

RODRIGO DAL-SASSO LOURENÇO

**IRRIGAÇÃO E FERTIRRIGAÇÃO EM EUCALIPTO: ANÁLISE DO DESEMPENHO
E IDENTIFICAÇÃO DE FATORES LIMITANTES AO CRESCIMENTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Everardo Chartuni Mantovani

Coorientador: Júlio César Lima Neves

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

L892i
2024
Lourenço, Rodrigo Dal-Sasso, 1990-
Irrigação e fertirrigação em eucalipto: análise do
desempenho e identificação de fatores limitantes ao crescimento
/ Rodrigo Dal-Sasso Lourenço. – Viçosa, MG, 2024.
1 tese eletrônica (95 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Everardo Chartuni Mantovani.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2024.
Referências bibliográficas: f. 92-95.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.432>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Eucalipto - Cultivo. 2. Ecofisiologia vegetal. 3. Estresse
hídrico. 4. Florestas - Irrigação. 5. Regulação de expressão
gênica. I. Mantovani, Everardo Chartuni, 1958-. II. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 634.95


RODRIGO DAL-SASSO LOURENÇO

**IRRIGAÇÃO E FERTIRRIGAÇÃO EM EUCALIPTO: ANÁLISE DO DESEMPENHO
E IDENTIFICAÇÃO DE FATORES LIMITANTES AO CRESCIMENTO**


Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 04 de abril de 2024.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **RODRIGO DAL SASSO LOURENCO**
Data: 04/08/2024 16:58:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rodrigo Dal-Sasso Lourenço
Autor

Documento assinado digitalmente
 **EVERARDO CHARTUNI MANTOVANI**
Data: 04/08/2024 19:23:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Everardo Chartuni Mantovani
Orientador

Dedico esta conquista ao meu avô Maurício Dal Sasso (in memoriam), que apesar de todas as dificuldades, sempre foi um incentivador e defensor da educação.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À Universidade Federal de Viçosa – UFV, por intermédio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade da realização do curso.

Ao professor Everardo Chartuni Mantovani pela valiosa orientação, ensinamentos e experiências compartilhadas.

Ao professor Júlio César Lima Neves, pela grandiosa contribuição, disponibilidade e ensinamentos. A sua excelência na docência é exemplo e motivação para os novos profissionais.

À empresa Eldorado Brasil Celulose, por permitir a realização desta pesquisa e pela imensurável contribuição no processo. Em especial aos colaboradores Sharlles Christian Moreira Dias, Frederico Alfenas Silva Valente Paes, Vagna da Costa Pereira, Ricardo Previdente Martins e toda a equipe de campo da pesquisa florestal representado pelo Reinaldo Evangelista de Oliveira e Ariel Ferreira.

À minha namorada Samyra Alves Condé pelo apoio incondicional e por ter caminhado lado a lado toda essa jornada. Agradecimento especial à Leopoldina e Isabel que deixaram este caminho mais leve.

A todos da minha família que me incentivaram e apoiaram nesta jornada, em especial minha mãe Imaculada Conceição Teixeira Dal Sasso e meu irmão Rafael Dal Sasso Lourenço, que sempre estiveram ao meu lado.

“Só vive o propósito quem suporta o processo”.

(autor desconhecido)

RESUMO

LOURENÇO, Rodrigo Dal-Sasso, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2024. **Irrigação e fertirrigação em eucalipto: análise do desempenho e identificação de fatores limitantes ao crescimento.** Orientador: Everardo Chartuni Mantovani. Coorientador: Júlio César Lima Neves.

A compreensão dos processos fisiológicos do cultivo de eucalipto e as respectivas interações com as condições de sítio e manejo se fazem necessário para uma melhor tomada de decisão no planejamento e manejo silvicultural. O presente trabalho teve como objetivo geral compreender o comportamento de diferentes materiais genéticos submetidos em diferentes condições de sítio e tratamentos com a adoção de irrigação e fertirrigação. Além da identificação dos fatores limitantes e sua respectiva magnitude. Foram aplicadas as metodologias de Modelos Lineares Generalizados Mistos – GLMM e a técnica multivariada análise de componentes principais - PCA. Ambas apresentaram um desempenho satisfatório na identificação das melhores variáveis explicativas e análise do crescimento do cultivo, além da identificação dos fatores limitantes e na respectiva classificação dos materiais. De maneira geral, a suplementação de água e nutrientes via sistema de irrigação se mostrou benéfica para o melhor desempenho do cultivo. A magnitude deste benefício se mostrou relativa em relação ao material genético e condições de sítio. O perfil de crescimento e a respectiva taxa de incremento se mostraram estritamente relacionado à disponibilidade de recursos, principalmente a disponibilidade hídrica, que se apresentou como o principal fator limitante do crescimento. Apesar do benefício identificado, a adoção da técnica de irrigação e fertirrigação em cultivos comerciais de eucalipto em larga escala e ao longo de todo o ciclo não é uma prática usual e é pouco difundida. O cultivo do eucalipto irrigado apresenta algumas particularidades e complexidades da sua ecofisiologia, fazendo-se necessário uma análise mais holística e interdisciplinar no momento da adoção da técnica, concepção do projeto, respectiva seleção dos materiais genéticos e definição da estratégia de manejo.

Palavras-chave: Ecofisiologia. Estresse hídrico. Sítio florestal.

ABSTRACT

LOURENÇO, Rodrigo Dal-Sasso, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2024. **Irrigation and fertigation in eucalyptus: performance analysis and identification of limiting factors growth.** Adviser: Everardo Chartuni Mantovani. Co-adviser: Júlio César Lima Neves.

Understanding the physiological processes of eucalyptus cultivation and the respective interactions with site and management conditions is necessary for better decision-making in silvicultural planning and management. The main goal of this study was to understand the behavior of different genetic materials subjected to different site conditions and treatments with the adoption of irrigation and fertigation, in addition to identifying the limiting factors and their respective magnitude. The methodologies of Generalized Linear Mixed Models - GLMM and the multivariate technique principal component analysis - PCA were applied. Both presented a satisfactory performance in identifying the best explanatory variables, analyzing crop growth, identifying limiting factors, and classifying the materials. Water and nutrient supplementation via an irrigation system improved crop performance. The magnitude of this benefit proved to be relative to the genetic material and site conditions. The growth profile and the respective increasing rate were strictly related to the availability of resources, especially water availability, which was the main factor limiting growth. Regardless of the identified benefit, the adoption of the irrigation and fertigation technique in large-scale commercial eucalyptus cultivation throughout the entire cycle is not a common practice and is not widespread. The cultivation of irrigated eucalyptus presents some particularities and complexities of its ecophysiology, making a more holistic and interdisciplinary analysis necessary when adopting the technique, designing the project, selecting the genetic materials, and defining the management strategy.

Keywords: Ecophysiology. Water stress. Forest site.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	10
CAPÍTULO 1	15
ANÁLISE DO DESEMPENHO DE DIFERENTES CLONES DE EUCALIPTO SUBMETIDO À DISTINTAS CONDIÇÕES DE MANEJO E SÍTIO FLORESTAL	15
1. INTRODUÇÃO	15
2. MATERIAL E MÉTODOS	17
2.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	17
2.2 LAYOUT EXPERIMENTAL E CLONES AVALIADOS	18
2.3 MANEJO NUTRICIONAL	18
2.4 SISTEMA E MANEJO DE IRRIGAÇÃO	20
2.5 MENSURAÇÃO FLORESTAL E ANÁLISE EXPLORATÓRIA.....	21
2.6 MODELAGEM DA CURVA DE CRESCIMENTO	22
2.7 DEFINIÇÃO DOS PONTOS CRÍTICOS NA CURVA DE CRESCIMENTO	24
2.8 MODELAGEM DAS VARIÁVEIS RESPOSTAS	25
2.9 AVALIAÇÃO DOS MODELOS E COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DE MÉDIAS	26
2.10 ANÁLISE DO DESEMPENHO DE ACORDO COM O SÍTIO FLORESTAL.....	26
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
3.1 CLIMA E IRRIGAÇÃO	27
3.2 DESEMPENHO FLORESTAL	31
3.3 MODELOS DE CRESCIMENTO	43
3.4 DEFINIÇÃO DOS PONTOS CRÍTICOS	47
3.5 AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS RESPOSTA	52
3.6 DESEMPENHO EM RELAÇÃO AS CONDIÇÕES DE SÍTIO	57
3.7 CONCLUSÃO	60
CAPÍTULO 2	61
IDENTIFICAÇÃO DOS FATORES LIMITANTES AO CRESCIMENTO DO EUCALIPTO: ABORDAGEM DO MANEJO DE IRRIGAÇÃO E NUTRIÇÃO.....	61
1. INTRODUÇÃO.....	61
2. MATERIAL E MÉTODOS	63
2.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	63
2.2 LAYOUT EXPERIMENTAL E CLONES AVALIADOS	64
2.3 MANEJO NUTRICIONAL	64
2.4 SISTEMA E MANEJO DE IRRIGAÇÃO	66
2.5 MENSURAÇÃO FLORESTAL E ANÁLISE EXPLORATÓRIA.....	67

2.6 ANÁLISE DO EQUILÍBRIO E BALANÇO NUTRICIONAL.....	68
2.7 ANÁLISE DOS COMPONENTES PRINCIPAIS	69
2.8 MENSURAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DAS VARIÁVEIS EXPLICATIVAS.....	70
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
3.1 CLIMA E IRRIGAÇÃO	71
3.2 AVALIAÇÃO DO EQUILÍBRIO E BALANÇO NUTRICIONAL.....	77
3.2 ANÁLISE DOS COMPONENTES PRINCIPAIS	82
3.3 CONTRIBUIÇÃO DAS VARIÁVEIS EXPLICATIVAS	86
4. CONCLUSÃO.....	91
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

INTRODUÇÃO

A utilização de madeira e seus respectivos subprodutos estão presentes em praticamente todas as atividades econômicas e fazem parte do nosso cotidiano. Com o incremento populacional, ascensão da renda média per capita juntamente com o aumento da população urbana, uma nova perspectiva de consumo foi estabelecida a nível global e isso refletiu diretamente no aumento da demanda por madeira e seus derivados.

