que ambientes com baixa disponibilidade de água resultam em menor SLA, uma vez que essas plantas investem mais carbono para a construção foliar para manter estas operante por períodos mais longos (PRADO-JUNIOR et al., 2016; GREENWOOD et al., 2017).

Outra estratégia observada foi o aumento da densidade da madeira em *B. excelsa*, espécie sempre verde e tardia, que alocou mais carbono no caule em condições de seca. A densidade da madeira está ligada a resistência hidráulica, (GREENWOOD et al., 2017). A *M. elata* não apresentou variações significativas na densidade da madeira, o que nos leva a crer que as mudas desta espécie investiram em folhas mais longevas, com maior LDMC. Já a espécie

decídua, *C. fairchildiana*, apresentou menor densidade da madeira nos indivíduos do tratamento correspondente a 15% e 100% da capacidade de campo, a menor densidade da madeira era esperada para essa espécie uma vez que esta é uma espécie de crescimento rápido e que apresenta baixo custo de construção de caule (SANTIAGO et al., 2004). Porém, observamos maior densidade da madeira no tratamento que correspondia a 50% da capacidade de campo, resultado inusitado pois esta é uma espécie mais aquisitiva, o excesso de água também pode atuar como fator estressante e talvez ter afetado como esses indivíduos direcionaram a alocação de seus recursos. Espécies aquisitivas tendem a apresentar maior eficiência de uso água, com vasos maiores e menos densos em detrimento da resistência hidráulica, que é observado em plantas mais conservativas com maior densidade de vasos e vasos mais estreitos (LOPEZ-IGLESIAS; VILLAR; POORTER, 2014).

As três espécies apresentaram diferentes respostas em relação a biomassa total, no qual, a espécie decídua e pioneira apresentou redução mais acentuada na biomassa em tratamento com maior limitação hídrica. A espécie *B. excelsa* não apresentou variações significativas na sua biomassa total entre os tratamentos, mostrando bom desempenho na produção de biomassa mesmo em limitação hídrica. Por outro lado, *Manilkara elata* e *Clitoria fairchildiana* apresentam uma maior sensibilidade à disponibilidade de água, evidenciada pela redução na biomassa total em condições de menor disponibilidade hídrica, esse comportamento contrastante pode ser explicado pelas diferentes estratégias de adaptação ao estresse hídrico adotadas por cada espécie (JAMIESON et al., 1995; WEI et al., 2024). Já a *C. fairchildiana*, que é uma espécie que apresenta estratégia mais aquisitiva, diminuiu coordenadamente a biomassa com a diminuição da oferta de água, evidenciando que a espécie investe no crescimento e alocação de biomassa quando as condições ambientais são favoráveis para isso.

Como esperado, todas as espécies apresentaram potencial hídrico mais negativo à medida que a disponibilidade hídrica no experimento diminuía. O contrário ocorreu com a condutância estomática, no qual observamos maior g_s nos indivíduos submetidos aos tratamentos de limitação hídrica principalmente no período mais quente do dia (entre 13:00h e 15:00h). Esse resultado era esperado para a *C. fairchildiana* que por ser uma espécie pioneira, decídua e com estratégia aquisitiva tenderia a maximizar as trocas gasosas antes da abscisão foliar (HOCHBERG et al., 2018). Porém as duas espécies sempre verdes e com um comportamento mais conservativas também apresentaram esse mesmo comportamento. As três

espécies estudadas toleraram potenciais hídricos consideravelmente negativos no tratamento com 15% da capacidade de campo mantendo alta condutância estomática, revelando um comportamento anisohídrico. O comportamento anisohídrico observado nas três espécies sugere que essas plantas conseguem manter seus estômatos abertos mesmo em situação hídrica limitante (MARTÍNEZ-VILALTA et al., 2014), o que pode ser muito vantajoso para maximizar a fotossíntese em ambientes com baixa disponibilidade de água ou curtos períodos de disponibilidade hídrica, no entanto, pode haver maior risco de falha hidráulica. Após a quinta (*C. fairchildiana*) e sexta medida (*B. excelsa* e *M. elata*) do Ψ e g_s (14 dias de supressão de água) os indivíduos do tratamento de supressão de água morreram, provavelmente por embolia do xilema, uma vez que espécies anisohídricas diminuem o risco de morte por privação de carbono, mas em contrapartida elevam o risco de cavitação e, portanto, a falha hidráulica (ROWLAND et al., 2015).

