

CASSIANO JOSÉ LAGES MARINHO FALCÃO

**CRESCIMENTO DE *Eucalyptus* UTILIZANDO DENDRÔMETROS: EFEITOS
GENÉTICOS, AMBIENTAIS E DE MANEJO**

Botucatu

2023

CASSIANO JOSÉ LAGES MARINHO FALCÃO

**CRESCIMENTO DE *Eucalyptus* UTILIZANDO DENDRÔMETROS: EFEITOS
GENÉTICOS, AMBIENTAIS E DE MANEJO**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Ciência Florestal

Orientador(a): Otávio Camargo Campoe

Botucatu

2023

F178c

Falcão, Cassiano José Lages Marinho

Crescimento de eucalyptus utilizando dendrômetros : efeitos genéticos, ambientais e de manejo / Cassiano José Lages Marinho
Falcão. -- Botucatu, 2023

44 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Otávio Camargo Campoe

1. Ecofisiologia. 2. Dendrômetro. 3. Modelagem. 4. Eucalipto. I.
Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: CRESCIMENTO DE Eucalyptus UTILIZANDO DENDROMETROS:
EFEITOS GENÉTICOS, AMBIENTAIS E DE MANEJO

AUTOR: CASSIANO JOSÉ LAGES MARINHO FALCÃO

ORIENTADOR: OTÁVIO CAMARGO CAMPOE

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciência Florestal,
pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. OTÁVIO CAMARGO CAMPOE (Participação Virtual)
Ciencias Florestais / Universidade Federal de Lavras



Documento assinado digitalmente

OTAVIO CAMARGO CAMPOE

Data: 23/11/2023 13:44:39-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pesquisador Dr. TÚLIO BARROSO QUEIROZ (Participação Virtual)
. / Bracell



Documento assinado digitalmente

TULIO BARROSO QUEIROZ

Data: 23/11/2023 14:32:30-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a MAGALI RIBEIRO DA SILVA (Participação Virtual)

Ciencia Florestal, Solos e Ambiente / Faculdade de Ciencias Agronomicas de Botu



Documento assinado digitalmente

MAGALI RIBEIRO DA SILVA

Data: 23/11/2023 17:09:01-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Botucatu, 23 de novembro de 2023.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe e família, por todo o apoio, por todos estes anos. À minha sobrinha, por toda a alegria trazida.

Ao Professor Rodrigo, pela orientação durante o processo seletivo, e a Professora Magali, pelo voto de confiança (após aquele e-mail desastroso).

Ao professor Otávio Campoe, pela orientação e concepção desse projeto.

A todos os membros da república Bola 8, por todos os momentos em que aí estive.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal e aos vários Professores da Unesp Campus Botucatu pelo conhecimento transmitidos a mim nestes anos. A todos os professores e funcionários da FCA.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao Eucflux e Ipef, pelo financiamento da pesquisa e por tornarem possível este projeto.

Ao Juan, por todas as dúvidas respondidas e pelo auxílio concedido. Ao Sérgio, pelas ajudas em campo. A todos os pós-graduandos ligados ao Eucflux, pela companhia e auxílio. À Roberta, por toda a ajuda nestes dois anos e meio, é mais do que cabe aqui. A tantos outros amigos, pelas cervejas e risadas. Aos representantes da pós-graduação junto ao FCA, por me auxiliarem em todos os momentos em que precisei. À Professora Simone, por me animar quando achei que nada disto fosse dar certo. Saiu!.

Aos membros do laboratório do Promab, por toda a ajuda e acolhimento (duplamente ao Raul). A Fernanda e Josi, pelas contribuições imensas, sem vocês não sei o que teria sido deste trabalho.

A todos vocês e tantos outros, pela boa vontade que me foi dada de forma tão generosa.

Serei sempre, sempre grato.

RESUMO

Espécies do gênero *Eucalyptus* são as mais plantadas na silvicultura brasileira, e são frequentemente cultivadas em regiões que sofre estresses hídricos e térmicos. Como uma alternativa para amenizar os danos causados pelas alterações climáticas, os sistemas de manejo em talhadia vem sendo mais usados nos últimos anos, devido a maior resistência à seca no início do ciclo. Outra razão para seu uso é econômica, uma vez que seus custos são reduzidos. Visando proporcionar melhor tomada de decisão em escolha de material genético e sistema de manejo, o objetivo do trabalho foi comparar dois clones do gênero *Eucalyptus* em manejos em talhadia e alto fuste, e suas respostas às condições climáticas ao longo do tempo. O estudo foi realizado em área na qual o Programa Cooperativo sobre Produtividade e Fluxos de Carbono e Água em *Eucalyptus* (EUCFLUX) desenvolve pesquisas, localizadas em Itatinga – SP. O crescimento dos clones *E. urophylla* (clone 12) e *E. grandis x camaldulensis* (clone 16), foram avaliados dos 3 aos 4 anos por meio de dendrômetros digitais. Foram instalados 12 dendrômetros pontuais, 3 em cada combinação de clone e manejo, os quais coletavam dados do raio do fuste automaticamente a cada 15 minutos. Os dados meteorológicos foram coletados por uma torre de fluxo instalada no local, com resolução temporal de 30 minutos. Teores de água no solo foram medidos pelo horizonte do solo, a cada 30 minutos. Para avaliar os efeitos das variáveis ambientais no crescimento dos materiais genéticos usou-se modelos lineares generalizados, na escala de uma hora do tempo. Variáveis ambientais avaliadas foram hora do dia, temperatura, precipitação, DPV e teor de água no solo. Incrementos anuais se situaram entre 7,1 e 9,5 kg ano⁻¹. O clone 12 em manejo de alto fuste apresentou o maior crescimento entre os tratamentos, seguido pelo clone 12 em regime de talhadia. O clone 16 apresentou desempenho similar em ambos os sistemas de manejo. Houve correlação positiva apenas entre crescimento e teor de água no solo, as variáveis restantes não apresentaram correlação ou tiveram correlações negativas. O clone 12 apresentou maior variação do crescimento em relação a mudanças ambientais que o clone 16. Respostas a variações ambientais momentâneas foram encontradas, demonstrando as diferentes estratégias evolutivas dos materiais genéticos comparados.

Palavras-chave: ecofisiologia; dendrômetro; modelagem; eucalipto.

ABSTRACT

Species of the *Eucalyptus* genus are the most planted in Brazilian forestry, and are often cultivated in regions that suffer water and thermal stress. As an alternative to mitigate the data caused by climate change, coppice management systems have been more used in recent years, due to their reduced costs and greater resistance to drought at the beginning of planting. Therefore, the objective of the work was to compare two clones of the genus *Eucalyptus* in coppice and tall bole management, and their responses to climatic conditions over time. The study was carried out in a plantation belonging to the Cooperative Program on Productivity and Carbon and Water Flows in *Eucalyptus* (EUCFLUX), located in Botucatu – SP. The growth of clones *E. urophylla* (clone 12) and *E. grandis* x *camaldulensis* (clone 16) were evaluated from 3 to 4 years old using digital dendrometers. 12 point dendrometers were installed, 3 in each clone and management combination, which collected data on the stem radius automatically every 15 minutes. Meteorological data were collected by a flow tower installed at the site, with a temporal resolution of 30 minutes. Soil water content (AS) was measured by the soil horizon every 30 minutes. To evaluate the effects of environmental variables on the growth of genetic materials, generalized linear models (GLM) were used, on a one-hour time scale. Environmental variables evaluated were time of day, temperature, precipitation, DPV and soil water content. Annual increments are between 7.1 and 9.5 kg year⁻¹. Clone 12 under high-stem management showed the highest performance among the treatments, followed by clone 12 under coppice management. Clone 16 showed similar performance in both management systems. A positive correlation was found only between growth and soil water content, with the remaining variables showing no correlation or negative correlations. Clone 12 showed greater variation in growth in relation to environmental changes than clone 16. Responses to momentary environmental variations were found, demonstrating morphological distinctions between the genetic materials compared.

Keywords: ecophysiology; dendrometers; modeling; eucalyptus.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1	Estresses hídrico e térmico.....	15
2.2	Sistemas de manejo.....	17
2.3	Dendrômetros de precisão.....	18
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1	Descrição da área e delineamento experimental.....	20
3.2	Dendrômetros automáticos.....	21
3.3	Dados meteorológicos.....	23
3.4	Estoque de água no solo.....	24
3.5	Análise Estatística.....	24
4	RESULTADOS.....	25
4.1	Crescimento em biomassa do fuste.....	25
4.2	Variação de biomassa ao longo do dia.....	25
4.3	Temperatura.....	28
4.4	Déficit de pressão de vapor (DPV).....	30
4.5	Teor de água no solo.....	31
5	DISCUSSÃO.....	34
6	CONCLUSÕES.....	37
	REFERÊNCIAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

No Brasil existem aproximadamente 9,5 milhões de hectares de plantações florestais, sendo que, 7,5 milhões de hectares são cultivados com as espécies de *Eucalyptus* (Iba, 2022). Os plantios de *Eucalyptus* no Brasil são classificados como o mais produtivo do mundo, ocupando uma área de 7,5 milhões de hectares (IBÁ, 2022). O rápido crescimento do *Eucalyptus* no Brasil é resultado de décadas de melhoramento genético e de sua adaptação às diferentes condições edafoclimáticas (Hakamada et al., 2020). Permitindo que o gênero seja cultivado em diversas regiões do Brasil abrangendo climas que variam entre tropical e subtropical úmido (Álvares et al., 2013) e temperaturas médias mensais entre 13 °C e 33 °C (Queiroz et al., 2020).

Dentre os fatores climáticos, a temperatura e disponibilidade de água estão entre as principais variáveis que influenciam o crescimento das árvores e os processos fisiológicos (Hatfield e Prueger, 2015; Rowland et al., 2014). Fatoque tem despertado nos silvicultores a preocupação sobre como a expansão das fronteiras florestais brasileiras a regiões previamente inexploradas e mais suscetíveis a secas podem impactar a produtividade e sobrevivência das árvores (Buschinelli e Costa, 2020; Oliveira, Paz e Silveira, 2021). Além disso, os modelos atuais predizem que até o fim do século 21 a temperatura média no Brasil aumentará entre 1 °C e 4 °C, acompanhada por estações secas mais intensas e períodos chuvosos mais curtos (IPCC, 2014), já que maiores temperaturas elevam a severidade de estresses hídricos, comprometendo ainda os plantios situados em regiões de baixa disponibilidade hídrica (Taiz e Zeiger, 2006).

Para amenizar o efeito dos períodos de seca no crescimento do *Eucalyptus*, algumas práticas de manejo estão sendo adotadas, como por exemplo, o uso de sistemas de talhadia, pois a árvore pode se beneficiar do sistema radicular já existente e bem desenvolvido sobretudo nos primeiros anos de cultivo (Gonçalves et al., 2014; Godoi, 2020). A presença de raízes finas em maiores densidades eleva a quantidade de água disponível para as plantas (Ferchaud et al., 2015), fazendo com que a talhadia seja uma das possíveis estratégias para elevar a produtividade dos plantios do gênero.