Com uma demanda crescente e constante, estima-se que será necessário um aumento de aproximadamente 20% da produção global de madeira nas próximas décadas (BOUCHER, 2014). Concomitante a este aumento da demanda, o esgotamento dos recursos florestais naturais e uma maior preocupação e consciência ambiental evidenciou a importância do cultivo comercial das florestas plantadas no suprimento desta demanda e seu importante papel na diminuição da pressão de exploração das florestas naturais (PIRARD et al., 2016).

De acordo com o relatório “*Global Forest Resources Assessment 2020*” (FAO, 2020) a área global de floresta plantada é de 294 milhões de hectares, o que representa apenas 7% da área total de florestal global, mas ao mesmo tempo essa pequena parcela representa mais de 45% da produção de madeira para consumo (PAYN et al., 2015). Essa modalidade de cultivo apresentou uma taxa de crescimento na última década de 3,06 milhões de hectares/ano (2010-2020). Nas últimas três décadas a área de floresta plantada global cresceu 123 milhões de hectares, saindo de uma área de 171 milhões de hectares em 1990 e saltando para os 294 milhões de hectares atuais (FAO, 2020).

O Brasil se destaca no cenário internacional pelas suas condições edafoclimáticas favoráveis e por uma rápida expansão e estabelecimento de novas áreas com cultivo de florestas plantadas de ciclo curto (BOUCHER, ELIAS, 2014). A expansão dos cultivos florestais no Brasil vem ocorrendo em áreas previamente antropizadas, normalmente substituindo áreas de pastagens com baixa produtividade. Atualmente conta com uma área total de 9,94 milhões de hectares de florestas plantadas, sendo o gênero *Eucalyptus* responsável por 76% da área plantada, abrangendo 7,6 milhões de hectares (IBÁ, 2023).

Pertencente à família Myrtaceae, o gênero *Eucalyptus* é originário da Austrália e outras ilhas da Oceânia. Com mais de 730 espécies reconhecidas botanicamente,

foi introduzido de forma exitosa no Brasil no século XIX e rapidamente ganhou notoriedade e uma forte expansão do seu cultivo. Amplamente utilizada e adaptada às condições de sítio brasileiro, as espécies de eucalipto têm sido preferencialmente utilizadas devido ao seu rápido crescimento, capacidade de adaptação às diversas regiões e condições de sítio, flexibilidade de integração com outras atividades agropecuárias além do potencial econômico fornecido pela utilização da sua madeira e seus múltiplos fins como energia, celulose, laminação, serraria, medicamentos, cosméticos, entre outros.

De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ, o potencial produtivo do cultivo de eucalipto no Brasil se destaca frente à outras regiões do mundo, apresentando ciclos de cultivos mais precoces com duração média de ciclo de 6,7 anos. Concomitante às condições edafoclimáticas favoráveis ao cultivo de eucalipto no Brasil, o investimento maciço em tecnologias e pesquisas no âmbito do manejo florestal e melhoramento genético permitiu ganhos consideráveis na competitividade florestal. Dados do Relatório Anual de 2022 da IBÁ destacam que o incremento médio anual de madeira (IMA - m³/ha/ano) saltou de 10m³/ha/ano no ano de 1971 para os impressionantes 38,9m³/ha/ano em 2021, mostrando a eficiência e o avanço das tecnologias empregadas nas últimas décadas (IBÁ, 2023).

Um dos usos com maior exploração comercial e com forte crescimento nos últimos anos é a produção de celulose. O Brasil se encontra na segunda posição entre os produtores de celulose, atingindo a marca recorde no ano de 2022 com 25 milhões de toneladas, um incremento de 10% na comparação anual, ficando atrás somente dos Estados Unidos da América com uma produção total de celulose de 49,7 milhões de toneladas (IBÁ, 2023).

No quesito exportação, o Brasil obteve um grande avanço no último ano, com salto de 22% alcançando a marca de 19,1 milhões de toneladas exportadas, o equivalente a US\$6,7 bilhões, se destacando em primeiro lugar, ultrapassando os Estados Unidos da América e Canadá (IBÁ, 2022). A produção nacional é amplamente destinada à exportação (> 70% do total produzido), se destacando como um estratégico e importante fornecedor mundial desse insumo (EPE & IEA, 2022), sendo China e Europa os principais mercados compradores com 40% e 30% respectivamente (celulose branqueada de eucalipto é o principal vetor exportações brasileiras de celulose e papel).

A demanda por papel e celulose se destaca frente aos outros subprodutos com uma demanda crescente e um aumento estimado em aproximadamente 30% até o ano de 2060 (BOUCHER, 2014). Dado a combinação de fatores como a ascensão da renda média per capita, expansão da população urbana juntamente com a globalização, uma nova perspectiva de consumo foi estabelecida a nível global e isso refletiu diretamente no consumo per capita de papel e celulose.

Os países emergentes se destacaram com um maior incremento deste consumo e a tendência é de um incremento contínuo, favorecendo as exportações e o crescimento do setor de celulose do Brasil. Por outro lado, os países desenvolvidos têm reduzido e em alguns casos mantido os seus patamares históricos de consumo. De acordo com Sanquetta, 2020, o Canadá figura se com o maior consumo per capita de celulose 200,64 kg.ano¹, seguido pelos Estados Unidos da América com 142,38 kg.ano¹ e Rússia com um consumo de 100,03 kg.ano¹. Os países em desenvolvimento como Brasil, China e Índia apresentam consumos per capita inferiores, 30,98; 23,43; e 2,88 kg.ano¹, no entanto com um contínuo incremento no consumo nos últimos anos. O autor ainda destaca o processo de elevação do consumo iniciado na China nos últimos anos, que a persistir a tendência atual, pode ultrapassar o consumo per capita dos USA antes de 2030 (SANQUETTA et al., 2020).

A nível nacional, os estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e São Paulo concentram 57% da área com plantios de eucalipto, com uma área equivalente a 29, 15 e 13% da área total respectivamente (IBÁ, 2023). O estado do Mato Grosso do Sul vem ganhando notoriedade nos últimos anos e se destaca com grandes unidades fabris para produção de celulose instaladas na costa leste do seu território e outros grandes projetos em fase de implantação. De acordo com a Associação Sul-matogrossense de produtores e consumidores de Florestas Plantadas – REFLORE -MS, o estado conta hoje com 1,4 milhão de hectares em área de floresta plantada e possui uma projeção de crescimento de 42,8% para os próximos sete anos, alcançando a marca de 2 milhões de hectares em 2030. O principal destino da produção florestal do estado é a produção de celulose, que no ano de 2022 exportou 4,4 milhões de toneladas, o que representou a entrada de mais de US\$ 1,5 bilhão na balança comercial. O município de Três Lagoas-MS, se destaca com a maior área plantada (263.921 ha) de eucalipto (IBGE, 2021) e foi reconhecido em 2013 com a publicação da Lei nº 4336/2013 no Diário Oficial do Estado como Capital Mundial da Celulose, o

que foi confirmado a nível nacional em abril de 2021 com a sanção da lei nº14.142/2021.

A forte e contínua demanda de madeira para produção de celulose, reflete no aumento da demanda por terras produtivas, que normalmente estão ocupados com pecuária e agricultura. Esse movimento de alta na demanda devido à disputa por fibras, concomitante com variações nos preços das commodities agrícolas, influencia diretamente na disponibilidade e nos preços das terras, que conseqüentemente está refletindo em retornos marginalmente menores. De acordo com o relatório disponibilizado pela S&P *Global Commodity Insights*, o preço das terras agrícolas quase dobrou nos últimos três anos no Brasil. Esse aumento no preço da terra veio acompanhado dos preços recordes das commodities agrícolas. De acordo com o relatório, esse boom nos preços das commodities agrícolas impactou o preço das terras para reflorestamento, as quais apresentaram uma valorização de 118% nos últimos três anos. Outro fator importante é a elevação do custo de produção de madeira, fator majoritário no custo de produção da celulose (45 - 50%).

Diante do exposto, a necessidade de um aumento de produtividade e conseqüentemente uma redução no *Yield Gap*, se faz necessário para uma melhor otimização dos recursos, planejamento, operação e custo de produção das empresas do setor florestal frente às demandas de mercado e das condições edafoclimáticas. Modelagens agroclimáticas identificaram que o município de Três Lagoas – MS apresenta um potencial produtivo médio de IMA de $79,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, entretanto, o IMA atual é de $45,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (ELLI et al., 2019). Dentre os fatores limitantes, o déficit hídrico é apontado como o principal responsável (76,6%) da lacuna de produtividade para a região (ELLI et al., 2019).

Notoriamente conhecido e explorado por sua elevada capacidade de adaptação à diferentes condições de sítio e seu rápido crescimento, o cultivo de eucalipto no Brasil vem se expandindo em grande parte em áreas marginais previamente antropizadas (conversão de áreas de pastagens) com baixa fertilidade, elevada acidez e regimes hídricos irregulares (ABREU-JUNIOR et al., 2017). Essa condição edafoclimática favorece às perdas de produtividade e à um grande risco operacional, fazendo se necessário um maior aprofundamento na compreensão dos processos fisiológicos de diferentes materiais genéticos submetidos à diferentes condições fisiográficas, disponibilidade de água, fertilização e manejo.