Para operar com potenciais hídricos baixos nas folhas as plantas das espécies *M. elata* apresentaram $\Psi_{t\text{ip}}$ e $\Pi_{p\text{o}}$ mais negativos no decorrer do experimento, esses resultados demonstram que houve uma aclimação desses indivíduos ao longo do experimento, por meio do ajuste osmótico e otimizando o funcionamento da planta mesmo em baixos potenciais hídricos (MARÉCHAUX et al., 2015). Por outro lado *C. fairchildiana* apresentou $\Psi_{t\text{ip}}$ e $\Pi_{p\text{o}}$ mais positivo ao longo do trabalho, essa espécie é decídua, ou seja, tem a capacidade de perder as folhas evitando a seca. Como ela apresenta esse comportamento, a espécie não apresentou ajustes foliares e teciduais para lidar com o déficit hídrico operando muitas vezes com Ψ_{MD} mais negativo que o $\Psi_{t\text{ip}}$. Dentre as três espécies a *Manilkara elata* foi a que apresentou valores mais negativos de $\Psi_{t\text{ip}}$ e $\Pi_{p\text{o}}$, sendo estes mais negativos que os valores de Ψ_{MD} observados ao longo do trabalho, essa plasticidade é de grande importância para a sobrevivência desses indivíduos ao passar por períodos de baixa disponibilidade hídrica (BARTLETT et al., 2014). A plasticidade no $\Psi_{t\text{ip}}$ e $\Pi_{p\text{o}}$ pode ser um dos fatores que explica o comportamento anisohídrico das espécies e que possibilitou que as espécies mantivessem e aumentassem a condutância estomática mesmo no tratamento com 15% da capacidade de campo.

O módulo de elasticidade foi o atributo mais variável entre as espécies e tratamentos. A *B. excelsa* apresentou ε maior no tratamento que corresponde a 100% da capacidade de campo e menor ε nos indivíduos do tratamento de 15% da capacidade de campo. Há alguns conflitos na literatura sobre a relação do módulo de elasticidade e a seca, alguns apontam para

aumento do ε (KHALIL; GRACE, 1992) e outros demonstram diminuição do ε em condição de seca (DE DIEGO et al., 2013). Possivelmente um valor menor de ε contribui para a manutenção do turgor celular em situação de baixa quantidade de água na célula em plantas lenhosas (PALLARDY; KOZLOWSKI, 2008). Já a espécie *M. elata* aumentou o ε o na metade do experimento, seguido de estabilização ao final, o que nos dá indício de maior adaptação e plasticidade quando em ambientes desfavoráveis a disponibilidade de água (BARTLETT et al., 2014).

Nossos resultados tem implicações significativas para a restauração ecológica em áreas degradadas, principalmente em regiões sujeitas a variações na disponibilidade de hídrica. A compreensão das estratégias tanto de aclimatação quanto de alocação de recursos das espécies pode ajudar a orientar a seleção de plantas mais adequadas para diferentes condições ambientais (BALACHOWSKI; VOLAIRE, 2018). O uso de espécies nativas na restauração de áreas degradadas tem despertado grande interesse na pesquisa ecológica e essas espécies são frequentemente consideradas mais adequadas para a restauração devido à sua adaptação a região, o que pode acelerar a recuperação do ecossistema e promover a biodiversidade (GAIROLA; BAHUGUNA; BHATT, 2023). Portanto, o entendimento sobre a capacidade de ajuste osmótico de plantas nativas em condições de estresse como o de déficit hídrico é crucial para aplicações práticas para reabilitar áreas altamente degradadas. A espécie *M. elata*, por apresenta características como folhas mais longevas com maior LDMC, maior plasticidade hídrica, com ajustes osmóticos e Ψ_{tp} mais negativo, tem potencial para ser utilizada em programas de restauração ecológica. No entanto, essa espécie pode mostrar-se sensível se introduzida logo no início do plantio de restauração, podendo apresentar elevada mortalidade. Portanto, deve-se já ter uma cobertura da área para introdução da *M. elata*.