Outra vantagem dos sistemas radiculares preexistentes em sistemas de talhadia é a capacidade que estes possuem de acessar água a maiores profundidades e distâncias da árvore (Christina et al., 2016). A capacidade das cepas de acessar reservas de água mais estáveis em horizontes inferiores e mais facilmente adequar o lançamento de raízes finas às condições do solo faz com que seu uso seja comum em áreas com menor disponibilidade hídrica (Xavier et al., 2012; McCormack et al., 2015). O desempenho da talhadia depende, entretanto, de cuidados especiais tomados durante a colheita e sua principal vantagem permanece sendo o maior desempenho no início do ciclo em períodos de baixa precipitação..

Com isso, a análise do crescimento de plantios florestais em relação a variáveis climáticas demanda um acompanhamento detalhado das variações de volume do fuste com alta resolução temporal (Campoe, 2016). O uso de dendrômetros nestas ocasiões evita os erros decorrentes de medições manuais em maior frequência (Alvares, 2017). O detalhamento temporal do crescimento em escala de árvore, somado aos dados fornecidos pela torre de fluxo, pode auxiliar a compreender minuciosamente o comportamento de crescimento da floresta sob pequenas variações ambientais e climáticas.

Porém a maioria dos estudos avaliando o crescimento de plantios de *Eucalyptus* sob diferentes condições ambientais, é encontrado na literatura apenas em escalas anuais (Stape et al., 2008, Campoe et al., 2020). Dessa forma, o presente trabalho objetivou avaliar o crescimento de um clone produtivo e outro tolerante a seca sob manejo em alto fuste e talhadia, e suas respostas a variações climáticas no intervalo de uma hora, entre 3 e 4 anos.

Para atender ao objetivo do trabalho, foram testadas as seguintes hipóteses:

- (1) O clone 12 apresentará maior crescimento que o clone 16.
- (2) O sistema de manejo em alto fuste apresentará maior crescimento que o de talhadia.
- (3) Haverá influência distinta de fatores ambientais sobre o crescimento dos materiais genéticos e sistemas de manejo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Estresses hídrico e térmico

Estresses ambientais são fatores externos que afetam negativamente as plantas, podendo ser bióticos ou abióticos (Taiz e Zeiger, 2006). Os efeitos que estes causam dependem da interação entre estresse e planta e características como estágio de desenvolvimento, condições iniciais e tolerância influenciam os sintomas apresentados tanto quanto o meio (Barnabàs et al., 2007). Todos os fatores ambientais podem causar estresse em plantas, dependendo apenas de sua intensidade e tempo de exposição (Mareri, Parrotta e Cai, 2022).

Dentre as possíveis fontes de estresse, a seca é a mais presente em culturas agrícolas e florestais no mundo, e é considerada um dos maiores fatores limitantes de produções agrícolas (Farooq et al., 2012). Frequentemente associada com a falta de água, altas temperaturas têm ganhado importância nas últimas décadas pelo impacto que causam a culturas (Porter, 2005; Tester e Bacic, 2005). Em conjunto, altas temperaturas e estresse hídrico causam mais danos a plantas pelo mundo que qualquer fator ambiental, e ambos tem crescido em frequência e intensidade, devido às mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global (Larkindale, Mishkind e Vierling, 2005).

A seca diretamente causa alterações morfológicas sobre as plantas, além de induzir a ativação de diversos mecanismos de tolerância que permitam sua sobrevivência. (Barnabàs et al., 2007; Fahad et al., 2017). O primeiro impacto da falta de água sobre plantas é a reduzida germinação de sementes (Kaya et al., 2006). Crescimento e enraizamento inicial, assim como sobrevivência, também são negativamente impactados (Fahad et al., 2017). O crescimento é afetado principalmente pela perda de turgor, resultante da perda de pressão hídrica que ocorre principalmente nas folhas durante secas (Taiz e Zeiger, 2006). Perturbações na taxa fotossintética e alocação de carbono também reduzem a produtividade (Flexas et al., 2004). Os mecanismos de adaptação à seca incluem alterações no número e dimensões de folhas, aprofundamento do sistema radicular e acúmulo de carboidratos e aminoácidos (Rennenberg et al., 2006).

Altas temperaturas perturbam os processos de absorção e liberação de carbono – taxas fotossintéticas caem enquanto a respiração se intensifica, afetando

intensamente os ganhos de biomassa e produtividade econômica (Taiz e Zeiger, 2006). Temperaturas acima de 35 °C afetam severamente a atividade da enzima Rubisco, limitando a fotossíntese (Griffin ET AL., 2004). Outra barreira à absorção de carbono sob calor intenso é o fechamento dos estômatos, que visa reduzir perdas de água a atmosfera. Huan et al. (2012) concluíram que o estresse térmico reduz o crescimento do sistema radicular em porte e número de raízes, comprometendo o acesso de plantas à água.

Relatos do crescimento de eucaliptos no Brasil sob diferentes condições climáticas são extensos. O projeto TECHS (*Tolerância de Eucalyptus Clonais aos Estresses Hídrico, Térmico e Bióticos*), ao analisar acompanhamentos de crescimento em plantios experimentais pelo Brasil e Uruguai, observou que o gênero responde melhor a temperaturas médias anuais de 20 °C, apresentando quedas moderadas até 16 °C e decrescendo rapidamente acima de 24 °C (Binkley et al., 2020). Stape et al., (2004) concluíram que, para cada 100mm de precipitação anual, o incremento anual de *E. grandis* x *E. urophylla* aumenta em 2.3Mg ha⁻¹, constatando também que a eficiência do uso da água pelo clone decresce junto com a disponibilidade de água no sítio. Queiroz et al. (2020), também trabalhando com áreas do TECHS, encontrou valores mínimos e máximos de 7 °C e 31 °C para crescimento de sete genótipos do gênero, usando dados mensais.

Entre 1980 e 2012, temperaturas médias globais cresceram 0,85 °C, e espera-se que elas continuem a aumentar a uma taxa de 0,2 °C por década. No Brasil, estima-se que temperaturas médias aumentem entre 1 °C e 5 °C até o fim do século. Estima-se também um aumento na sazonalidade de temperaturas e precipitações, com períodos de seca mais extensos e estações chuvosas mais curtas (IPCC, 2014).

Mortalidades de ecossistemas florestais em larga escala já vem ocorrendo em função das mudanças climáticas (Allen et al., 2009). Rolim et al., (2004) detectaram reduções de biomassa em florestas nativas não perturbadas no sudeste brasileiro, em decorrência de mortalidades causadas pelo El Niño, e Williamson et al., (2000) reportaram um aumento de 70% causado pela seca do El Niño entre 1997 e 1998, considerada a mais forte do século. Fenômenos semelhantes têm acontecido em outras partes do globo, e espera-se que se tornem mais comuns durante o século 21 (Allen et al., 2009).

2.2 Sistemas de manejo

O sistema em alto fuste se tornou o mais usado no Brasil por volta dos anos 70. Caracterizado pelo plantio de novos indivíduos a cada ciclo da cultura, sua principal vantagem é aproveitar os rápidos avanços do melhoramento genético, permitindo o uso de clones mais produtivos a cada colheita (Ribeiro et al., 2001). À medida que avanços no melhoramento genético desaceleraram e a eucaliptocultura brasileira alcançou um “plateau” em termos de produtividade, o uso do manejo em alto fuste voltou a ser questionado (Gonçalves et al., 2014). O manejo em alto fuste não é sem desvantagens. Operações de implantação, preparo de solo e produção de mudas em viveiro são atividades onerosas e áreas replantadas precisam também erradicar as brotações, que competem fortemente com as mudas recém-plantadas (Forrester et al., 2012).

Já a talhadia simples é um sistema silvicultural caracterizado pela condução das brotações das gemas adventícias remanescentes em cepas (Stape, 1997). Desde a introdução da eucaliptocultura no Brasil, no início do século XX, a técnica era usada no manejo da cultura, dada a concepção de que plantios do gênero eram adaptados a sítios de baixa qualidade e pouco respondiam ao uso de tecnologia no manejo (Gonçalves et al., 2014; Stape, 1997). A talhadia ainda era comum entre as décadas de 70 e 80, antes de perder relevância devido aos rápidos avanços em melhoramento genético (Ferrari et al., 2004).

A evolução das técnicas de melhoramento não foi o único motivo por trás da despopularização da talhadia. Condições edafoclimáticas distintas e métodos diversos de colheita e condução faziam com que a segunda rotação apresentasse altas variações em produtividade (Gonçalves et al., 2014). Em conjunto com as falhas causadas por danificação de cepas durante a colheita, estes fatores fizeram com que a reforma fosse mais recomendada na maioria das áreas, e sistemas de talhadia passaram a ser recomendados com base na ocorrência de secas no sítio (Ferraz Filho e Scolforo, 2013).

da Silva et al. (2020) compararam o crescimento de híbridos de *E. urophylla* na primeira e segunda rotação, concluindo não só que a esperada redução de incremento após o primeiro corte é corrigível aplicando adubação pós-colheita, como também que a eficiência no uso de nutrientes é maior no segundo ciclo, assim como a produtividade.

Em contraste, Drake et al. (2011) encontraram reduzida eficiência do uso de água na segunda rotação em relação a primeira, ao examinar clones de *E. globulus* na Austrália. Enquanto diferenças no desempenho podem ser atribuídas ao material genético ou condições edafoclimáticas, o período de espera antes da seleção de uma única brotação por cepa foi de dois anos, significativamente maior que o praticado em plantios no Brasil, indicando um possível impacto do manejo das cepas sobre seu desempenho.

Germon et al. (2019) analisaram o crescimento de raízes finas em *E. grandis*, e encontraram não só mortalidades extremamente baixas como também crescimento de raízes secundárias em profundidades superiores a 13 metros. Raízes finas, com diâmetros abaixo de 2 mm, são grandemente influenciadas por fatores edáficos e metabólicos, e sua presença nas camadas mais profundas do solo é estratégica para a sobrevivência e desenvolvimento de plantas sob condições de estresse hídrico (Germon et al., 2020; Thorup-Kristensen et al., 2020).

2.3 Dendrômetros de precisão

O crescimento de florestas é normalmente acompanhado através de medições manuais regulares usando fita métrica ou suta, cujas frequências costumam variar de semestrais a bianuais. Estudos que buscam avaliar o desempenho de espécies florestais em estações úmidas e secas, entretanto, demandam maior frequência nas medições de diâmetro (Alves et al., 2013).

Medições manuais, quando realizadas em alta frequência, começam a apresentar limitações que comprometem a qualidade e confiabilidade dos dados obtidos. Realizar todas as medições com o mesmo técnico ou equipe é frequentemente impraticável, e as trocas de operador geram diferenças no uso dos instrumentos de mensuração (Cattellino et al., 1986). Os próprios equipamentos usados sofrem desgastes e trocas durante acompanhamentos intensos e principalmente, a precisão das observações manuais depende da posição do equipamento no fuste da árvore, que não será mantida com exatidão entre medições. Quando se consideram os menores incrementos observados entre curtos intervalos de tempo, estas fontes de imprecisão passam a comprometer a representatividade dos resultados (Alvares et al., 2017; Clark et al., 2000).