Apesar da volatilidade da disponibilidade e preço de áreas produtivas, custo de produção florestal em ascensão, a atividade ainda se apresenta como lucrativa, além de demonstrar um grande potencial de incremento de produtividade a partir de novas tecnologias, materiais genéticos mais adaptado às condições edafoclimáticas específicas e tratos culturais. A partir dessa premissa, foi realizado um experimento com seis diferentes materiais genéticos, submetidos à diferentes suplementações nutricionais e de água através da tecnologia de irrigação e fertirrigação.

Tendo em vista o que foi apresentado, o presente estudo tem como objetivo geral analisar o desempenho de seis diferentes materiais genéticos em resposta à suplementação de água e nutrientes via sistema de irrigação; (ii) compreensão da curva de crescimento dos diferentes materiais genéticos às diferentes condições de sítio e disponibilidade de água e nutrientes; (iii) identificação dos fatores limitantes ao crescimento e suas respectivas magnitudes: abordagem do desempenho e manejo da fertilização e irrigação.

CAPÍTULO 1

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE DIFERENTES CLONES DE EUCALIPTO SUBMETIDO À DISTINTAS CONDIÇÕES DE MANEJO E SÍTIO FLORESTAL

1. INTRODUÇÃO

Com uma área total aproximadamente de 7,5 milhões de hectares, o gênero *Eucalyptus* apresenta a maior área de florestas plantadas do Brasil (75% do total). Com sua origem na Austrália, são mais de 730 espécies reconhecidas botanicamente. Diferentemente de outros países, no Brasil as florestas de *Eucalyptus* são cortadas precocemente, com cerca de 7 anos (KLEIN; LUNA, 2023). Sendo que, a produtividade, indicada pelo incremento médio anual de madeira (IMA), brasileira foi de 38,9 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ em 2021 (IBÁ, 2022).

Amplamente utilizada e adaptada às condições de sítio brasileiro, as espécies de eucalipto têm sido preferencialmente utilizadas devido ao seu rápido crescimento, capacidade de adaptação às diversas regiões e condições de sítio, potencial econômico fornecido pela utilização da sua madeira e pela sua versatilidade, permitindo sua utilização para múltiplos fins: energia, laminação, serraria, medicamentos, cosméticos, entre outros.

Um dos usos com maior exploração comercial e com forte crescimento nos últimos anos é a produção de celulose. O Brasil se encontra na segunda posição entre os produtores de celulose, atingindo a marca recorde no ano de 2022 com 25 milhões de toneladas, um incremento de 10,9% na comparação anual, ficando atrás somente dos Estados Unidos da América (> 50 milhões de toneladas). No quesito exportação, o Brasil obteve um grande avanço no último ano, com salto de 22% alcançando a marca de 19,1 milhões de toneladas exportadas, se destacando em primeiro lugar, ultrapassando o Canadá (IBÁ, 2022).

A nível nacional, o estado do Mato Grosso do Sul se destaca com grandes unidades fabris para produção de celulose instaladas no seu território e outros grandes projetos em fase de implantação. De acordo com a Associação Sul-mato-grossense de produtores e consumidores de Florestas Plantadas – REFLORE -MS, o estado conta hoje com 1,4 milhão de hectares em área de floresta plantada e possui uma projeção de crescimento de 42,8% para os próximos sete anos, alcançando a marca de 2 milhões de hectares em 2030. A área plantada de *Eucalyptus* no estado

representa 13% da área total nacional, com a principal destinação para a produção de celulose. O município de Três Lagoas-MS, se destaca com a maior área plantada (263921 ha) de *Eucalyptus* (IBGE, 2021). Apesar do destaque da região, modelagens agroclimáticas identificaram que o município de Três Lagoas – MS ainda apresenta um potencial produtivo médio de IMA de 79,3 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, entretanto, o IMA atual é de 45,6 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (ELLI et al., 2019). Dentre os fatores limitantes, o déficit hídrico é apontado como o principal responsável (76,6%) da lacuna de produtividade para a região (ELLI et al., 2019).

Tendo em vista a questão do déficit hídrico, a adoção da técnica de irrigação aparece como uma opção. No entanto, é de conhecimento que a adoção de irrigação em cultivos comerciais de eucalipto em larga escala e ao longo de todo o ciclo, não é uma prática usual e é pouco difundida. O cultivo do eucalipto irrigado apresenta algumas particularidades e complexidades da sua ecofisiologia, fazendo-se necessário uma análise mais holística no momento da adoção da técnica, concepção do projeto e respectiva seleção dos materiais genéticos. Fatores como: distribuição e profundidade de raízes, densidade da madeira, alocação de carbono, espaçamento entre plantas, eficiência na absorção e utilização de nutrientes, taxa de incremento, plasticidade do material genético, altura potencial e susceptibilidade à danos ocorridos por vento, são alguns fatores que devem nortear a tomada de decisão na adoção desta tecnologia.

Uma visão interdisciplinar e transversal entre as diferentes áreas do conhecimento (Fisiologia, genética, climatologia, nutrição, física dos solos, engenharia de irrigação) faz-se necessário a fim de se obter uma melhor compreensão de todos os fatores produtivos e suas respectivas interações que em conjunto irão determinar a produtividade potencial a ser atingida.

Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo a análise do desempenho de seis diferentes materiais genéticos submetidos à suplementação de água via irrigação e diferentes níveis e parcelamento de adubação, além dos respectivos objetivos específicos: (i) caracterização do perfil de crescimento dos materiais genéticos submetidos à diferentes tratamentos; e (ii) Identificação da influência do sítio florestal no desempenho dos materiais genéticos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido em dois sítios florestais na região Costa Leste do estado do Mato Grosso do Sul entre os municípios de Três Lagoas e Selvíria, com características distintas em relação às características físico-hídricas do solo. Os sítios estão separados à uma distância de quinze quilômetros em linha reta e apresentam a mesma classificação climática e pedológica: clima tropical Aw (classificação de Koppen-Geiger), com verão quente e úmido e inverno seco. A precipitação média anual é de 1294mm (Normal Climatológica 1981 – 2010 INMET), a temperatura do ar média anual varia de 20,3°C a 27,0 °C; latossolo vermelho. As mudas de eucalipto foram alocadas em um espaçamento de 3,40m x 2,60m perfazendo um total de 1131 árvores/hectare.

O primeiro sítio está localizado na Fazenda Barra Dourada (20° 31' S 51° 44' W). Apresenta teores médios (camada de 0 – 100cm): argila 12%, areia total 86,75% (areia grossa 11,75% e areia fina 75%) e silte 1,25%. Densidade do solo média é de 1,48 gcm⁻³ e porosidade total de 35%. O transplântio das mudas ocorreu no dia 21/04/2021.

O segundo sítio florestal está localizado na Fazenda Da Mata II (20°29' S 51°31'W). Com teores médios (camada de 0 – 100cm): argila 30,5%, areia total 67,5% (areia fina 46% e areia grossa 21,5%) e silte 2%. Apresenta uma densidade média de 1,39 gcm⁻³ e uma porosidade total de 39%. O transplântio das mudas ocorreu no dia 25/05/2021. Os valores referentes à capacidade de água disponível no solo para ambos os sítios florestais estão detalhados na tabela 1.

Tabela 1 - Análise da capacidade de água disponível no solo por sítio florestal.

Sítio Florestal	Camada do solo (cm)	CC g/g	PMP g/g	Ds g/cm ³	AD (kg/kg)	CAD (m ³ /m ³)	CAD média (m ³ /m ³)
Sítio Florestal I	0-20	0,12	0,01	1,55	0,11	0,176	0,1617
	20-40	0,13	0,01	1,48	0,12	0,177	
	40-70	0,10	0,01	1,45	0,09	0,131	
	70-100	0,12	0,01	1,45	0,11	0,164	
Sítio Florestal II	0-20	0,12	0,02	1,40	0,10	0,137	0,2028
	20-40	0,15	0,01	1,34	0,14	0,182	
	40-70	0,18	0,01	1,32	0,17	0,218	
	70-100	0,19	0,01	1,49	0,18	0,274	

CC: Capacidade de campo (g/g); PMP: Ponto de Murcha Permanente (g/g); Ds: Densidade do solo (g/cm³) Água disponível (kg/kg); CAD: Capacidade de Água disponível (m³/m³). Fonte: Autor (2024).

2.2 LAYOUT EXPERIMENTAL E CLONES AVALIADOS

Seis materiais genéticos foram submetidos à três tratamentos com quatro repetições em dois sítios florestais distintos, totalizando 144 unidades experimentais. Os tratamentos foram divididos em: (i) Testemunha – Cultivo convencional sem suplementação de irrigação e ou fertirrigação; (ii) Irrigado – Suplementação da demanda hídrica via sistema de irrigação; (iii) Fertirrigado – Suplementação da demanda hídrica e nutricional parcelada via sistema de irrigação.

Os materiais genéticos avaliados e os respectivos critérios para adoção foram: MG1, MG3, MG4, MG5 (*Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis*); com as características predominantes: Resistência estresse hídrico, densidade, densidade e rendimento, e crescimento respectivamente. O MG2 (*híbrido de Eucalyptus urophylla*) se apresenta com uma elevada adaptação e resistência a pragas, enquanto o MG6 (*Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis*) x *Eucalyptus urophylla*) se destaca pela resistência ao estresse hídrico. Cada material genético apresentava 4 parcelas (repetições), que por sua vez continham 3 linhas com 15 plantas/linha, totalizando 45 plantas/parcela e uma área de 400m².

2.3 MANEJO NUTRICIONAL

Os manejos nutricionais adotados se diferenciaram na dose e no seu respectivo método de aplicação e parcelamento. Para todos os tratamentos foi considerado previamente ao plantio a correção da acidez com a aplicação de 1900kg ha⁻¹ de calcário dolomítico (35% CaO + 12% MgO).