A *C. fairchildiana* e a *B. excelsa*, embora apresentem comportamentos diferentes, também têm potencial para uso em RAD, a *C. fairchildiana*, por adotar uma estratégia de perda foliar para evitar o estresse hídrico, o que pode ser útil em áreas onde a escassez de água é sazonal, permitindo que a planta evite danos irreversíveis. Já a *B. excelsa*, apesar de apresentar menor elasticidade do tecido sob condições de seca, demonstra um potencial considerável para aclimatação e estabilização, especialmente em ambientes com maior disponibilidade de água, devido ao seu comportamento anisohídrico. Ambas as espécies podem ser utilizadas principalmente em projetos de restauração ecológica que visem restaurar a funcionalidade do

ecossistema e promover a sustentabilidade a longo prazo, mantendo um equilíbrio entre espécies com diferentes estratégias adaptativas (LÖF et al., 2019).

5. CONCLUSÃO

Mostramos que o déficit hídrico influenciou nos padrões de alocação de recurso nas três espécies e levou a ajustes ecofisiológicos. No entanto, as respostas diferiram nas três espécies, no qual as espécies tardias e sempre verdes mostraram mais conservativas no uso de recursos e conseguiram se ajustar de forma mais segura para lidar com o déficit hídrico. Já a espécie pioneira e decídua, mais aquisitiva na aquisição e uso de recursos (*C. fairchildiana*) adota estratégias mais arriscadas para manter seu funcionamento. No entanto, a aclimação das espécies foi possível mantendo uma pequena quantidade de água no solo, no qual, a omissão total de água levou a uma rápida mortalidade das espécies, o que indica que secas muito intensas e frequentes podem ter efeitos muito danoso para a vegetação. Isso é ainda mais sério quando se considera os plantios de restauração florestal, no qual o microclima pode ser ainda mais seco, o que poderia levar a uma elevada mortalidade de plantas. Nossos resultados comprovam a complexidade das adaptações ecofisiológicas das espécies de árvores tropicais e nos leva a entender a importância dessas respostas para a previsão dos impactos das mudanças climáticas nas florestas tropicais. As estratégias conservativas da *M. elata* e da *B. excelsa*, sugerem que estas espécies podem ser ideais para utilização em locais onde a disponibilidade de água é mais limitada. Por outro lado, a estratégia aquisitiva da *C. fairchildiana*, que investe rapidamente em biomassa quando a água está disponível, pode ser vantajosa se utilizada em áreas onde a água é mais abundante ou intermitente, promovendo um rápido estabelecimento inicial.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ÁLVAREZ-CANSINO, L. et al. Turgor loss point predicts survival responses to experimental and natural drought in tropical tree seedlings. **Ecology**, v. 103, n. 6, 11 jun. 2022.

AMARAL, D. D. DO et al. Checklist da flora arbórea de remanescentes florestais da região metropolitana de Belém e valor histórico dos fragmentos, Pará, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais**, v. 4, n. 3, p. 231–289, 21 dez. 2009.

ANYIA, A. Water-use efficiency, leaf area and leaf gas exchange of cowpeas under mid-season drought. **European Journal of Agronomy**, v. 20, n. 4, p. 327–339, abr. 2004.

ASSIS, T. O. et al. CO₂ emissions from forest degradation in Brazilian Amazon. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 10, p. 104035, 1 out. 2020.

BALACHOWSKI, J. A.; VOLAIRE, F. A. Implications of plant functional traits and drought survival strategies for ecological restoration. **Journal of Applied Ecology**, v. 55, n. 2, p. 631–640, 23 mar. 2018.

BARTLETT, M. K. et al. Global analysis of plasticity in turgor loss point, a key drought tolerance trait. **Ecology Letters**, v. 17, n. 12, p. 1580–1590, 17 dez. 2014.

BARTLETT, M. K. et al. The correlations and sequence of plant stomatal, hydraulic, and wilting responses to drought. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 46, p. 13098–13103, 15 nov. 2016.

BARTLETT, M. K.; SCOFFONI, C.; SACK, L. The determinants of leaf turgor loss point and prediction of drought tolerance of species and biomes: a global meta-analysis. **Ecology Letters**, v. 15, n. 5, p. 393–405, maio 2012.

BATES, D. et al. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. **Journal of Statistical Software**, v. 67, n. 1, 2015.