Dendrômetros são equipamentos usados para medir o crescimento em diâmetro ou raio do fuste de árvores. Ao serem instalados em um ponto do tronco e nele permanecerem por todo o período de acompanhamento, eles evitam as fontes de incerteza de medições manuais e permitem que dados sejam coletados pela simples leitura do equipamento (Breitsprecher e Hughes, 1975). Dendrômetros podem medir a circunferência do tronco ou seu raio (Figueiredo Filho et al., 2003).

O desenvolvimento recente de dendrômetros automáticos de alta resolução e frequência sub horária amplia as possibilidades de pesquisas em crescimento de árvores e sua relação com fatores externos e internos (HERRMANN et al., 2016). A esta escala, variações no raio ou perímetro do fuste devem-se tanto a mudanças temporárias no conteúdo de água da planta ao longo do dia, quanto ao crescimento irreversível ao longo do caule, visível ao comparar os picos radiais e perimetrais ao longo dos dias (Steppe et al., 2015; Sheil, 2003). A separação destes dois processos é facilitada por pacotes estatísticos de livre acesso que fornecem uma base matemática para o processamento e compreensão destes dados de forma comparável e padronizada (van der Maaten et al., 2016).

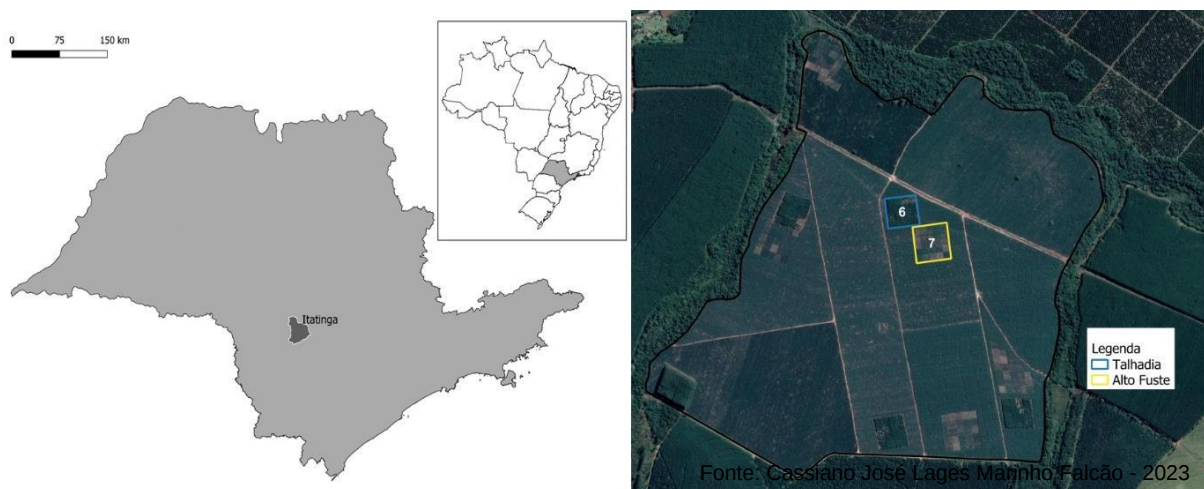
A análise de dados em alta resolução temporal fornecida por dendrômetros permite observar respostas imediatas da árvore a variações ambientais, comparando o comportamento de árvores individuais através de um espectro de temperaturas, horas do dia etc.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área e delineamento experimental

O estudo foi realizado na área experimental do projeto Eucflux (Fluxos de Carbono e Água em Eucalipto, <https://www.ipef.br/eucflux2/>) localizada na fazenda Americana, no município de Itatinga-SP (23.1° S, 48.6° W) (Figura 1). O município de Itatinga possui clima mesotérmico úmido (Cwa), temperatura média de 19,3 °C, precipitação anual de 1350mm, elevação de 760m e relevo suave ondulado (ALVARES et al., 2013). O solo nas parcelas experimentais estudadas é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico Típico (LVd4), com textura média arenosa e horizonte A moderado (SBARDELLA, 2020).

Figura 1 - Localização da área de estudo no município de Itatinga – SP e disposição dos talhões estudados.



A colheita da rotação anterior à avaliada neste estudo foi feita entre maio e junho de 2018, sendo usados Feller Bunchers para derrubada, Garras Traçadoras sob esteira para processamento e Forwarders Ponsse Buffalo para arraste. O cultivo mínimo foi adotado na área experimental, mantendo resíduos de colheita sobre a área. A calagem foi realizada 3 meses antes do plantio, com aplicação de 3 t ha⁻¹ de calcário dolomítico.

O preparo de solo consistiu na subsolagem na linha de plantio com profundidade de 50 cm. O plantio foi realizado manualmente, em novembro de 2018,

seguindo espaçamento 3m x 2m, densidade de 1667 árvores ha⁻¹. O replantio foi conduzido entre 20 e 30 dias após o plantio. As atividades de preparo de solo, plantio, replantio e adubação de base foram realizadas apenas no manejo em alto fuste.

A adubação de base consistiu na aplicação de 300 kg ha⁻¹ de NPK (60:30:10) + 2,0%S + 0,5%B + 0,5%Zn + 0,5%Cu. As adubações de cobertura foram realizadas 4 e 8 meses após o plantio, com 400 kg ha⁻¹ de NPK (16:00:12) + 0,5%B + 0,6%Zn + 12%S e 400 kg ha⁻¹ de NPK (00:0:51) + 1,5%B + 0,0%Zn + 0,0%Cu + 0,0%S, respectivamente. O controle de formigas foi realizado sempre que necessário utilizando isca formicida a base de Sulfluramida, em dosagem de 2 kg ha⁻¹. Controle de daninhas empregou herbicida pré emergente (0,07 kg ha⁻¹) e Flumyazin (0,08 kg ha⁻¹).

Os clones estudados neste trabalho são o clone 12 caracterizado pelo seu rápido crescimento, alta produtividade e plasticidade sendo o clone mais plantado no Brasil na atualidade, enquanto o clone 16 é conhecido por sua resistência à seca (Campoe et al., 2020; Le Maire et al., 2019). Ambos os clones foram implantados sob sistemas de alto fuste e talhadia. As parcelas em sistema de talhadia se encontram no bloco 6 e as parcelas em alto fuste no bloco 7 (Figura 1). Dessa forma o presente trabalho foi desenvolvido em delineamento fatorial 2 x 2, em que o primeiro fator representa os dois clones estudados (12 e 16) e o segundo os dois sistemas de manejo (talhadia e alto fuste), sendo utilizada três repetições, totalizando 12 árvores estudadas.

3.2 Dendrômetros automáticos

Para acompanhar o crescimento em diâmetro das árvores ao longo do tempo foram utilizados dendrômetros radiais automáticos Tomst (Tomst, 2019), com precisão de 1 µm de raio (Figura 2). Seu parafuso central fixa o equipamento ao tronco enquanto o sensor na extremidade superior mede variações radiais do fuste, que são registradas automaticamente a cada meia hora. Foram instalados 12 dendrômetros no teste de genótipos, 6 por sistema de manejo e 3 por material genético em cada manejo. Em cada parcela foram traçadas 3 classes diamétricas, com um dendrômetro instalado por classe.

Figura 2 – Dendrômetro automático Tomst



Fonte: Cassiano José Lages Marinho Falcão - 2023

Os dendrômetros mediram variações no raio do fuste a cada 15 minutos, durante o período de um ano. Todos os dendrômetros foram instalados em dezembro de 2021 e passaram por um mês de aclimação do fuste e casca ao equipamento. A coleta de dados válida para análises foi no período de janeiro de 2022 a janeiro de 2023. O plantio tinha 4 anos de idade no início das medições. Em 10 de agosto de 2022 os dendrômetros foram reinstalados em outros indivíduos na mesma parcela, seguindo-se um segundo período de aclimação que durou até 10 de setembro, criando dois períodos de medição durante o ano.

Os dendrômetros automáticos retornam valores em números digitais, convertidos a variações em raio a partir da fórmula fornecida pelo fabricante (Equação 1:

$$Dr = (Nd - 1279) * \left[\frac{8890}{(34000 - 1279)} \right] \quad \text{Equação (1)}$$

Em que:

Dr: variação do raio do fuste em micromilímetros

Nd: número digital

A variação de raio, junto com os diâmetros iniciais e finais de medição, permite obter a variação de diâmetro ao longo do tempo. Para converter os valores de diâmetros obtidos pelo dendrômetros para biomassa, foram utilizados modelos exponenciais (Equação 2) e parâmetros biométricos ajustados (Tabela 2). Parâmetros biométricos foram criados a partir de dados provenientes de inventários tradicionais conduzidos na área durante o segundo ciclo de plantio.

$$B = a * DAP^b \quad \text{Equação (2)}$$

Em que:

B: Biomassa em kg

a e *b*: Parâmetros da equação

DAP: Diâmetro à altura do peito

Tabela 2 – Parâmetros usados nas equações biométricas

Genótipo	Manejo	a	b
12	Alto Fuste	0,17526541	2,158628769
12	Talhadia	0,058865394	2,644064881
16	Alto Fuste	0,230391615	2,015423008
16	Talhadia	0,05953756	2,672314571

Para a modelagem e alguns dos gráficos foram excluídas variações de biomassa igual a zero, dada a presença destas em intensidade disruptiva e o fato de apenas representarem períodos de inatividade da planta.

3.3 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram coletados, em intervalos de 30 minutos, durante todo o ano, a partir de uma estação climatológica instalada na área de estudo. As variáveis obtidas foram: temperatura média (°C), umidade relativa do ar (%) e precipitação pluviométrica (mm). Um sistema de aquisição de dados foi usado para facilitar a aquisição dos dados (datalogger CR1000, Campbell Scientific, Logan, Utah, EUA). Déficit de pressão de vapor (DPV) foi calculado a partir da umidade e temperatura médias, conforme proposto por Tetens (ALVARENGA et al., 2014).

3.4 Estoque de água no solo

O conteúdo de água no solo foi medido indiretamente pelo método *time domain reflectometry* (TDR), baseado na velocidade de pulsos eletromagnéticos através do solo, a qual é fortemente influenciada pelo seu conteúdo de água. A área experimental conta com TDRs Campbell modelo CS616, instalados a 0.15, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 metros de profundidade, gerando médias de teor de água no solo para toda a área experimental. Foi usado o conteúdo médio de água nos dois primeiros metros de solo, visto essa ser a faixa que apresentou variações consideráveis durante o ano.

3.5 Análise Estatística

Os efeitos de clone, manejo e fatores ambientais sobre o crescimento foram analisados a partir da modelagem do crescimento, usando modelos lineares generalizados (GLM). Foram construídos modelos globais para os dados originais em escala de 15 minutos, e para dados agregados a intervalos de 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 6 horas, 12 horas e 24 horas. O modelo para o intervalo de 1 hora mostrou melhor desempenho na variação de biomassa em função das variações climáticas, dessa forma foi o modelo adotado para o trabalho.

O modelo global foi construído no formato $Y \sim \text{clone} * \text{manejo} + \text{temperatura} + \text{precipitação} + \text{água no solo} + \text{DPV} + \text{hora do dia} + (1|\text{passo})$. “Passo” foi incluída como variável aleatória do modelo, para controlar a dependência temporal da análise dos dados, e expressa a numeração de cada intervalo de tempo ao longo do ano.