Os tratamentos I e II (testemunha e irrigado) apresentaram um manejo da fertilização similar. A estratégia consistiu em um parcelamento subdividido em pré-plantio, fertilização de base com 250 kg/ha de organomineral e 150 kg/ha de super simples convencional, primeira cobertura após seis meses de plantio com aplicação de 270kg/ha de NK mais micronutrientes (10-00-33 + 12S + 0,4%B + 0,4Cu + 0,4%Zn), segunda cobertura com dez meses de plantio de 420 kg/ha de NK mais enxofre e boro (09-00-30 + 7%S + 1,8%B), e uma terceira cobertura aos quatorze meses de idade com suplementação de N, S, B, Cu, Zn. O detalhamento do montante aplicado por nutriente se encontra na tabela 2.

Tabela 2 - Dose dos nutrientes aplicadas no manejo I e II.

Época	Nutrientes aplicados (kg/ha)								
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Zn
Pré-plantio				475	137				
Base	22	113	40	49		44	0,93	1,24	1,55
1ª cobertura	27		89			35	1,08	1,08	1,08
2ª cobertura	38		126			29	7,56		
3ª cobertura	137					20	6,24	6,24	6,24
Total	224	113	255	524	137	128	15,81	8,56	8,87

Fonte: Autor (2024).

O manejo nutricional para o tratamento III foi igual ao detalhado para o manejo I e II, no entanto após o décimo quinto mês iniciou-se a suplementação de nutrientes via sistema de irrigação. A recomendação dos nutrientes variou para cada sítio florestal e foi condicionada ao monitoramento nutricional através da coleta e análises foliares realizadas aos doze e dezoito meses após o plantio.

O procedimento para a coleta de folhas se baseou em seleção de quinze ramos por árvore, alocados nos quatros diferentes pontos cardeais na parte superior do terço médio. Após a coleta dos ramos, quatro folhas do terço médio foram coletadas de cada ramo, totalizando sessenta folhas coletadas por árvore.

A partir da primeira análise foliar, foi elaborada uma recomendação de adubação específica para cada sítio florestal. A escolha dos fertilizantes era de acordo com a demanda nutricional, questões operacionais, compatibilidade química para mistura e análise química da água de irrigação. Para o sítio florestal I, a suplementação nutricional via o sistema de irrigação se iniciou no décimo quinto mês após o plantio. Um parcelamento equitativo semanal a partir do décimo quinto até o vigésimo mês foi realizado totalizando vinte e quatro aplicações. Foram aplicados 45 kg/ha de ácido bórico, 69 kg/ha de sulfato de amônio, 35kg/ha de sulfato de zinco, 28,3kg/ha de sulfato de cobre e 318 kg/ha de ureia. Para o sítio florestal II, os fertilizantes utilizados foram os mesmos, no entanto em doses diferentes: 58 kg/ha ácido bórico, 90 kg/ha sulfato de amônio, 13kg/ha de sulfato de zinco, 7kg/ha sulfato de cobre e 366 kg/ha de ureia.

Após a segunda análise foliar, uma nova recomendação de adubação foi elaborada e as aplicações ocorreram no intervalo do vigésimo sexto mês até o trigésimo mês após o plantio. Para sítio florestal I, os fertilizantes e as respectivas

doses foram: 170 kg/ha de Cloreto de Potássio KCl, 117kg/ha de fosfato monoamônico MAP e 630 kg/ha de sulfato de magnésio. Para o sitio florestal II foram aplicados 363 kg/ha de fosfato monopotássico MKP e 688kg/ha de sulfato de potássio SOP. O acumulado das aplicações de fertirrigação estão detalhados na tabela 3.

Tabela 3 - Dose de nutrientes aplicados via fertirrigação no tratamento III.

	Dose de Nutrientes aplicados via Fertirrigação (kg/ha)							
	N	P	K	Mg	S	B	Cu	Zn
Sítio I	173,1	57,9	176,9	49,6	138,8	7,6	7,1	7,0
Sítio II	188,3	109,1	272,8	0,0	91,2	9,8	1,6	2,7

Fonte: Autor (2024).

Para cada aplicação, o fertilizante foi solubilizado em 1800 L de água e injetada na adutora por meio do injetor (FertiOne™, Netafim®) por três horas, com uma taxa de injeção de 600 L h⁻¹. Em geral, a fertirrigação foi realizada no terço final do tempo de irrigação. O tempo de injeção e tempo de limpeza da fertirrigação foi suficientemente longo para garantir uma uniformidade de distribuição do fertilizante equivalente à uniformidade de distribuição da água (DA SILVA et al., 2022).

2.4 SISTEMA E MANEJO DE IRRIGAÇÃO

O sistema de irrigação adotado foi gotejamento com gotejadores autocompensantes - Dripnet PCAS 16250™, Netafim®, espaçados em 0,45 metros na linha, com uma taxa de aplicação de 1,3mm/hora. Cada tratamento foi alocado em um setor de irrigação com 84 linhas de plantio com um comprimento de 112 metros, incluindo todos os materiais genéticos em estudo e totalizando uma área de 3,125 hectares/setor. Cada setor funciona de maneira individualizada possibilitando a adoção dos manejos de forma independente.

A estratégia para o manejo da irrigação consistiu em repor a totalidade da evapotranspiração do cultivo (ET_c), adotando turno de rega variável e uma profundidade de raiz efetiva de um metro de profundidade. A estimativa da ET_c foi realizada pelo método FAO modificado (BERNARDO et al., 2019). O referido método se baseia na utilização da evapotranspiração de referência (ET_o), estimado pela metodologia de Pennam-Monteith (ALLEN et al., 1998), além de um coeficiente de cultivo – K_c (ALLEN et al., 1998; DORENBOS & PRUITT, 1977), acompanhado de um

coeficiente de estresse hídrico – K_S e um coeficiente de localização - K_L . O método adaptado é representado pela equação 1:

$$ET_C = ET_0 \times K_C \times K_S \times K_L \quad (1)$$

Onde, ET_C é a evapotranspiração do cultivo (mm^{-1}dia); ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm^{-1}dia); K_C é o coeficiente de cultivo, adimensional e variável de acordo com o estágio fenológico. Inicialmente foram utilizados valores de K_C advindos da literatura (ALVES et al., 2020) que posteriormente foram adaptados a partir de um monitoramento da água disponível no solo com coleta e análise da umidade gravimétrica. O K_S coeficiente de estresse hídrico, adimensional, valores diários de acordo com a água disponível para o cultivo (BERNARDO et al., 2019); e o K_L coeficiente de localização, diretamente relacionado à porcentagem de área molhada (PAM) ou porcentagem de área sombreada (PAS), utilizando-se o maior valor dentre essas porcentagens, de acordo com a metodologia proposta por Fereres em 1981 (VILLALOBOS & FERERES, 1990).

2.5 MENSURAÇÃO FLORESTAL E ANÁLISE EXPLORATÓRIA

O acompanhamento do desenvolvimento do cultivo foi realizado através de inventários florestais realizados a partir dos doze meses de idade e com intervalos a cada seis meses (12, 18, 24 e 30 meses de idade). Cada material genético apresentava quatro parcelas para cada tratamento, sendo composto por três linhas com quinze árvores cada, totalizando quarenta e cinco árvores com uma área total de aproximadamente quatrocentos metros quadrados. Todos os indivíduos da parcela foram medidos em relação à CAP - circunferência na altura do peito (1,30m) com o auxílio de fita métrica e conseqüentemente transformado em DAP – Diâmetro na altura do peito, HT – altura total com a utilização de um hipsômetro digital, a partir destas informações o volume foi estimado de acordo com a equação alométrica ajustada para cada clone. Para representar a estimativa de volume foi considerado o volume comercial com casca, representado pela sigla VCCC (m^3/ha).

Para uma compreensão mais objetiva da variabilidade e desempenho dos materiais genéticos e tratamentos ao longo das medições florestais, os dados foram representados graficamente em boxplot. Juntamente à esta representação gráfica, os

dados de produtividade foram trabalhados de maneira a exibir o incremento corrente entre as medições florestais em volume e porcentagem. Considerando as equações 2 e 3.

$$I_C (m^3/ha) = VCCC_{IF (n)} - VCCC_{IF (n-1)} \quad (2)$$

$$I_C \% = 100 X ((VCCC_{IF (n)} - VCCC_{IF (n-1)})/VCCC_{IF (n-1)}) \quad (3)$$

Onde VCCC é volume comercial com casca (m³/ha), IF é inventário florestal (medição florestal).

Complementar às análises previamente mencionadas, foi proposto a aplicação de uma metodologia básica de separatrizes considerando a estratificação dos dados de produtividade em decis. Essa metodologia é denominada de Método de Distribuição de Decis – MDD (MADUREIRA, 2021) e permite uma visualização macro da distribuição das produtividades florestais de acordo com o sítio florestal, tratamento e material genético. Para a análise, se faz necessário: (i) ordenar (crescente) os volumes obtidos (valores por árvore); (ii) calcular os decis (1 a 10) dos volumes obtidos; (iii) assinalar para cada árvore a classe de decil correspondente; (iv) a partir da utilização de uma tabela dinâmica permitir a utilização de filtro por sítio florestal, material genético ou tratamento e obter a frequência absoluta de árvores em cada classe de decil; (v) obtenha a frequência relativa a partir da divisão da frequência absoluta pelo número total de árvores do sítio florestal, material genético ou tratamento.