BERGAMO, D. et al. The Amazon bioeconomy: Beyond the use of forest products. **Ecological Economics**, v. 199, p. 107448, set. 2022.

BUTTERFIELD, B. J. et al. Prestoration: using species in restoration that will persist now and into the future. **Restoration Ecology**, v. 25, n. S2, 16 dez. 2017.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. 1. ed. Distrito Federal: EMBRAPA, 2014. v. 5

CASPERSEN, J. P.; PACALA, S. W. Successional diversity and forest ecosystem function. **Ecological Research**, v. 16, n. 5, p. 895–903, 12 dez. 2001.

CHAI, Y. et al. Plant functional traits suggest a change in novel ecological strategies for dominant species in the stages of forest succession. **Oecologia**, v. 180, n. 3, p. 771–783, 12 mar. 2016.

CHAPIN, F. S. Effects of Plant Traits on Ecosystem and Regional Processes: a Conceptual Framework for Predicting the Consequences of Global Change. **Annals of Botany**, v. 91, n. 4, p. 455–463, 1 mar. 2003.

CHATURVEDI, R. K. et al. Functional traits indicate a continuum of tree drought strategies across a soil water availability gradient in a tropical dry forest. **Forest Ecology and Management**, v. 482, p. 118740, fev. 2021.

CHAVE, J. et al. Towards a worldwide wood economics spectrum. **Ecology Letters**, v. 12, n. 4, p. 351–366, 10 abr. 2009.

CHOAT, B. et al. Triggers of tree mortality under drought. **Nature**, v. 558, n. 7711, p. 531–539, 27 jun. 2018.

DE DIEGO, N. et al. Solute accumulation and elastic modulus changes in six radiata pine breeds exposed to drought. **Tree Physiology**, v. 33, n. 1, p. 69–80, 1 jan. 2013.

DE JESUS, E. N. et al. Natural regeneration of plant species in revegetated mining areas. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 2, p. 191–200, 2016.

DOLEY, D.; AUDET, P. Adopting novel ecosystems as suitable rehabilitation alternatives for former mine sites. **Ecological Processes**, v. 2, n. 1, p. 1–11, 2013.

FEARNSIDE, P. M. Uso da terra na Amazônia e as mudanças climáticas globais. **Brazilian Journal of Ecology**, 2007.

GAIROLA, S. U.; BAHUGUNA, R.; BHATT, S. S. Native Plant Species: a Tool for Restoration of Mined Lands. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 2, p. 1438–1448, 23 jun. 2023.

GASTAUER, M. et al. Vegetative functional traits guide plant species selection for initial mineland rehabilitation. **Ecological Engineering**, v. 148, p. 105763, abr. 2020.

GIVNISH, T. Adaptive significance of evergreen vs. deciduous leaves: solving the triple paradox. **Silva Fennica**, v. 36, n. 3, 2002.

GREENWOOD, S. et al. Tree mortality across biomes is promoted by drought intensity, lower wood density and higher specific leaf area. **Ecology Letters**, v. 20, n. 4, p. 539–553, abr. 2017.

HARTMANN, H. et al. Annual Review of Plant Biology Climate Change Risks to Global Forest Health: Emergence of Unexpected Events of Elevated Tree Mortality Worldwide. **Annual Review of Plant Biology**, v. 73, p. 673–702, 2022.

HE, Z.; WEBSTER, S.; HE, S. Y. Growth–defense trade-offs in plants. **Current Biology**, v. 32, n. 12, p. R634–R639, jun. 2022.

HEILMEIER, H. Functional traits explaining plant responses to past and future climate changes. **Flora**, v. 254, p. 1–11, maio 2019.

HOCHBERG, U. et al. Iso/Anisohdry: A Plant–Environment Interaction Rather Than a Simple Hydraulic Trait. **Trends in Plant Science**, v. 23, n. 2, p. 112–120, fev. 2018.

HOFFMANN, W. A. et al. Hydraulic failure and tree dieback are associated with high wood density in a temperate forest under extreme drought. **Global Change Biology**, v. 17, n. 8, p. 2731–2742, ago. 2011.

JAMIESON, P. D. et al. Drought effects on biomass production and radiation-use efficiency in barley. **Field Crops Research**, v. 43, n. 2–3, p. 77–86, out. 1995.