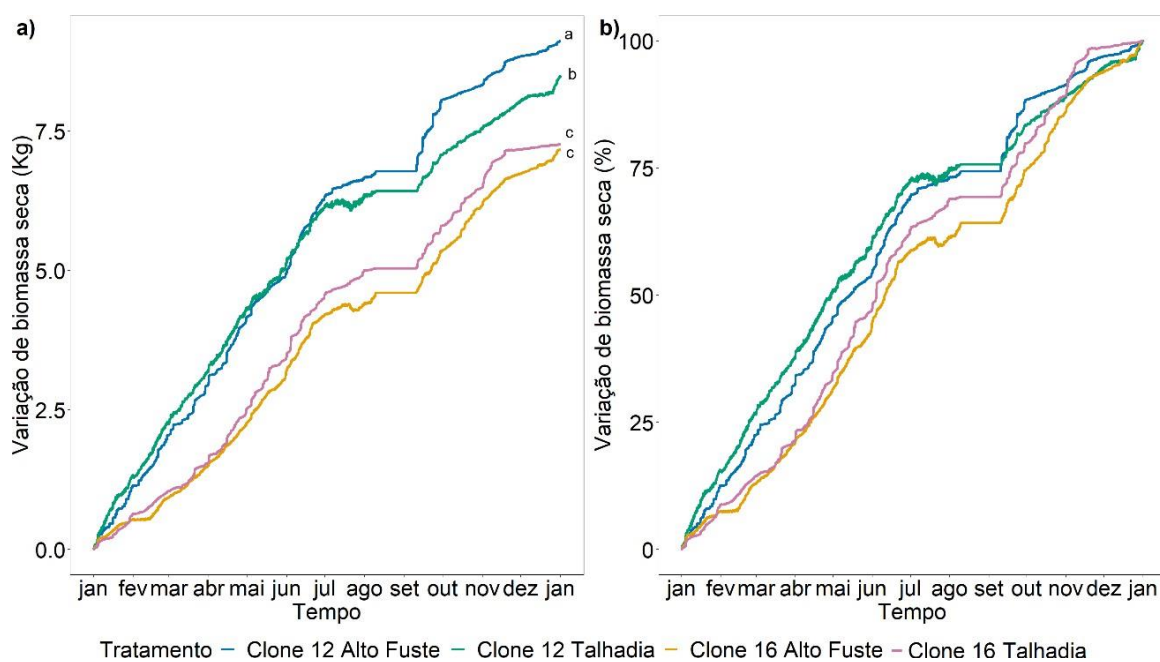
A partir deste modelo global, obtivemos todos os submodelos com combinações de variáveis não correlacionadas ($r < |0,6|$) utilizando a função *dredge* do pacote MuMIN (Bartón, 2020). A seleção dos melhores modelos foi feita utilizando a medida AICc (Second-order Akaike Information Criterion), proposta por Arcanjo (2022). As influências de variáveis categóricas (manejo e clone) foram validadas a partir da análise de variância ANOVA, e quando o teste F ($p=5\%$) foi significativo, comparamos médias com o Teste Tukey ($p=5\%$). Todas as análises foram realizadas no programa estatístico R.

4 RESULTADOS

4.1 Crescimento em biomassa do fuste

Os maiores valores de biomassa foram encontrados para o clone 12 no manejo em alto fuste (9,1 kg/ano), seguido pelo mesmo clone sob manejo em talhadia (8,5 kg/ano). Enquanto os valores de biomassa para o clone 16 foram de 7,1 kg/ano para o alto fuste e 7,2 kg/ano para a talhadia (Figura 4).

Figura 4 – Incrementos em biomassa absoluto (a) e relativo (b) obtidos pela leitura do dendrômetro ao longo do ano, em plantações dos clones 16 e 12, sob manejos de talhadia e alto fuste, de 3 a 4 anos de idade. Letras diferentes indicam diferença entre tratamentos



Fonte: Cassiano José Lades Marinho Falcão - 2023

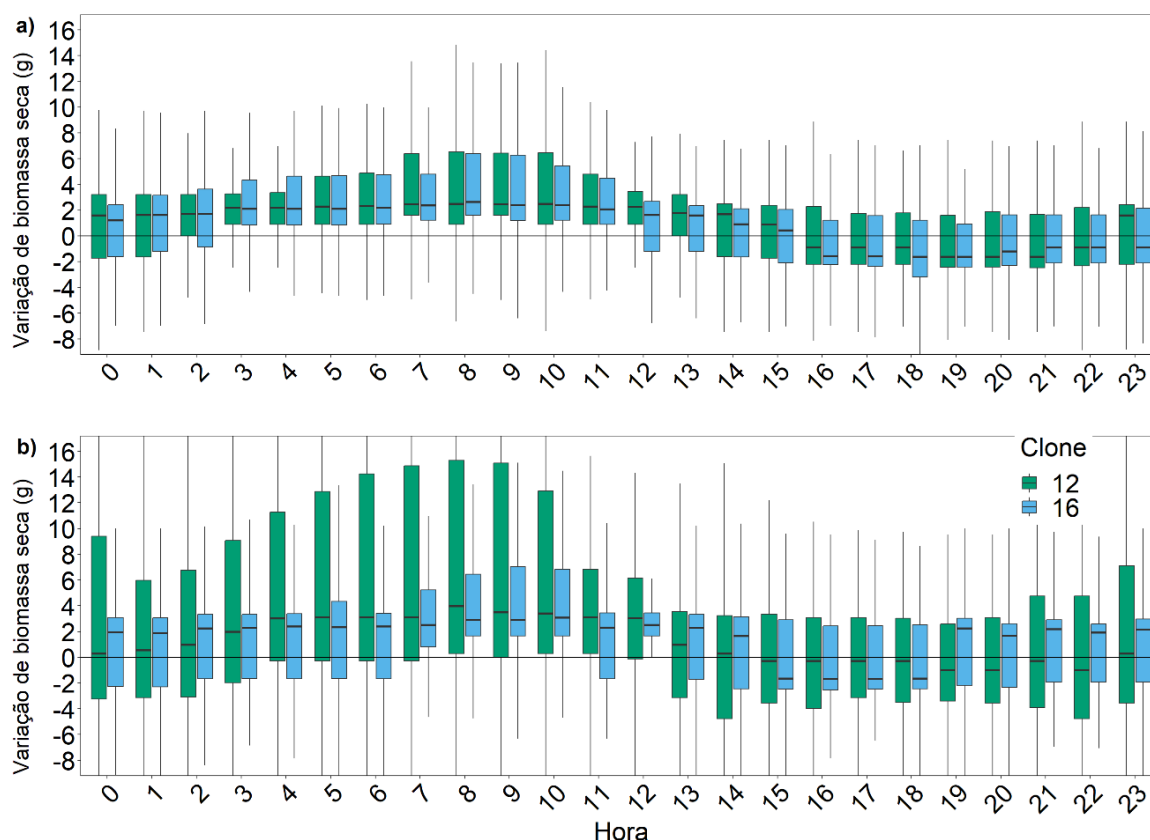
Já em relação ao crescimento relativo, nota-se comportamento similar ao absoluto no período entre março e setembro, onde o clone 12 apresentou os maiores incrementos (Figura 4b). No entanto, a partir de novembro verifica-se um menor incremento de crescimento entre os tratamentos.

4.2 Variação da biomassa ao longo do dia

Os clones e os sistemas de manejo apresentaram padrões diferentes não só no que se refere a seus valores medianos, como também na amplitude de variação

em torno destes (Figura 5). O clone 12, sob manejo em talhadia, apresenta amplitude de 15 g entre o primeiro e terceiro quartis, comparado aos 5 g de amplitude máxima para o clone 16 no mesmo manejo. Além disso, menores amplitudes no crescimento em biomassa foram verificadas para o manejo em alto fuste em relação a talhadia independentemente do clone (Figura 5). Apesar das diferenças entre amplitudes, as medianas são próximas entre os clones.

Figura 5 – Variações de biomassa ao longo do dia, excluindo períodos de inatividade, obtidas pela leitura do dendrômetro, em plantações dos clones 16 e 12, sob manejos de alto fuste (a) e talhadia (b), de 3 a 4 anos de idade.

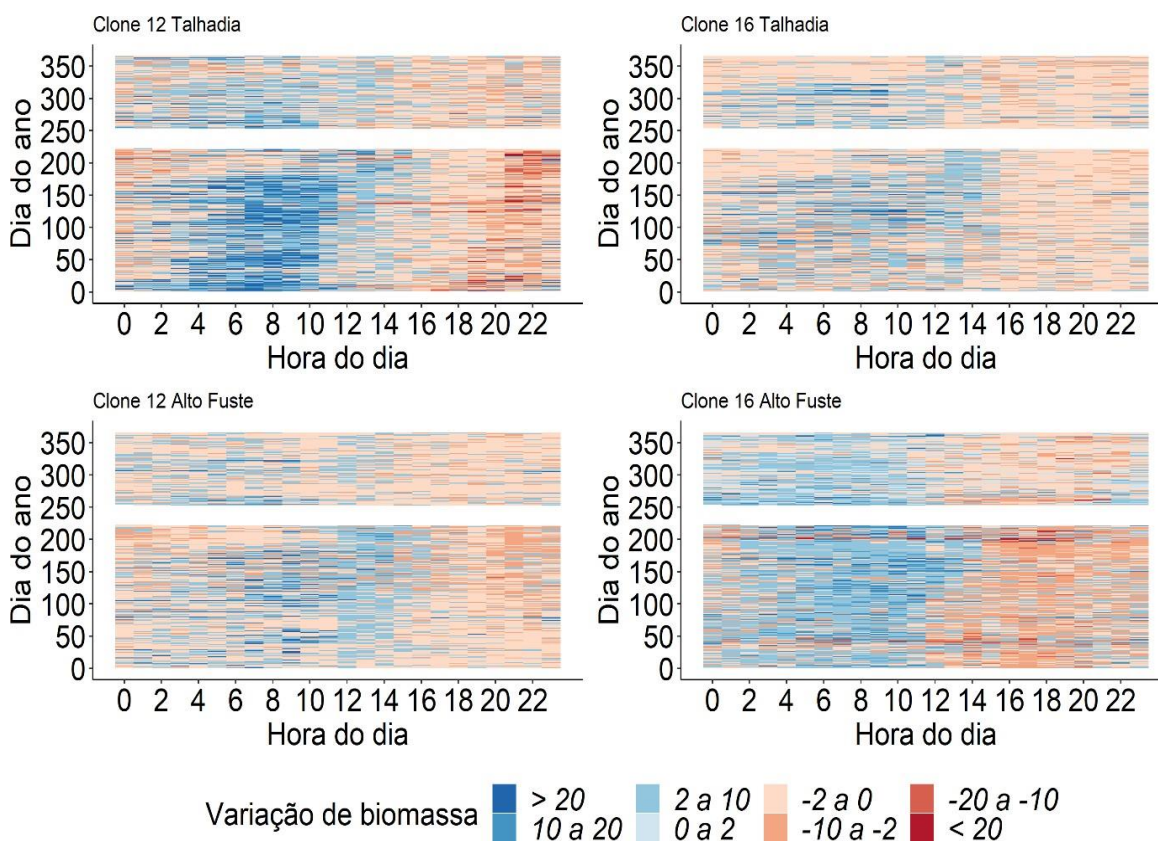


Fonte: Cassiano José Lages Marinho Falcão - 2023

O período de maior crescimento para todos os tratamentos foi durante a manhã, especificamente entre 6 e 10 horas (Figuras 5b e 7). O modo como cada clone interage com os sistemas de manejo é variável, no qual o clone 12 em manejo de talhadia e o clone 16 em manejo de alto fuste apresentam crescimentos mais intensos em períodos de condições ambientais

ótimas, ou seja, durante a manhã (Figura 6). Porém, este padrão não é verificado quando o clone 12 é manejado em sistema de alto fuste e o 16 em talhadia.