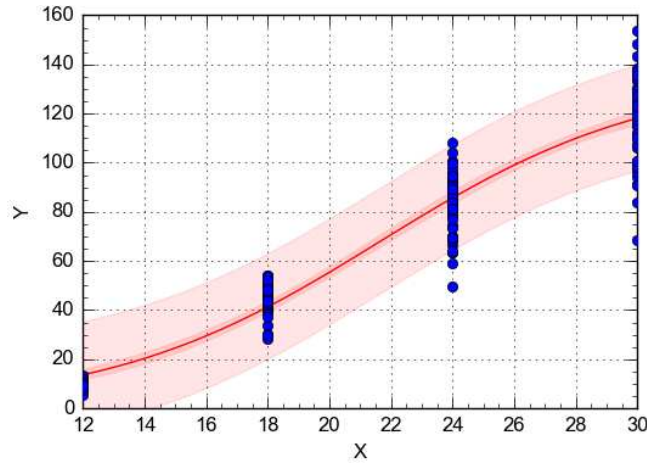
2.6 MODELAGEM DA CURVA DE CRESCIMENTO

Com base nos dados obtidos nos inventários florestais contínuos (12, 18, 24 e 30 meses), foi elaborado curvas de crescimento a partir de equações logísticas (Equação 4) ajustadas por material genético, tratamento e sítio florestal. As respectivas equações ajustadas foram submetidas à integração da curva volumétrica de produção (Equação 5) considerando o acumulado no período total (12 – 30 meses) e de maneira estratificada, considerando os intervalos entre medições florestais (12 – 18; 18 – 24; 24 – 30 meses). A figura 1 demonstra como as curvas foram ajustadas ao modelo.

$$Y = \frac{a}{(1+be^{-cx})} \quad (4)$$

$$\int_{IF x}^{IF x+1} f(x) dx \tag{5}$$

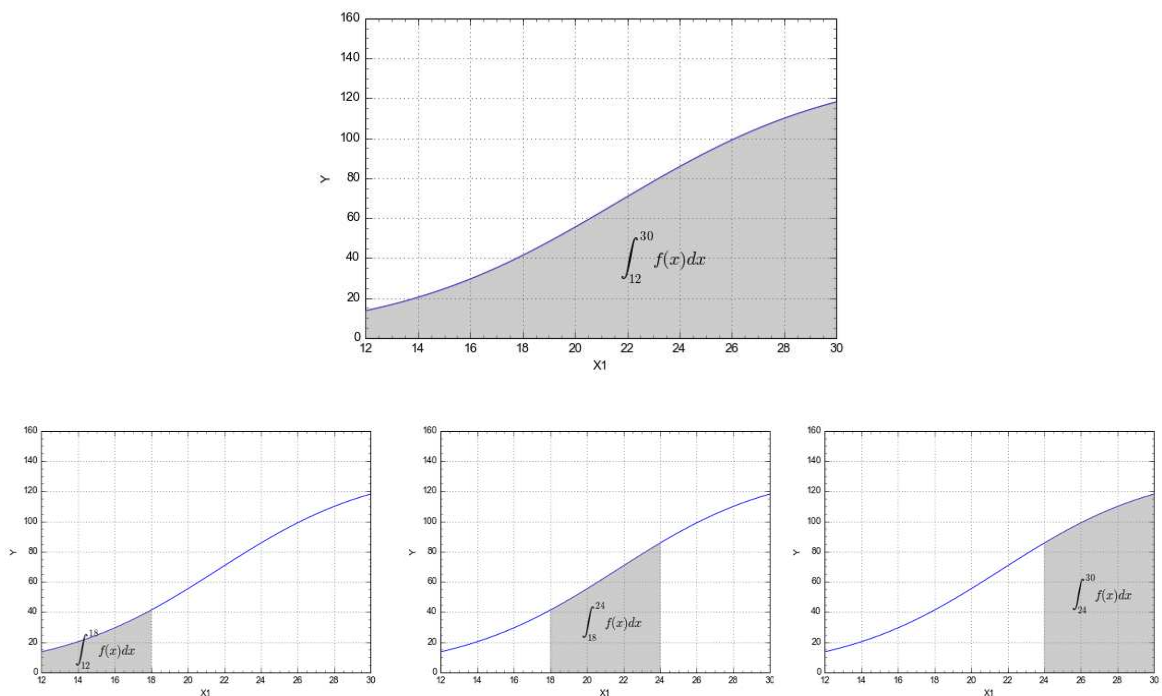
Figura 1 - Exemplo de distribuição das medições florestais e o respectivo ajuste da curva logística.



Fonte: Autor (2024).

A partir da integração das respectivas curvas de crescimento ajustadas, foi possível estimar a diferença relativa (%) entre tratamentos de acordo com o material genético, sítio florestal e medições florestais (Figura 2).

Figura 2. Exemplo da curva de crescimento acumulado e estratificado de acordo com as medições florestais.



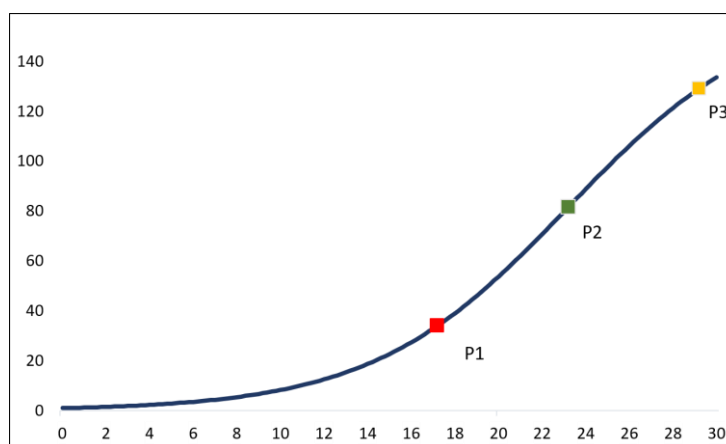
Fonte: Autor (2024).

2.7 DEFINIÇÃO DOS PONTOS CRÍTICOS NA CURVA DE CRESCIMENTO

Para uma análise mais detalhada e exploratória das curvas de crescimento, foi proposto uma derivação matemática das curvas obtidas no tópico 2.6 para cada material genético submetidos à diferentes tratamentos e sítios florestais. A partir desse processo matemático foi identificado três momentos que auxiliam na compreensão da resposta de cada material em relação às condições de cultivo.

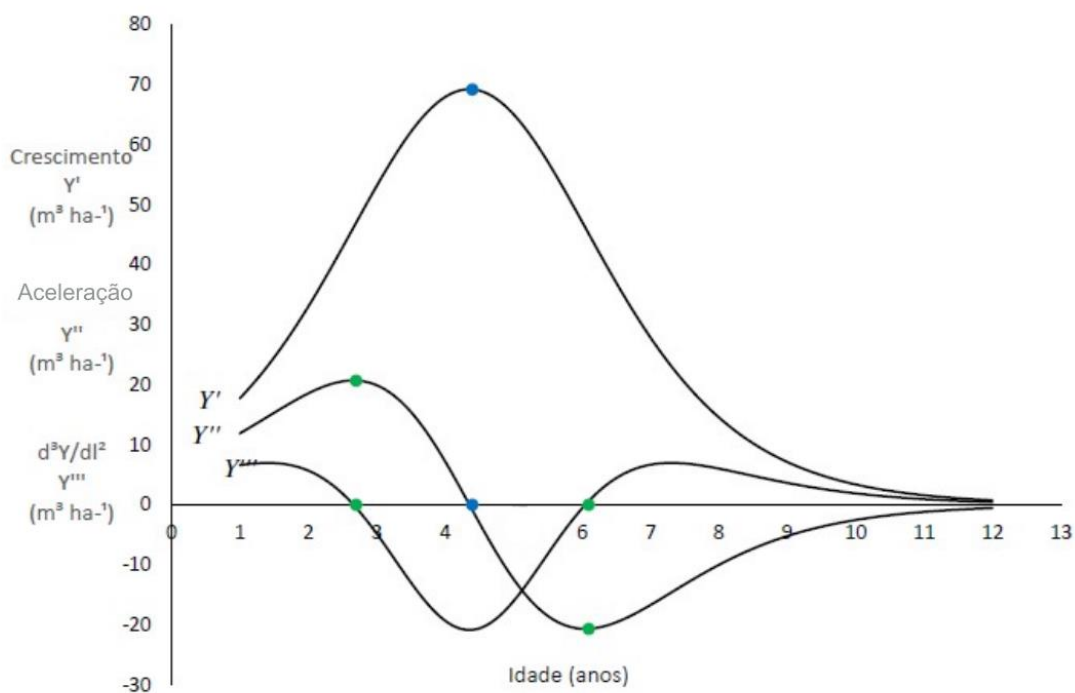
Esses momentos são identificados pelos pontos P1, P2 e P3 na figura 3. Onde o P1 pode ser considerado a idade de máxima aceleração do crescimento, o P2 representa o pico da taxa de crescimento e o P3 o é a idade de máxima desaceleração do crescimento (BARROS, 2021, CORDIDO, 2019, MADUREIRA, 2021).

Figura 3 - Exemplo da curva de crescimento com a respectiva definição dos pontos de interesse.



Fonte: Autor (2024).

A exibição gráfica das curvas de derivação está representada na Figura 4. Os pontos de interesse são obtidos a partir da derivação da curva de crescimento e obtenção da curva Y' . A curva Y' passará por outra derivação e será igualada a zero, gerando a curva Y'' . Essa curva representa a aceleração do crescimento e possibilita a identificação do ponto onde a aceleração é nula (P2 – Ponto) e ocorre a maior taxa de incremento. Nesta mesma curva é possível visualizar os pontos de máxima e mínima aceleração (P1 e P3), para a obtenção dos respectivos momentos (idades) do P1 e P3, se faz necessário uma nova derivação da curva Y'' e iguala-la a zero, gerando a curva Y''' .

Figura 4 - Derivadas da curva de crescimento

Fonte: Barros (2021).