KHALIL, A. A. M.; GRACE, J. Acclimation to Drought in *Acer pseudoplatanus* L. (Sycamore) Seedlings. **Journal of Experimental Botany**, v. 43, n. 12, p. 1591–1602, 1992.

KNIPFER, T. et al. Predicting Stomatal Closure and Turgor Loss in Woody Plants Using Predawn and Midday Water Potential. **Plant Physiology**, v. 184, n. 2, p. 881–894, out. 2020.

KRUID, S. et al. Beyond Deforestation: Carbon Emissions From Land Grabbing and Forest Degradation in the Brazilian Amazon. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 4, 27 jul. 2021.

LAPOLA, D. M. et al. The drivers and impacts of Amazon forest degradation. **Science**, v. 379, n. 6630, 27 jan. 2023.

LAUGHLIN, D. C. et al. Using trait-based ecology to restore resilient ecosystems: historical conditions and the future of montane forests in western North America. **Restoration Ecology**, v. 25, n. S2, 10 dez. 2017.

LAWRENCE, D.; VANDECAR, K. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. **Nature Climate Change**, v. 5, n. 1, p. 27–36, 18 dez. 2015.

LEWIS, S. L. et al. The 2010 Amazon drought. **Science**, v. 331, n. 6017, p. 554, 4 fev. 2011.

LLORET, F. et al. Climatic events inducing die-off in Mediterranean shrublands: are species' responses related to their functional traits? **Oecologia**, v. 180, n. 4, p. 961–973, 22 abr. 2016.

LÖF, M. et al. Restoring forests: regeneration and ecosystem function for the future. **New Forests**, v. 50, n. 2, p. 139–151, 28 mar. 2019.

LONGO, M. et al. Impacts of Degradation on Water, Energy, and Carbon Cycling of the Amazon Tropical Forests. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 125, n. 8, 20 ago. 2020.

LOPEZ-IGLESIAS, B.; VILLAR, R.; POORTER, L. Functional traits predict drought performance and distribution of Mediterranean woody species. **Acta Oecologica**, v. 56, p. 10–18, abr. 2014.

MALHI, Y. et al. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. **Science**, v. 319, n. 5860, p. 169–172, 11 jan. 2008.

MARCHIN, R. M. et al. Extreme heat increases stomatal conductance and drought-induced mortality risk in vulnerable plant species. **Global Change Biology**, v. 28, n. 3, p. 1133–1146, 1 fev. 2022.

MARÉCHAUX, I. et al. Drought tolerance as predicted by leaf water potential at turgor loss point varies strongly across species within an Amazonian forest. **Functional Ecology**, v. 29, n. 10, p. 1268–1277, 29 out. 2015.

MARTÍNEZ-VILALTA, J. et al. A new look at water transport regulation in plants. **New Phytologist**, v. 204, n. 1, p. 105–115, 2 out. 2014.

MÖHL, P. et al. Recurrent summer drought affects biomass production and community composition independently of snowmelt manipulation in alpine grassland. **Journal of Ecology**, v. 111, n. 11, p. 2357–2375, 23 nov. 2023.

NOBRE, C. A.; SAMPAIO G.; L. SALAZA. Mudanças climáticas e Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, 2007.

OLIVEIRA, R. S. et al. Changing precipitation regimes and the water and carbon economies of trees. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, n. 1, p. 65–82, 13 mar. 2014.

PALLARDY, S.; KOZLOWSKI, T. **Physiology of woody plants**. 3. ed. London: Elsevier, 2008.

PÉREZ-HARGUINDEGUY, N. et al. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. **Australian Journal of Botany**, v. 61, n. 3, p. 167–234, 2013.

PÉREZ-HARGUINDEGUY, N. et al. Corrigendum to: New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. **Australian Journal of Botany**, v. 64, n. 8, p. 715, 2016.

PÉREZ-RAMOS, I. M. et al. Functional traits and phenotypic plasticity modulate species coexistence across contrasting climatic conditions. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, 1 dez. 2019.

PRADO-JUNIOR, J. A. et al. Conservative species drive biomass productivity in tropical dry forests. **Journal of Ecology**, v. 104, n. 3, p. 817–827, 19 maio 2016.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Viena, Austria R Foundation for Statistical Computing, , 2023.