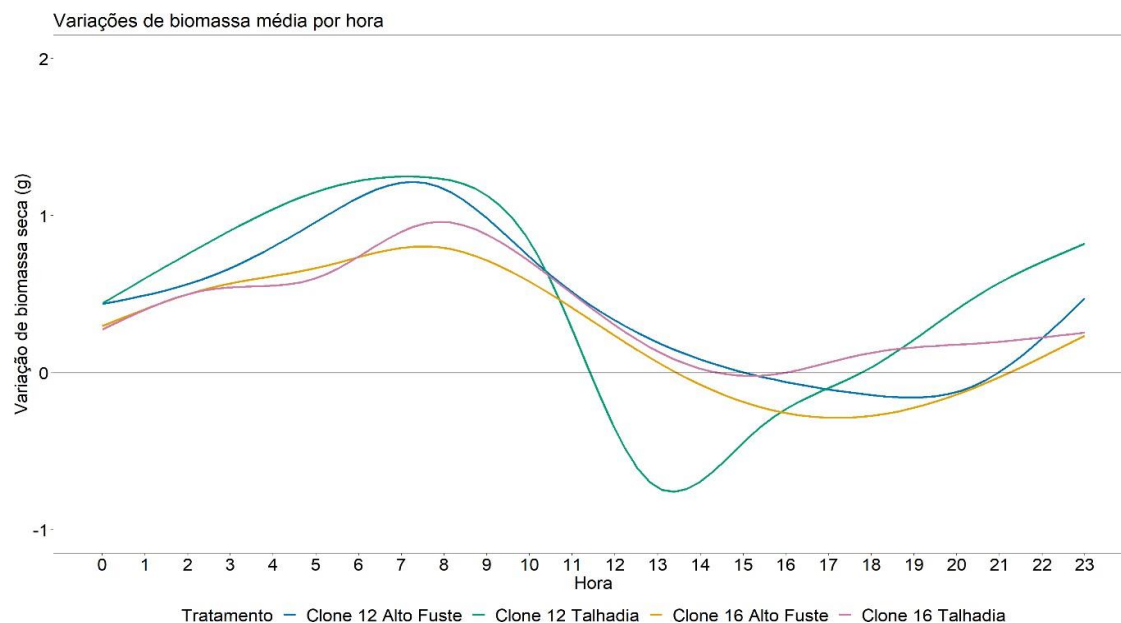
Figura 6 – Variações médias de biomassa para cada hora ao longo do ano, obtidas pela leitura do dendrômetro, em plantações dos clones 16 e 12, sob manejos de talhadia e alto fuste, de 3 a 4 anos de idade



Fonte: Cassiano José Lages Marinho Falcão - 2023

O tratamento com saldo positivo de crescimento mais longo é o clone 16 talhadia, que mantém média positiva em variação de biomassa por 22 horas e 30 minutos consecutivas (Figura 7). Este mesmo clone quando cultivado em alto fuste, apresenta somente 16 horas consecutivas de saldo positivo. Para o clone 12, há pequena variação entre os manejos, sendo mantidas médias positivas na variação de biomassa por 18h no alto fuste e 19h na talhadia. (verificar os valores, pois fiz mais ou menos).

Figura 7 – Variações médias de biomassa ao longo do dia, incluindo períodos de inatividade obtidas pela leitura do dendrômetro, em plantações dos clones 16 e 12, sob manejos de talhadia e alto fuste, de 3 a 4 anos de idade.

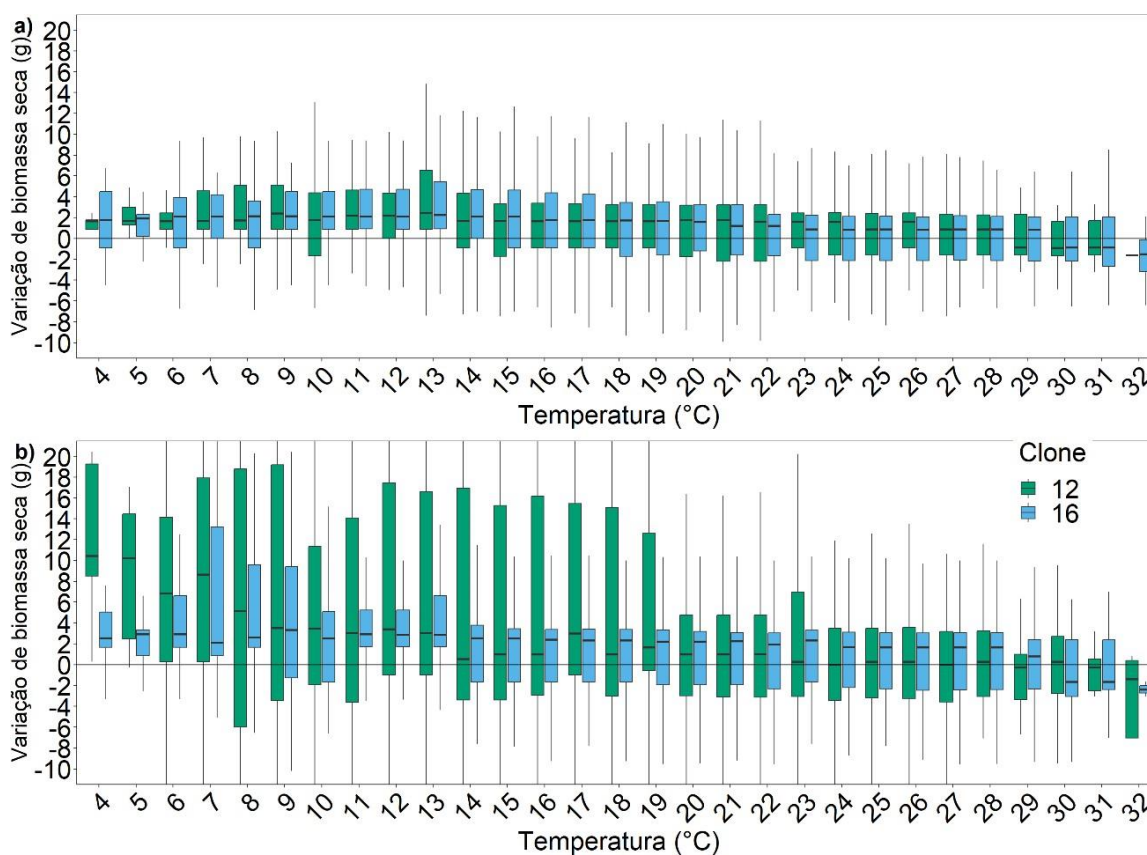


Fonte: Cassiano José Lages Marinho Falcão - 2023

4.3 Temperatura

O clone 12 é mais afetado por temperaturas que o clone 16, apresentando medianas inferiores a este a partir de 30°C em regime de alto fuste e 20°C em regime de talhadia (Figura 8). Respostas de crescimento a variações de temperatura são maiores em manejo de talhadia quando comparado a alto fuste. Porém, nos dois sistemas de manejo, as variações medianas de biomassa passam a ser negativas a partir dos 30°C (31°C para o clone 12 em manejo de talhadia).

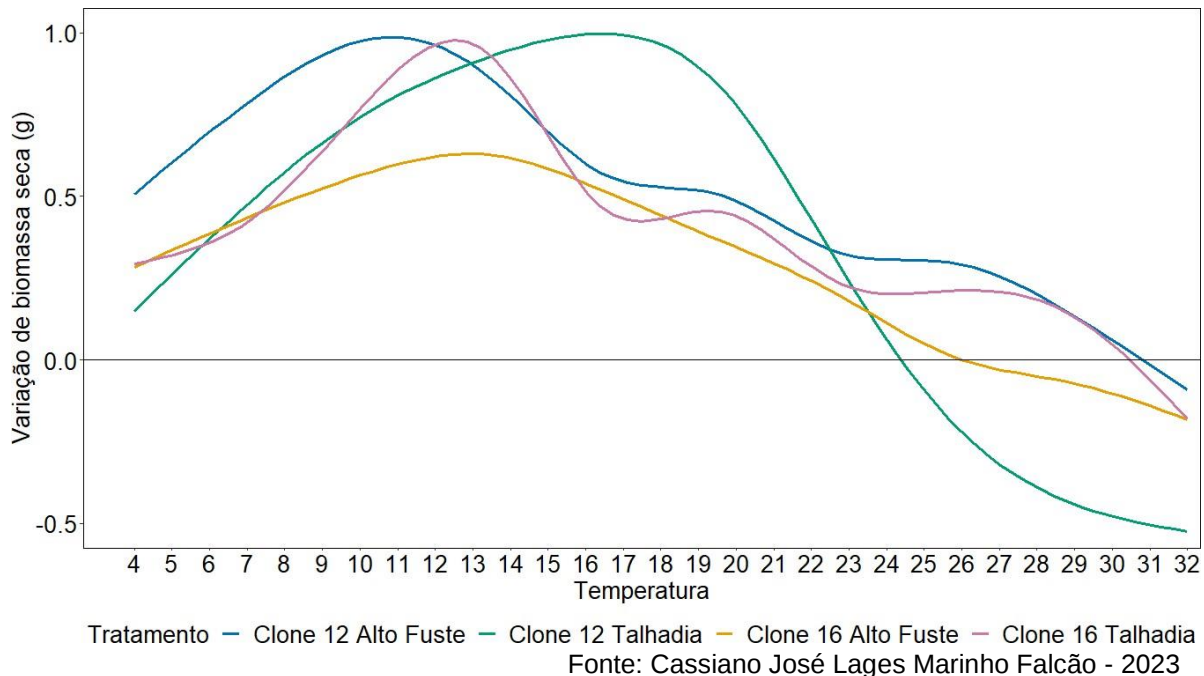
Figura 8 – Variações de biomassa, obtidas pela leitura do dendrômetro, em função da temperatura em plantações dos clones 16 e 12, sob manejos de altofuste (a) e talhadia (b), de 3 a 4 anos de idade.



Fonte: Cassiano José Lages Marinho Falcão - 2023

O clone 12 apresenta maior crescimento a 16,5°C graus para o manejo em talhadia e 11°C para o manejo em alto fuste (Figura 9). Enquanto o clone 16 mostra melhor desempenho aos 12,5°C no manejo em talhadia e 13°C no manejo em alto fuste. Exceto por um pequeno intervalo em 12°C, o clone 12 sempre apresenta maior crescimento que o clone 16, em ambos os manejos. O clone 12 talhadia, clone 16 alto fuste, clone 16 talhadia e clone 12 alto fuste passam a apresentar crescimento médio negativo a partir de 24,4°C, 26°C, 30,5°C e 30,8°C graus, respectivamente. De modo geral, o clone 16 apresenta desempenho melhor em altas temperaturas que o clone 12.