2.8 MODELAGEM DAS VARIÁVEIS RESPOSTAS

Para análise dos desempenhos dos materiais genéticos em relação aos diferentes tratamentos, foi adotado o Modelo Linear Generalizado Misto – GLMM através do pacote LME4 do repositório r. A partir da adoção desta metodologia foi possível incluir os efeitos aleatórios e trabalhar com dados longitudinais, considerando um agrupamento pré-existente das parcelas nos respectivos talhões e os diferentes perfis de crescimento dos materiais genéticos submetidos à diferentes tratamentos ao longo das medições florestais.

Nove diferentes modelos foram elaborados considerando a variáveis respostas VCCC (Volume comercial com casca), DAP (Diâmetro da altura do peito), e HT (Altura total) em relação às variáveis explicativas: material genético, tratamento e a interação das duas. Foram considerados as informações referentes aos inventários florestais referentes aos 18, 24 e 30 meses de idade (Todos os inventários a partir da implantação do sistema de irrigação). Foram considerados 22415 medições referentes aos três inventários, dois sítios florestais, três tratamentos e seis materiais genéticos.

Para a elaboração do modelo foi utilizado a função GLMER do pacote LME4. Foi adotado um aninhamento Inventário/Sítio Florestal/Parcela e a distribuição Gaussiana dos dados. Um diagnóstico avançado de pressupostos foi realizado através do pacote DHARMA, onde foi avaliado a homogeneidade da variância pelo Teste de Levene e normalidade dos dados por Kolmogorov- Smirnov.

Para testar os modelos e verificar a possibilidade de simplificação, foi aplicado a função DROP1 com o teste de chi- quadrado. Em sequência, um modelo nulo para testar a aleatoriedade foi elaborado e testado juntamente com os modelos criados anteriormente. Para este teste foi utilizado a função anova, gerando uma tabela de variância com o Teste de Fisher ($\alpha = 0,05$), chi-quadrado, deviance, Critério de Informação de Akaike – AIC, e Critério Bayesiano de Schwarz – BIC.

2.9 AVALIAÇÃO DOS MODELOS E COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DE MÉDIAS

Para seleção dos modelos que melhor explicaram as variáveis respostas (VCCC, DAP e HT) relacionadas ao desempenho do cultivo de eucalipto, foi considerado os modelos com os menores valores de AIC, BIC e os maiores valores de Chi-quadrado para cada variável resposta.

Os modelos selecionados foram submetidos à uma estimativa de médias de mínimos quadrados, a partir do pacote *emmeans*®. Após a determinação das médias, um teste *post hoc* e comparações múltiplas entre pares foi aplicado para identificar quais médias diferem a partir do pacote *multcomp*® com a função *cl*. O teste Tukey foi adotado com um $\alpha = 0,05$.

2.10 ANÁLISE DO DESEMPENHO DE ACORDO COM O SÍTIO FLORESTAL

Para uma análise mais detalhada e uma melhor compreensão do desempenho dos materiais genéticos submetidos à diferentes tratamentos em distintos sítios florestais, foi realizado uma análise estratificada por tratamento, considerando o desempenho de cada material genético em relação ao sítio florestal.

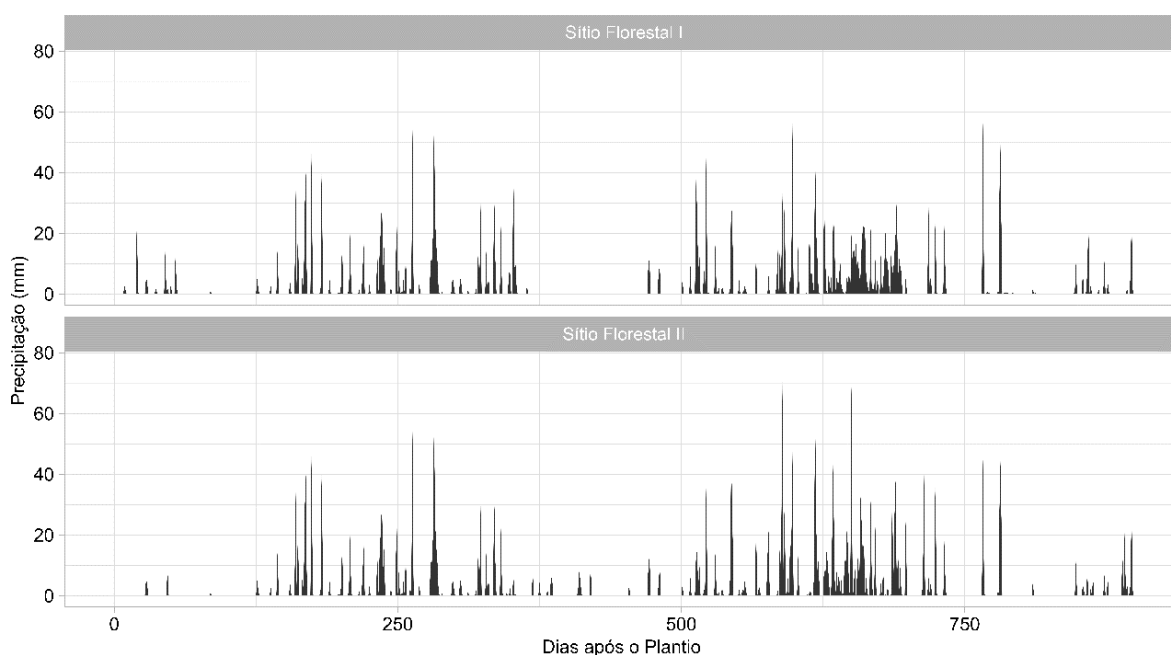
A metodologia estatística aplicada foi similar à mencionada anteriormente para todos os dados, no entanto foi aplicado de maneira estratificada para cada tratamento. Foi considerado apenas a variável resposta VCCC em relação à interação das variáveis explicativas Material Genético e Sítio Florestal.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CLIMA E IRRIGAÇÃO

As variáveis climáticas monitoradas desde o transplante das mudas até o último inventário florestal possibilitou compreender o comportamento dos materiais em campo e identificar períodos de estiagem e variação da demanda evapotranspirométrica ao longo do ciclo (Figura 5). As precipitações acumuladas variaram entre os sítios florestais: O sítio florestal II apresentou um volume acumulado de 2638mm, seguido pelo sítio florestal I com 2529mm. Essa diferença se deu basicamente no período avaliado em 2023, onde a diferença de precipitação entre sítios foi de 105mm maior para o sítio II.

Figura 5 - Distribuição Pluviométrica.



Fonte: Autor (2024).

A partir do monitoramento climático foi possível identificar uma variabilidade de precipitação em relação à normal climatológica (1981 – 2015 Três Lagoas-MS, INMET). A normal climatológica para o local do estudo é de 1294,4 mm, no entanto no ano de 2022 o acumulado de precipitação foi de 1032,1 e 1027,6mm para os sítios florestais I e II respectivamente, uma queda de 20% em relação à normal. Considerando apenas o período de janeiro a outubro para contrastarmos com o período de 2023, a normal climatológica é de 956mm, no entanto no ano de 2022 durante o mesmo período, foi registrado uma precipitação acumulada de 771 mm e

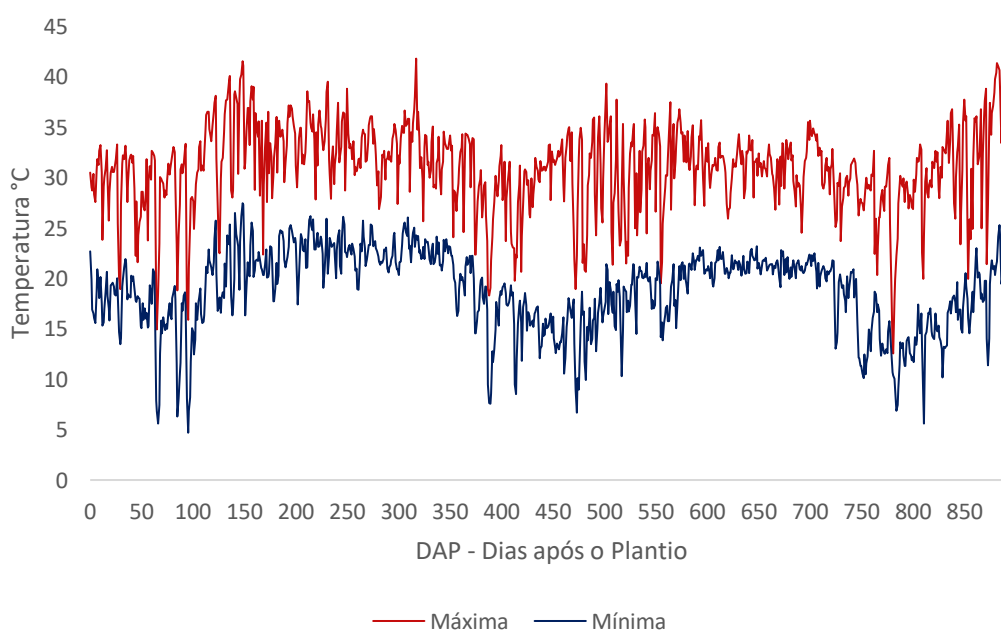
710mm, referente aos sítios florestais I e II, isso significou uma queda no volume acumulado de 19,3% e 25,7% respectivamente.

No ano subsequente o comportamento foi o inverso, com um volume acumulado (janeiro – outubro) de 1095,8mm e 1207,3 mm para os sítios I e II, expressando um incremento de precipitação de 14,6% e 26,3% para os respectivos sítios florestais.