REICH, P. B. The world-wide ‘fast-slow’ plant economics spectrum: a traits manifesto. **Journal of Ecology**, v. 102, n. 2, p. 275–301, mar. 2014.

RIGANO, M. M. et al. Eco-physiological response to water stress of drought-tolerant and drought-sensitive tomato genotypes. **Plant Biosystems**, v. 150, n. 4, p. 682–691, 3 jul. 2016.

RODRIGUES, J. C. W. et al. A importância da produção de mudas de essências florestais na região amazônica: uma revisão sistemática. **Revista Científica FAEMA**, v. 14, n. 1, p. 10–24, 22 fev. 2023.

ROMANELLI, J. P. et al. Biodiversity responses to restoration across the Brazilian Atlantic Forest. **Science of The Total Environment**, v. 821, p. 153403, maio 2022.

ROWLAND, L. et al. Death from drought in tropical forests is triggered by hydraulics not carbon starvation. **Nature**, v. 528, n. 7580, p. 119–122, 23 dez. 2015.

SANDERS, G. J.; ARNDT, S. K. Osmotic Adjustment Under Drought Conditions. Em: **Plant Responses to Drought Stress**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 199–229.

SANTIAGO, L. S. et al. Leaf photosynthetic traits scale with hydraulic conductivity and wood density in Panamanian forest canopy trees. **Oecologia**, v. 140, n. 4, p. 543–550, 1 ago. 2004.

SASSON, A.; MALPICA, C. Bioeconomy in Latin America. **New Biotechnology**, v. 40, p. 40–45, 25 jan. 2018.

SKELTON, R. P.; WEST, A. G.; DAWSON, T. E. Predicting plant vulnerability to drought in biodiverse regions using functional traits. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 18, p. 5744–5749, 5 maio 2015.

SOH, W. K. et al. Rising CO₂ drives divergence in water use efficiency of evergreen and deciduous plants. **Science Advances**, v. 5, n. 12, 6 dez. 2019.

SUDING, K. N. et al. Scaling environmental change through the community-level: a trait-based response-and-effect framework for plants. **Global Change Biology**, v. 14, n. 5, p. 1125–1140, maio 2008.

SUTER, M.; EDWARDS, P. J. Convergent succession of plant communities is linked to species' functional traits. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 15, n. 4, p. 217–225, ago. 2013.

SVEJCAR, L. N.; DAVIES, K. W.; RITCHIE, A. L. Ecological restoration in the age of apocalypse. **Global Change Biology**, v. 29, n. 17, p. 4706–4710, 13 set. 2023.

THE JAMOVI PROJECT. **JAMOVI**. SydneyThe jamovi project, , 2024.

VAN BREUGEL, M.; BONGERS, F.; MARTÍNEZ-RAMOS, M. Species Dynamics During Early Secondary Forest Succession: Recruitment, Mortality and Species Turnover. **Biotropica**, v. 39, n. 5, p. 610–619, 25 set. 2007.

WEI, J. et al. Drought alters aboveground biomass production efficiency: Insights from two European beech forests. **Science of The Total Environment**, v. 919, p. 170726, abr. 2024.

WESTOBY, M.; WRIGHT, I. J. Land-plant ecology on the basis of functional traits. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 21, n. 5, p. 261–268, maio 2006.

WILL, R. E. et al. Increased vapor pressure deficit due to higher temperature leads to greater transpiration and faster mortality during drought for tree seedlings common to the forest–grassland ecotone. **New Phytologist**, v. 200, n. 2, p. 366–374, 30 out. 2013.

WRIGHT, I. J.; CANNON, K. Relationships between leaf lifespan and structural defences in a low-nutrient, sclerophyll flora. **Functional Ecology**, v. 15, n. 3, p. 351–359, 20 jun. 2001.

ZABIN, C. J. et al. Increasing the resilience of ecological restoration to extreme climatic events. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 20, n. 5, p. 310–318, 15 jun. 2022.

ZHU, S.-D. et al. Leaf turgor loss point is correlated with drought tolerance and leaf carbon economics traits. **Tree Physiology**, v. 38, n. 5, p. 658–663, 1 maio 2018a.

ZHU, S.-D. et al. Drought tolerance traits predict survival ratio of native tree species planted in a subtropical degraded hilly area in South China. **Forest Ecology and Management**, v. 418, p. 41–46, jun. 2018b.