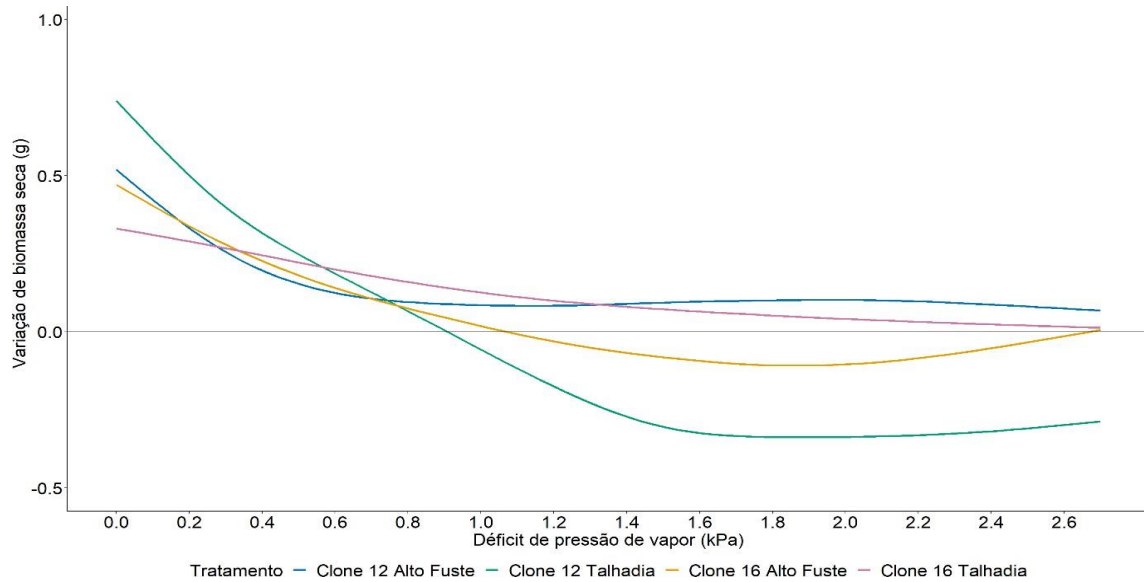
Figura 9 – Variações médias de biomassa, obtidas pela leitura do dendrômetro, em função da temperatura em plantações dos clones 16 e 12, sob manejos de talhadia e alto fuste, de 3 a 4 anos de idade.



4.4 Déficit de pressão de vapor (DPV)

O clone 12 – alto fuste e o clone 16 – talhadia apresentaram médias de crescimento positivas independentemente do valor de DPV. Enquanto o clone 12 talhadia e o clone 16 alto fuste passaram a apresentar médias negativas de crescimento a partir de 0,95 e 1,05 de DPV, respectivamente (Figura 10). Perdas de água mais expressivas em alto DPV foram observadas no clone 12 talhadia.

Figura 10 – Variações médias de biomassa, obtidas pela leitura do dendrômetro, em função do DPV em plantações dos clones 16 e 12, sob manejos de talhadia e alto fuste, de 3 a 4 anos de idade.

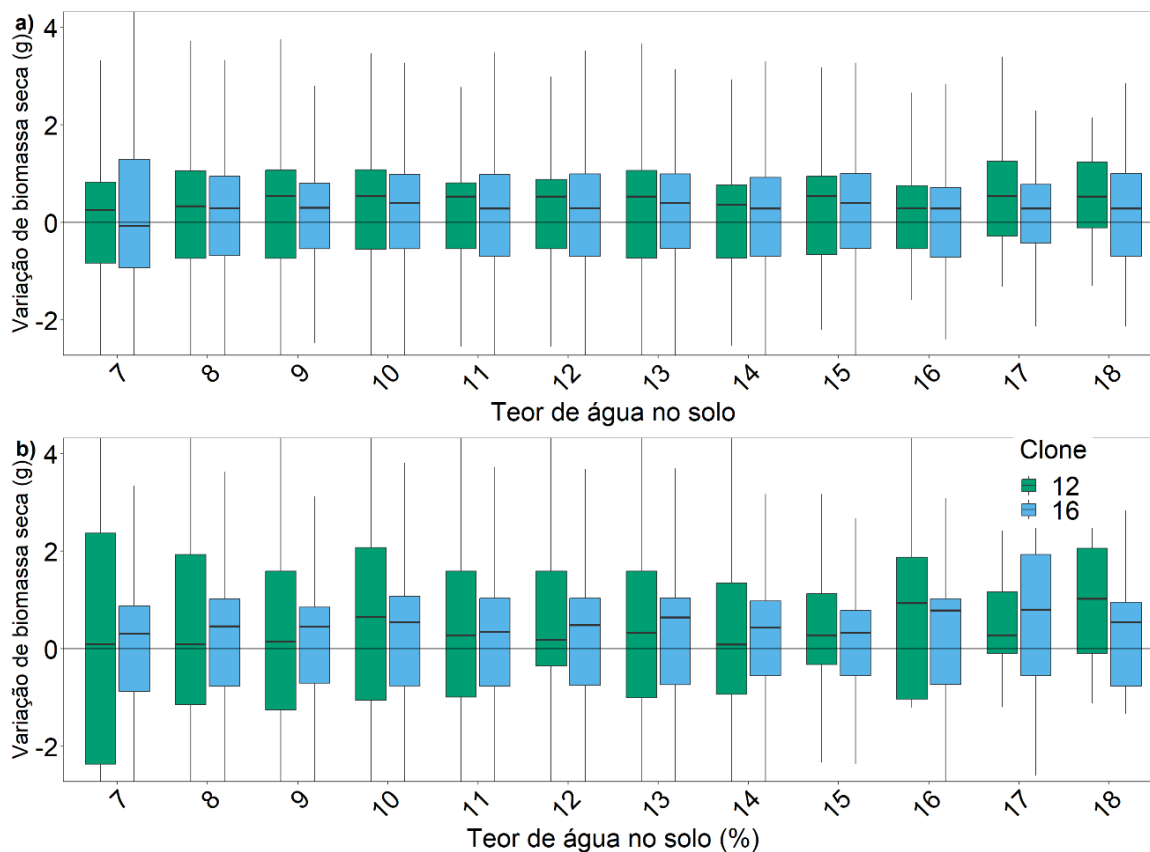


Fonte: Cassiano José Lages Marinho Falcão - 2023

4.5 Teor de água no solo

Os baixos teores de água nos dois primeiros metros de solo não causaram estresse considerável em nenhum dos tratamentos, visto que não houve médias de crescimento negativas. Todavia, notamos uma leve tendência de maiores amplitudes em variações de biomassa no manejo em talhadia (Figura 11).

Figura 11 – Variações de biomassa, obtidas pela leitura do dendrômetro, em função do teor de água no solo em plantações dos clones 16 e 12, sob manejos de alto fuste (a) e talhadia (b), de 3 a 4 anos de idade.

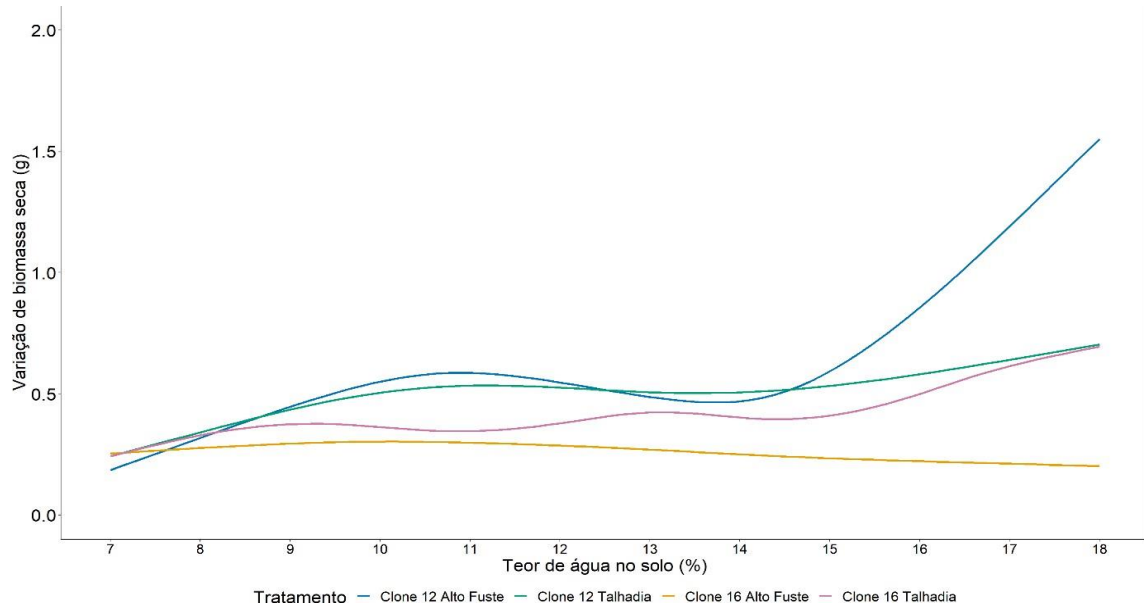


Fonte: Cassiano José Lages Marinho Falcão - 2023

As maiores medianas no manejo de talhadia foram encontradas em 18% de água no solo para o clone 12 (1,1g) e em 16% de água no solo para o clone 16 (0,8g) (Figura 11 b). As medianas no manejo de alto fuste são muito mais estáveis, entre 0,3 e 0,55, com a exceção do clone 16 a 7% de água no solo, com mediana de -0.05 (Figura 11 a).

O clone 12 sob manejo de alto fuste apresentou maior ganho médio de biomassa a partir de 15% de umidade no solo. Já o clone 16 apresenta crescimento quase constante em função da disponibilidade de água no solo (Figura 12).

Figura 12 – Variações médias de biomassa, obtidas pela leitura do dendrômetro, em função do teor de água no solo em plantações dos clones 16 e 12, sob manejos de talhadia e alto fuste, de 3 a 4 anos de idade.



Fonte: Cassiano José Lages Marinho Falcão - 2023

5 DISCUSSÃO

O clone 12 apresenta maiores produtividades, independente do manejo de cultivo (Figura 4a). A alta produtividade encontrada para este material é resultado de programas de melhoramento genético visando a obtenção de clones de crescimento rápido. Clones melhorados tendo em vista alto crescimento tendem a investir maiores teores de biomassa em seu fuste, alcançando maior produtividade econômica com fixação de carbono igual ou até inferior a outros materiais genéticos (Hubbard et al., 2020). Em contrapartida, clones tolerantes à seca, como o 16, frequentemente alocam maiores porcentagens de carbono a seus sistemas radiculares, reduzindo o investimento em produção de madeira (Campoe et al 2020).