Para o sítio florestal I, durante o período de 25/04/2022 (DAP 364) até o dia 07/08/2022 (DAP 469) foi registrado um longo e bem definido período de estiagem (105 dias) que coincidiu com início das irrigações nos setores tratamentos II e III. No ano subsequente, esse padrão de distribuição de chuvas não se repetiu e foram registrados seis eventos de precipitação com volume acima de 20mm/dia e um volume acumulado de 250,8mm entre os meses de abril a agosto (DAP 706 – 828). Esse volume e distribuição de chuva minimizou o déficit hídrico para o tratamento testemunha.

As demais variáveis meteorológicas não variaram significativamente entre sítios. As temperaturas registradas mostram um padrão do comportamento dessa variável para a região em estudo. Temperaturas mais amenas e variando de 15 a 28°C no período de maio a julho, e uma elevação da temperatura a partir de setembro com um intervalo médio de 19 a 32°C (Figura 6).

Figura 6 - Variação da temperatura máxima e mínima durante o período avaliado.

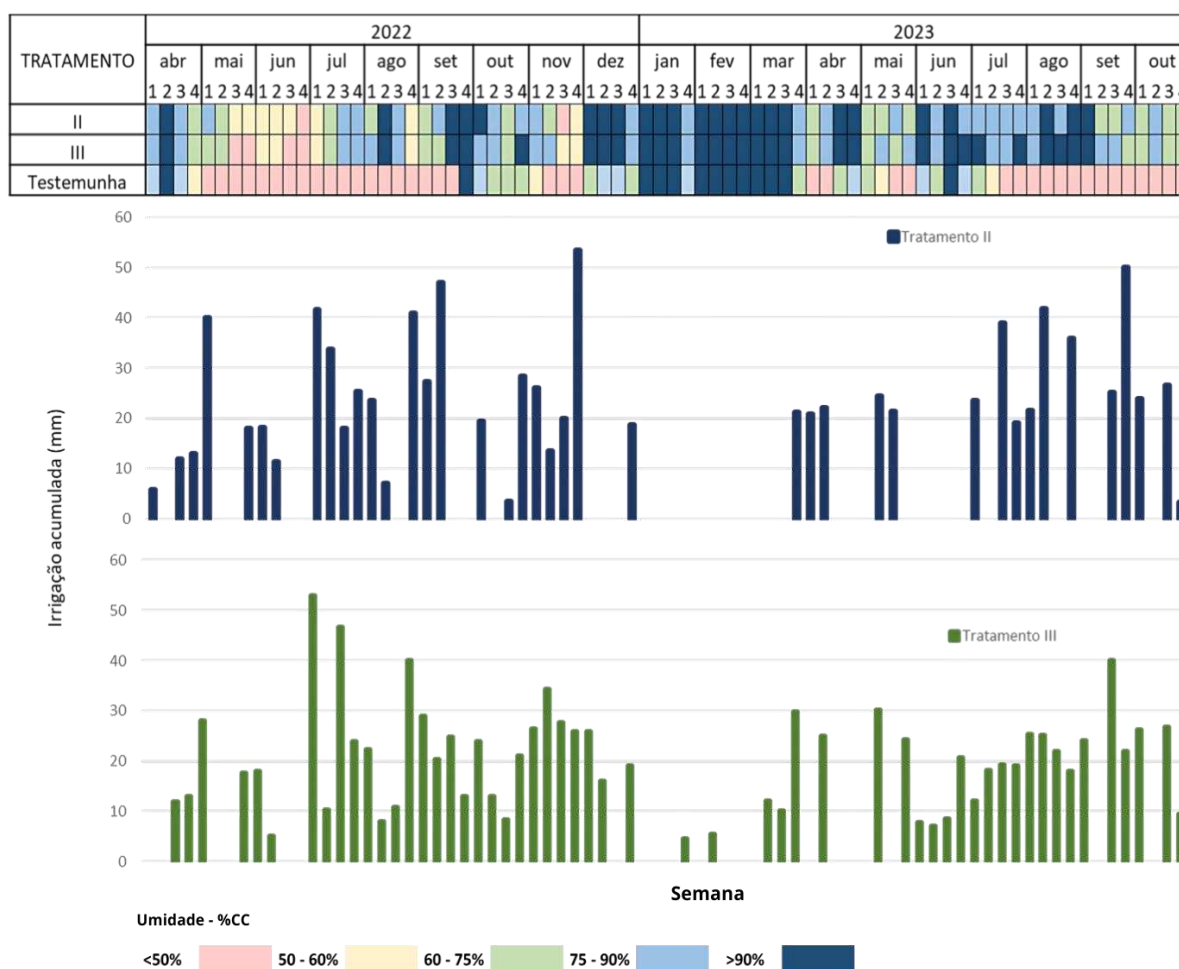


Fonte: Autor (2024).

A lâmina de irrigação aplicada para cada tratamento variou de acordo com o sítio florestal, volume e distribuição de precipitação, fila de prioridade e questões operacionais. Foi definido a prioridade dos setores do tratamento III, para alcançar o objetivo de aplicar e parcelar toda a recomendação de fertilizantes. As condições operacionais do sítio florestal I foram satisfatórias e não apresentaram limitação de água e ou energia, o que permitiu uma boa condução e aplicação da estratégia de manejo de irrigação.

A irrigação acumulada foi de 920 e 1065mm para os tratamentos II e III no sítio florestal I (Figura 7). Esse volume irrigado foi parcelado em 50 e 66 eventos de irrigação, perfazendo uma lâmina média de 18,5 e 16,2mm respectivamente. A aplicação de fertilizantes via o sistema de irrigação ocorreu 57 vezes, o que representou 86% das aplicações (irrigação) realizadas no tratamento III.

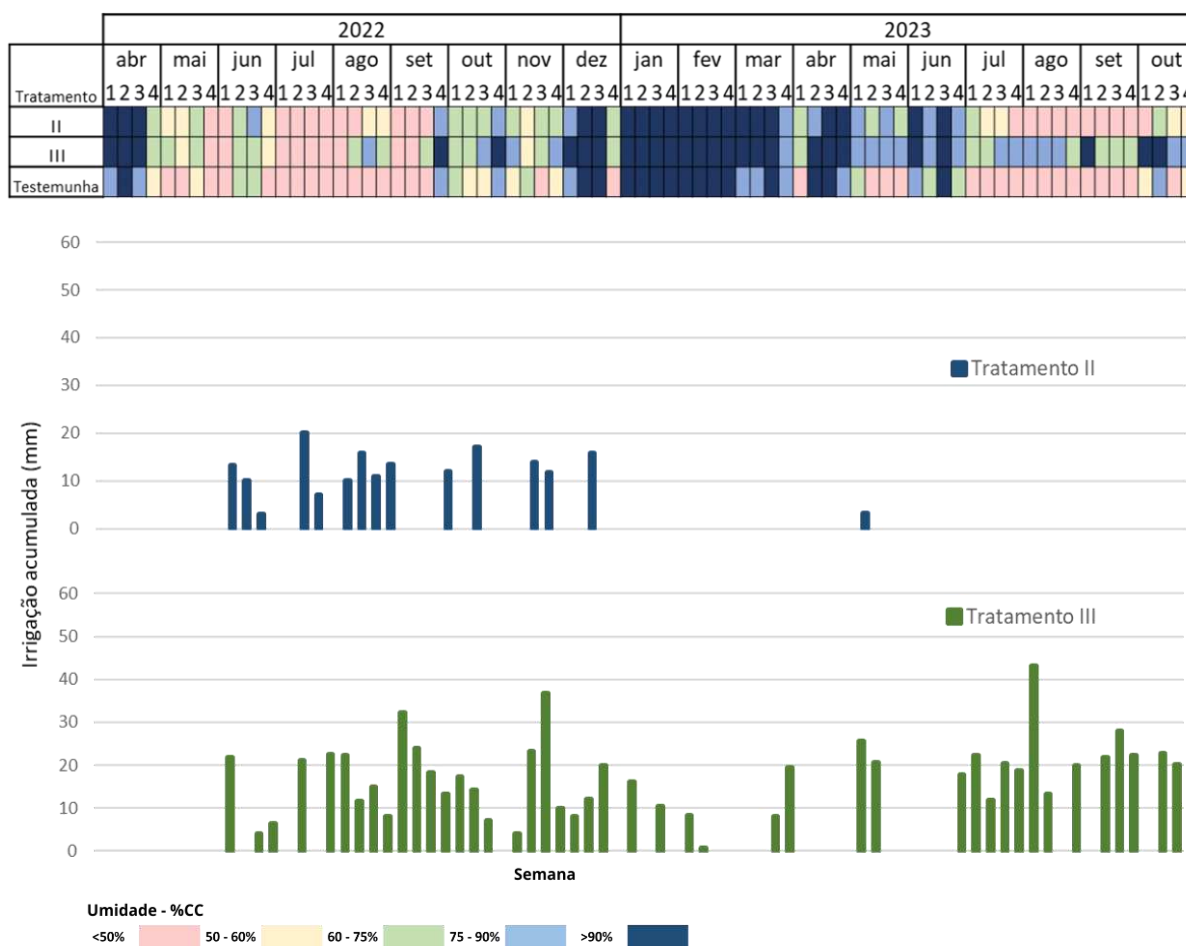
Figura 7 - Distribuição de irrigação e estimativa de umidade (% CC) para o sítio florestal I.



Fonte: Autor (2024).

No sítio florestal II – Tratamento II, devido a questões operacionais não foi possível irrigar toda a demanda do cultivo. Observa-se no gráfico da figura 8, que o volume irrigado foi pequeno e concentrado nos meses de junho a dezembro de 2022. Este tratamento acumulou 192mm, dividido em 15 aplicações com uma lâmina média de 12,8mm. O tratamento III foi priorizado e acumulou 730mm distribuídos em 42 aplicações, perfazendo uma lâmina média de 17,4mm. Semelhante ao sítio florestal I, o tratamento fertirrigado aplicou fertilizantes no sistema de irrigação em 80% dos eventos de irrigação.