As variáveis ambientais como temperatura, DPV, hora do dia e disponibilidade de água no solo interferiram de forma distinta no crescimento dos clones em função de diferenças morfológicas entre estes. O clone 16 apresentou menor resposta de crescimento em função da hora do dia quando comparado ao clone 12 (Figuras 5 a 7). O que pode ser atribuído a diferenças de ângulo de folha entre ambos os clones, onde o clone 12 apresenta ângulo de folha de 30° e o clone 16, de 65° (De Mattoset al., 2020). Os ângulos de folha em uma espécie influenciam a forma como esta interage com a radiação solar ao longo do dia. Árvores com folhas mais verticais são capazes de melhor distribuir a fotossíntese ao longo do dia, uma vez que estas captam melhor a radiação do sol no início da manhã e no fim da tarde (Buckley et al., 2017). A relação entre ângulo de folha e comportamento fotossintético é particularmente expressiva no gênero *Eucalyptus* (King, 1997).

Os picos de crescimento do clone 12, presentes principalmente no manejo em talhadia, exemplificam a capacidade de árvores com ângulos de folha menores de maximizar processos fotossintéticos sob condições ambientais ótimas (King, 1997) (Figura 7). Para o clone 16, a distribuição de ganhos de biomassa de forma mais uniforme ao longo do dia demonstra a aptidão de folhas em ângulos maiores de aproveitar a radiação solar no início e final do dia. A alta resolução temporal das medições obtidas permite relacionar características morfofisiológicas dos materiais genéticos estudados e respostas fotossintéticas a características morfológicas.

Assim como o clone 12 apresentou resposta mais expressiva a hora do dia, este padrão se repete em relação à temperatura, onde este clone apresenta picos mais altos de crescimento em baixas temperaturas e os menores em altas

temperaturas, enquanto o clone 16 apresenta alterações menos expressivas no crescimento em resposta à temperatura (Figuras 8 e 9). A resposta de plantas à altas temperaturas depende, entre outros fatores, do número, distribuição e morfologia dos estômatos (Lawson e Blatt, 2014). Árvores cujas folhas possuem estômatos em ambas as faces, como o clone 16 (Pech, 2020), tendem a ter maior tolerância a estresses térmicos e hídricos, permitindo melhores respostas a variações de temperatura (Fank-De-Carvalho et al., 2015). A presença de estômatos em ambos os lados da folha aliado ao maior ângulo foliar permitem ao clone 16 fechar os estômatos na face da folha sob maior incidência de luz solar, evitando transpirações mais intensas.

Além de diferenças na distribuição dos estômatos, sua densidade também difere entre os materiais genéticos, com médias de 978 estômatos/mm para o clone 12 e 667 estômatos/mm para o clone 16 (Pech, 2020). Menores densidades estomatais são relacionadas a espécies tolerantes à seca, e limitam igualmente perda de água e fotossíntese (Beerling; Chaloner, 1993; Gao e Tian, 2019).

Outros estudos de modelagem encontraram resultados distintos. Queiroz et al., (2020) avaliou o comportamento de sete clones de eucalipto, incluindo o clone 16, em uma variedade de sítios no Brasil. A temperatura ótima de crescimento encontrada no trabalho foi de 21,5°C, consideravelmente maior que os 13,8°C detectados no presente estudo. Sands e Landsberg (2002), modelando crescimento em regiões subtropicais, alcançaram temperaturas ótimas mais próximas, de 16°C. Temperaturas ótimas para crescimento não são estáticas, variando em conjunto com o clima local à medida que a vegetação se aclimata (Ferrari, Slatyer e Vranjic, 1989; Reade Busby, 1990; Säll e Pettersson, 1994). Variações em temperatura ótima de crescimento podem ser consideráveis, com aumentos de 4°C e 7°C sendo conhecidos em *Eucalyptus* (Read e Busby, 1990; Warren, 2008). A variabilidade de resposta fotossintética a condições climáticas reforça a utilidade de avaliar o comportamento dos materiais genéticos usados em cada sítio de plantio.

Similarmente ao observado em relação a temperatura e hora do dia, as respostas do clone 12 a variações de DPV são mais expressivas que as do clone 16 (Figura 10). Uma vez que picos de DPV tendem a ocorrer próximo ao meio dia (Raven, 2014), materiais com maior ângulo de folha, como o clone 16, tendem a estar menos expostas à radiação, reduzindo também as próprias perdas de água. A

influência de DPV sobre a fotossíntese é confirmada também por Novick et al. (2016) que concluíram que a produtividade é mais influenciada pelo DPV que pelo teor de água no solo, como observado neste trabalho.

Dentre as variáveis analisadas, o teor de água no solo foi a única a não apresentar médias negativas na variação de biomassa (Figura 11). A tolerância observada a falta de água nos dois primeiros metros de solo deve-se às profundidades de enraizamento, com plantios do gênero sendo capazes de atingir profundidades de 10m de sistema radicular em apenas 2 anos de plantio (Pinheiro, 2016). O clone 16, por ser menos influenciado por variáveis ambientais, também responde menos a mudanças no teor de água no solo. Basílio (2021) estudando os dois clones, sob diferentes condições edafoclimáticas, também observou que o clone 16 apresentou baixa variação no estoque de biomassa de raízes finas em função do aumento da disponibilidade de água no solo. Já o alto crescimento do clone 12 em teores de água no solo acima de 15% é explicado por sua maior concentração de raízes finas superficiais, com média de 0,35 g kg⁻¹ de raízes finas no primeiro metro de solo contra 0,15 g kg⁻¹ do clone 16 (Basílio, 2021).

De maneira geral, nossos resultados demonstram que o clone 16 apresenta menor influência das variáveis climáticas na biomassa do fuste, em função das características morfológicas das folhas e sistemas radiculares do material. Pois à medida que mudanças climáticas afetam a umidade do ar e temperatura de forma mais intensa, conhecer o comportamento dos materiais genéticos plantados em situações de estresse se torna essencial independentemente de outras medidas já tomadas em relação à disponibilidade de água.

6 CONCLUSÕES

O clone 12 apresentou maior crescimento quando comparado ao clone 16.

Os diferentes sistemas de manejo influenciaram o crescimento em biomassa do fuste apenas para o clone 12, enquanto o clone 16 não sofreu influência do manejo.

A variação de biomassa do fuste foi influenciada pela hora do dia, temperatura, DPV e teor de água no solo. O clone 12 apresentou resposta muito mais expressiva aos fatores avaliados quando comparado ao clone 16. A resposta dos clones às variações ambientais exemplifica caracterizações morfológicas já realizadas nestes, mostrando em tempo quase real o efeito que a morfologia de folhas, raízes e estômatos tem sobre o comportamento vegetal.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, C. D.; MACALADY, A. K.; CHENCHOUNI, H.; BACHELET, D.; MCDOWELL, N.; VENNETIER, M.; KITZBERGER, T.; RIGLING, A.; BRESHEARS, D. D.; HOGG, E. T.; GONZALEZ, P. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. **Forest ecology and management**, v. 259, n. 4, p.660-684, 2010.
- ALVARENGA, C. B. D.; TEIXEIRA, M. M.; ZOLNIER, S.; CECON, P. R.; SIQUEIRA, D. L. D.; RODRIGUÊS, D. E.; RINALDI, P. C. N. Efeito do déficit de pressão de vapor d'água no ar na pulverização hidropneumática em alvos artificiais. **Biosciences journal**, 182-193, 2014.
- ALVARES, C. A.; CAMPOE, O. C.; CARNEIRO, R.L.; MUNHOZ, J.S.B.; DE MATTOS, E.M.; DELIBERALI, I.; FEREZ, A.P.C.; STAPE, J.L. Construção e uso de fitas dendrométricas para avaliação do ritmo de crescimento de árvores. **Circular Técnica**. IPEF, Piracicaba, SP. nº 212, 2017.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p.711-728, 2013.
- ALVES, M. V. G.; CHIAVETTA, U.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. do A.; KIRCHNER, F. F. Aplicação de k-nearest neighbor em imagens multispectrais para a estimativa de parâmetros florestais. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 3, p. 351-362, 2013.
- BARTÓN, K. **MuMIn: Multi-Model Inference**. , 22 mar. 2020. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/MuMIn/index.html>>. Acesso em: 26 set. 2023
- BASÍLIO, J. J. N. Raízes finas em plantações de eucalipto: efeitos genéticos e edafoclimáticos. Dissertação de Mestrado. **Universidade Estadual Paulista**. 2021
- BEERLING, D. J.; CHALONER, W. G. The Impact of Atmospheric CO₂ and Temperature Change on Stomatal Density: Observations from *Quercus robur* Lammas Leaves. **Annals of Botany**, v. 71, n. 3, p. 231–235, 1993.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C. A.; CARNEIRO, R. L.; STAPE, J.L. Variation in whole-rotation yield among *Eucalyptus* genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS project. **Forest Ecology and Management**, 462, p.117953, 2020.
- BREITSPRECHER, A.; HUGHES, W. A recording dendrometer for humid environments. **Biotropica**, v. 7, n. 2, p.90-99, 1975.
- BUCKLEY, T. N. et al. The Sites of Evaporation within Leaves. **Plant Physiology**, v. 173, n. 3, p. 1763–1782, mar. 2017.

CAMPOE, O.C.; MUNHOZ, J.S.; ALVARES, C.A.; CARNEIRO, R.L.; DE MATTOS, E.M.; FEREZ, A.P.C. AND STAPE, J.L. Meteorological seasonality affecting individual tree growth in forest plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 380, p.149-160, 2016.

CAMPOE, O.C.; ALVARES, C.A.; CARNEIRO, R.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; HUBBARD, R.M.; STAHL, J.; MOREIRA, G.; MORAES, L.F.; STAPE, J.L. Climate and genotype influences on carbon fluxes and partitioning in Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 475, p.118445, 2020.

CATTELINO, P.J.; BECKER, C.A.; FULLER, L.G. Construction and installation of homemade dendrometer bands. **Northern Journal of Applied Forestry**, v. 3, n. 2, p.73-75, 1986.

CHRISTINA, M.; NOUVELLON, Y.; LACLAU, J. P.; STAPE, J. L.; BOUILLET, J. P.; LAMBAIS, G. R.; LE MAIRE, G. Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. **Functional Ecology**, v. 31, n. 2, p. 509–519, 2017.

CLARK, N.A.; WYNNE, R.H.; SCHMOLDT, D.L. A review of past research on dendrometers. **Forest Science**, v. 46, n. 4, p.570-576, 2000.

DE MATTOS, E. M.; BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; Variation in canopy structure, leaf area, light interception and light use efficiency among Eucalyptus clones. **Forest Ecology and Management**, v. 463, p. 118, 1 maio 2020.

DRAKE, P.L., MENDHAM, D.S., WHITE, D.A., OGDEN, G.N. AND DELL, B. Water use and water-use efficiency of coppice and seedling *Eucalyptus globulus* Labill.: a comparison of stand-scale water balance components. **Plant and soil**, v. 350, n. 1, p.221-235, 2011.

DRAKE, P. L.; FROEND, R. H.; FRANKS, P. J. Smaller, faster stomata: scaling of stomatal size, rate of response, and stomatal conductance. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 2, p. 495–505, jan. 2013.

DYE, P. J. Water use efficiency in South African Eucalyptus plantations: a review. **South African Forestry Journal**. v. 189, p. 17–26, 2000.

FANK-DE-CARVALHO, S. M.; SOMAVILLA, N. S.; MARCHIORETTO, M. S.; BÁO, S. N. Plant Structure in the Brazilian Neotropical Savannah Species. Em: **Biodiversity in Ecosystems - Linking Structure and Function**. [s.l.] IntechOpen, 2015.

FAHAD, S.; BAJWA, A.A.; NAZIR, U.; ANJUM, S.A.; FAROOQ, A.; ZOHAIB, A.; SADIA, S.; NASIM, W.; ADKINS, S.; SAUD, S.; IHSAN, M.Z. Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. **Frontiers in plant science**, v. 8, p.1147, 2017.

FAROOQ, M.; HUSSAIN, M.; WAHID, A.; SIDDIQUE, K.H.M. Drought stress in plants: an overview. In: AROCA, R. **Plant responses to drought stress. From morphological to molecular features**, Springer, 2012.

FERCHAUD, F.; VITTE, G.; BORNET, F.; STRULLU, L.; MARY, B. Soil water uptake and root distribution of different perennial and annual bioenergy crops. **Plant Soil**, v. 388, p. 307–322, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2335-y>

FERRAR, P. J.; SLATYER, R. O.; VRANJIC, J. A. Photosynthetic Temperature Acclimation in Eucalyptus Species From Diverse Habitats, and a Comparison With Nerium oleander. **Functional Plant Biology**, v. 16, n. 2, p. 199–217, 1989.

FERRARI, M. P., FERREIRA, C. A. AND DA SILVA, H. D. Condução de plantios de Eucalyptus em sistema de talhadia. **Embrapa Florestas-Documents (INFOTEC-A-E)**, 2004.

FERRAZ FILHO, A. C., SCOLFORO, J. R. S.; MOLA-YUDEGO, B. The coppice-with-standards silvicultural system as applied to Eucalyptus plantations—a review. **Journal of Forestry Research**, v. 25, n. 2, p. 237–248, 2014.

FIGUEIREDO FILHO, A.; DO RÓCIO HUBIE, S.; SCHAAF, L. B.; DE FIGUEIREDO, D. J.; SANQUETTA, C.R. Avaliação do incremento em diâmetro com o uso de cintas dendrométricas em algumas espécies de uma Floresta Ombrófila Mista localizada no Sul do Estado do Paraná. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 5, n. 1, p. 69–84, 2003.

FLEXAS, J.; BOTA, J.; LORETO, F.; CORNIC, G.; SHARKEY, T. D. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. **Plant Biology**. v. 6, p. 269–279, 2004. doi: 10.1055/s-2004-820867

FORRESTER, D.I.; BERTRAM, C.A.; MURPHY, S. Impact of competition from coppicing stumps on the growth of retained trees differs in thinned *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus tricarpa* plantations in southeastern Australia. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 42, n. 5, p. 841–848, 2012.

GAO, J.; TIAN, K. Stem and leaf traits as co-determinants of canopy water flux. **Plant Diversity**, v. 41, n. 4, p. 258–265, 1 ago. 2019.

GODOI, N. M. I., 2020. Adubação e residual de doses de nitrogênio, fósforo e potássio no eucalipto em sistema de talhadia no Cerrado. Dissertação (Mestre em Agronomia). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Iha Solteira, 2020.

GONÇALVES, J. L. DE M.; ÁLVARES, C. A.; BEHLING, M.; ALVES, J. M.; PIZZI, G. T.; ANGELI, A. Produtividade de plantações de eucalipto manejadas nos sistemas de alto fuste e talhadia, em função de fatores edafoclimáticos. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p. 411–419, 2014.

GRIFFIN J. J.; RANNEY T.G.; PHARR D. M. Heat and drought influence photosynthesis and water relations, and soluble carbohydrates of two ecotypes of redbud (*Cercis canadensis*). **Journal of American Society for Horticultural Science**, v. 129, p. 497–502, 2004.

HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. **Weather and climate extremes**, v. 10, p.4-10, 2015.

HERRMANN, V.; MCMAHON, S.M.; DETTO, M.; LUTZ, J.A.; DAVIES, S.J.; CHANG-YANG, C.H. AND ANDERSON-TEIXEIRA, K.J. Tree circumference dynamics in four forests characterized using automated dendrometer bands. **PloS one**, v. 11, n. 12, p.e0169020, 2016.

HUBBARD, R. M.; CARNEIRO, R. L.; CAMPOE, O.; ALVARES, C. A.; FIGURA, M. A.; MOREIRA, G. G. Contrasting water use of two Eucalyptus clones across a precipitation and temperature gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 475, p. 118407, nov. 2020.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório IBÁ 2020**. Brasília, 2021.

IPCC. **Climatechange 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. IPCC, 2014.

KAYA, M. D.; OKCUB, G.; ATAKA, M.; CIKILIC, Y.; KOLSARICIA, O. Seed treatments to overcome salt and drought stress during germination in sunflower (*Helianthus annuus* L.). **European Journal of Agronomy**. v. 24, p. 291–295, 2006. doi: 10.1016/j.eja.2005.08.001

KING, D. A. The functional significance of leaf angle in Eucalyptus. **Australian Journal of Botany**, v. 45, n. 4, p. 619–639, 1997.

LARKINDALE, J.; MISHKIND, M.; VIERLING, E. Plant Responses to High Temperature. Em: **Plant Abiotic Stress**. [s.l.] John Wiley & Sons, Ltd, 2005. p. 100–144.

LAWSON, T.; BLATT, M. R. Stomatal Size, Speed, and Responsiveness Impact on Photosynthesis and Water Use Efficiency. **Plant Physiology**, v. 164, n. 4, p. 1556–1570, 1 abr. 2014.

MCCORMACK, M. L.; DICKIE, I. A.; EISSENSTAT, D. M.; FAHEY, T. J.; FERNANDEZ, C. W.; GUO, D.; HELMISAARI, H. S.; HOBBIE, E. A.; IVERSEN, C. M.; JACKSON, R. B. Redefining fine roots improves understanding of below ground contributions to terrestrial biosphere processes. **New Phytology**, v. 207, p. 505–518, 2015.

PECH, T. M. **GENÉTICA E GRADIENTE CLIMÁTICO COMO DETERMINANTES DE VARIAÇÕES ESTOMÁTICAS EM CLONES DE Eucalyptus**. Dissertação de mestrado. Universidade do Estado de Santa Catarina, 2020.

PORTER, J. R. Rising temperatures are likely to reduce crop yields. **Nature**, v. 436, n. 174, 2005. doi:10.1038/436174b

QUEIROZ, T. B.; CAMPOE, O. C.; MONTES, C. R.; ALVARES, C. A.; CUARTAS, M. Z.; GUERRINI, I. A. Temperature thresholds for Eucalyptus genotypes growth across tropical and subtropical ranges in South America. **Forest Ecology and Management**, v. 472, p.118248, 2020.

RAVEN, J. A. Speedy small stomata? **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 6, p. 1415–1424, 1 abr. 2014.

READ, J.; BUSBY, J. R. Comparative Responses to Temperature of the Major Canopy Species of Tasmanian Cool Temperate Rain-Forest and Their Ecological Significance .II. Net Photosynthesis and Climate Analysis. **Australian Journal of Botany**, v. 38, n. 2, p. 185–205, 1990.

RIBEIRO, N.; SITEO, A. A.; GUEDES, B. S.; STAISS, C. Manual de silvicultura tropical. Maputo: **Universidade Eduardo Mondlane**. 2022

ROWLAND, L.; MALHI, Y.; SILVA-ESPEJO, J. E.; FARFÁN-AMÉZQUITA, F.; HALLADAY, K.; DOUGHTY, C.E.; MEIR, P.; PHILLIPS, O.L. The sensitivity of wood production to seasonal and interannual variations in climate in a lowland Amazonian rainforest. **Oecologia**, v. 174, n. 1, p.295–306, 2014.

SÄLL, T.; PETTERSSON, P. A Model of Photosynthetic Acclimation as a Special Case of Reaction Norms. **Journal of Theoretical Biology**, v. 166, n. 1, p. 1–8, 7 jan. 1994.

SHEIL, D. Growth assessment in tropical trees: large daily diameter fluctuations and their concealment by dendrometer bands. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 33, n. 10, p.2027-2035, 2003.

SILVA, N. F. DA et al. Yield and Nutrient Demand and Efficiency of Eucalyptus under Coppicing Regime. **Forests**, v. 11, n. 8, p. 852, ago. 2020.

SOUZA, D. P. L. GALLAGHER T.; MITCHELL, D; MCDONALD, T.; SMIDT, M. Determining the effects of felling method and season of year on the regeneration of short rotation coppice. **International journal of forest engineering**, v. 27, n. 1, p. 53-65, 2016.

STAPE, J. L. Planejamento global e normatização de procedimentos operacionais da talhadia simples em Eucalyptus. **Série técnica IPEF**, v. 11, n. 30, p.51-62, 1997.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest ecology and management**, v. 193, n. 1-2, p.17-31, 2004.

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

TESTER M.; BACIC M. Abiotic stress tolerance in grasses. From model plants to crop plants. **Plant Physiology**, v. 137, p. 791–793, 2005.

THORUP-KRISTENSEN, K.; HALBERG, N.; NICOLAISEN, M.; OLESEN, J.E.; CREWS, T.E.; HINSINGER, P.; KIRKEGAARD, J.; PIERRET, A.; DRESBØLL, D.B. Digging deeper for agricultural resources, the value of deep rooting. **Trends in plant science**, v. 25, n. 4, p.406-417, 2020.

TOMST. **Point Dendrometer Handbook**. Michelská, República Tcheca, 2019. Disponível em: https://tomst.com/web/wp-content/uploads/2019/08/D1_users_manual_3.pdf. Acesso em: 23 ago. 2021.

VAN DER MAATEN, E.; VAN DER MAATEN-THEUNISSEN, M.; SMILJANIĆ, M.; ROSSI, S.; SIMARD, S.; WILMKING, M.; DESLAURIERS, A.; FONTI, ARX, G.; BOURIAUD, O. DendrometerR: Analyzing the pulse of trees in R. **Dendrochronologia**, Amsterdam, v. 40, p. 12-16, 2016.

WARREN, C. R. Does growth temperature affect the temperature responses of photosynthesis and internal conductance to CO₂? A test with *Eucalyptus regnans*. **Tree Physiology**, v. 28, n. 1, p. 11–19, 1 jan. 2008.

WILLIAMSON, G.B.; LAURANCE, W.F.; OLIVEIRA, A.A.; DELAMONICA, P.; GASCON, C.; LOVEJOY, T. E.; POHL, L. Amazonian tree mortality during the 1997 El Nino drought. **Conservation Biology**, v. 14, p. 1538–1542, 2000.

WHITEHEAD, D.; BEADLE, C. L. Physiological regulation of productivity and water use in Eucalyptus: a review. **Forest ecology and management**. v. 193, p. 113-40, 2004.

XAVIER, A.; da SILVA, R. L.; 2010. Evolução da silvicultura clonal de Eucalyptus no Brasil. **Agronomía Costarricense**, v. 34, n. 1, p.93-98, 2010.