Figura 8 - Distribuição de irrigação e estimativa de umidade (% CC) para o sítio florestal II.



Fonte: Autor (2024).

O compilado das informações de cada sítio e tratamento se encontra organizado na tabela 4.

Tabela 4 - Informações sobre irrigação e fertirrigação estratificado por tratamento e sítio florestal.

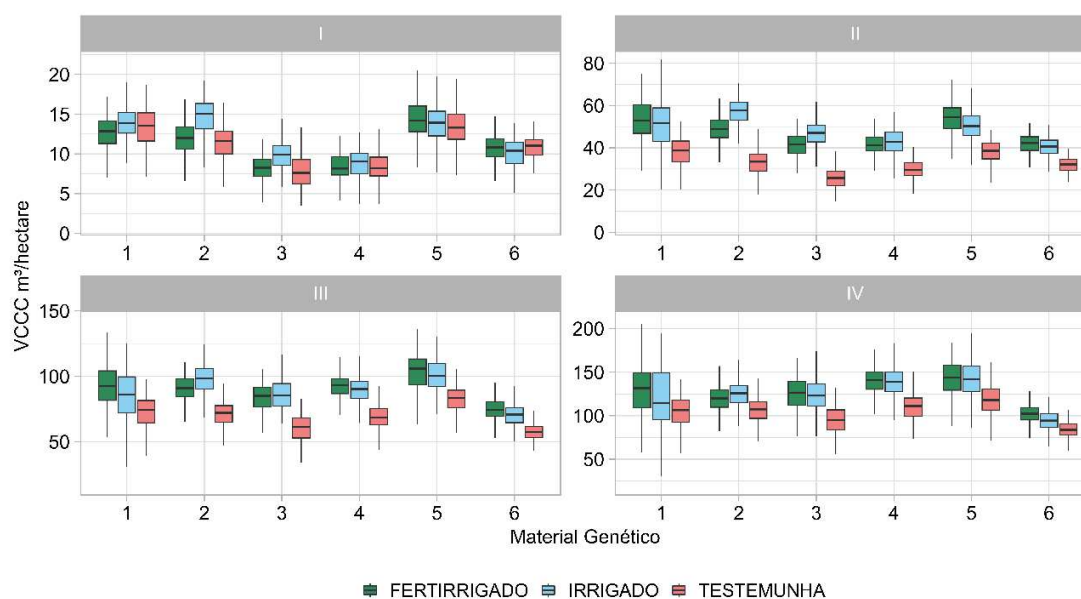
Sítio Florestal	Tratamento	Irrigação acumulada (mm)	Eventos de irrigação	Eventos de Fertirrigação	Lâmina média (mm)
Sítio Florestal I	Tratamento I				
	Tratamento II	920	50		18,5
	Tratamento III	1065	66	57	16,2
Sítio Florestal II	Tratamento I				
	Tratamento II	192	15		12,8
	Tratamento III	730	42	34	17,4

Fonte: Autor (2024).

3.2 DESEMPENHO FLORESTAL

A partir dos dados levantados nos inventários florestais (12, 18, 24 e 30 meses de idade) foi possível representar graficamente o desempenho de cada material genético submetido aos tratamentos em análise (Figuras 9 e 10). De maneira geral, podemos destacar que os resultados para o sítio florestal I se mostraram mais variáveis em relação à testemunha. Essa percepção vem em linha ao fato de o sítio ser mais arenoso e conseqüentemente uma menor capacidade de armazenamento de água, ter acumulado um menor volume de precipitação e não ter apresentado limitações operacionais na execução de irrigação e fertirrigação.

No segundo inventário é possível notar uma maior discrepância dos resultados, principalmente por representar o incremento após um período de estiagem e início da suplementação da irrigação e fertirrigação. Já no terceiro inventário é possível observar que ainda existe uma discrepância, no entanto com uma diminuição dessa vantagem pelo tratamento testemunha, evidenciando a capacidade de crescimento compensatório.

Figura 9 - Desempenho florestal ao longo das medições contínuas – Sítio Florestal I.

Fonte: Autor (2024).

Dentre os materiais em análise, destaca-se o MG6 por sua uniformidade e baixa variabilidade dos valores de volume. Por outro lado, temos o MG1 com uma forte variabilidade nos tratamentos II e III. O MG5 se destaca pelo seu perfil de crescimento rápido, observado desde a primeira medição, alcançando um volume acima de 140m³/hectare nos tratamentos II e III no quarto inventário. Os materiais 3 e 4 se apresentam como clones mais exigentes e desempenham um crescimento relativo maior em relação à testemunha, 32,8% e 26,6% respectivamente. E por último o material MG2 que inicialmente se diferenciou muito da testemunha, no entanto após períodos de não limitação de recursos demonstrou uma forte capacidade de crescimento compensatório e plasticidade. Os valores médios de produtividade do inventário florestal de 30 meses de idade estão apresentados na tabela 5.

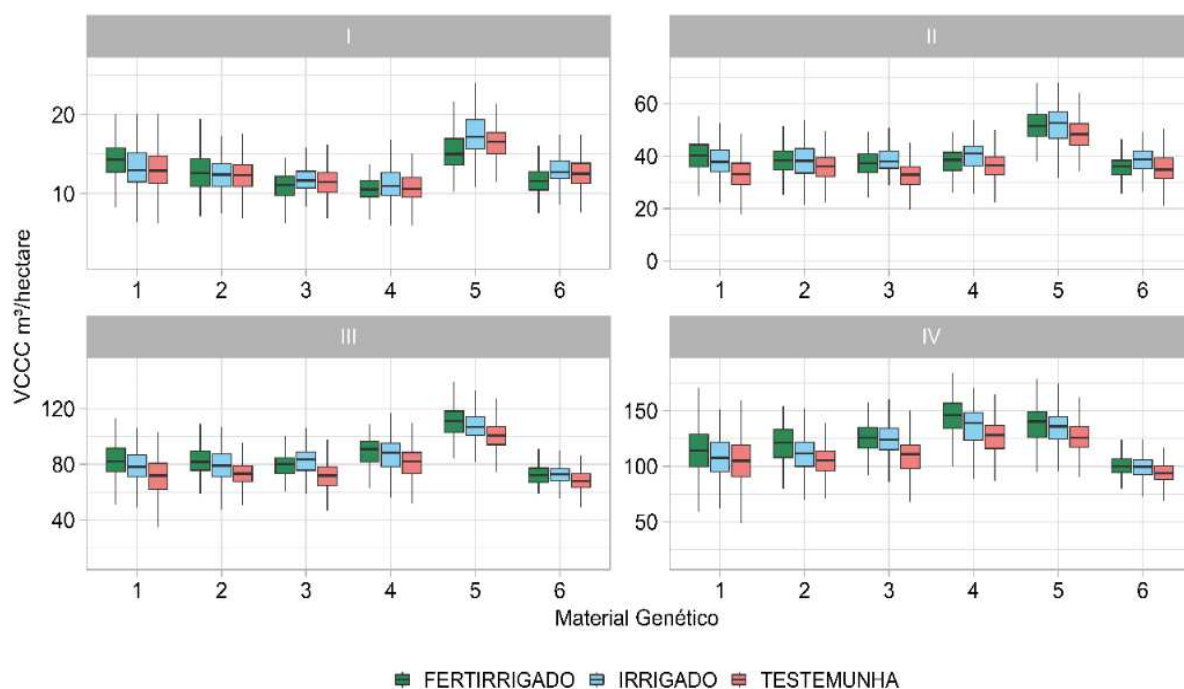
Tabela 5 - Valores médios de VCCC m³/hectare referentes ao inventário florestal IV –Sítio Florestal I.

Material Genético	VCCC m³/hectare		
	Testemunha	Tratamento II	Tratamento III
1	104,3	119,0	127,8
2	104,2	122,3	116,7
3	94,4	121,4	125,3
4	108,0	135,2	136,7
5	116,3	141,5	140,9
6	83,6	93,2	101,8

Fonte: Autor (2024).

Considerando o sítio florestal II, o comportamento dos materiais genéticos e os respectivos tratamentos foi similar ao observado no sítio florestal I, no entanto em uma menor magnitude. Apesar dos materiais submetidos aos tratamentos II e III se apresentarem como mais produtivos, em linha com o que foi observado no sítio florestal I, a discrepância entre os tratamentos II e III em relação à testemunha foi reduzida. Em termos de valores médios os materiais submetidos aos tratamentos no sítio florestal I obtiveram um incremento de produtividade de 21,3%, já no sítio florestal II esse incremento foi de apenas 9,1%. O perfil de distribuição das produtividades ao longo das medições contínuas está exposto na figura 10.

Figura 10 - Desempenho florestal ao longo das medições contínuas – Sítio Florestal II.



Fonte: Autor (2024).

O MG 5 confirmou sua aptidão para crescimento rápido e demonstrou o mesmo perfil de crescimento. Os materiais 3 e 4 também reforçaram o resultado de maior crescimento relativo e uma maior exigência em relação à recursos. O MG6 destacou novamente sua elevada uniformidade e baixa produtividade. Os valores médios do desempenho de cada material e respectivo tratamento estão explicitados na tabela 6.

Tabela 6. Valores médios de VCCC m³/hectare referentes ao inventário florestal IV –Sítio Florestal II.

Material Genético	VCCC m ³ /hectare		
	Testemunha	Tratamento II	Tratamento III
1	104,4	107,7	113,4
2	104,2	109,6	118,7
3	108,8	123,7	123,2
4	123,1	133,4	139,8
5	126,3	134,0	138,3
6	93,2	98,8	99,8

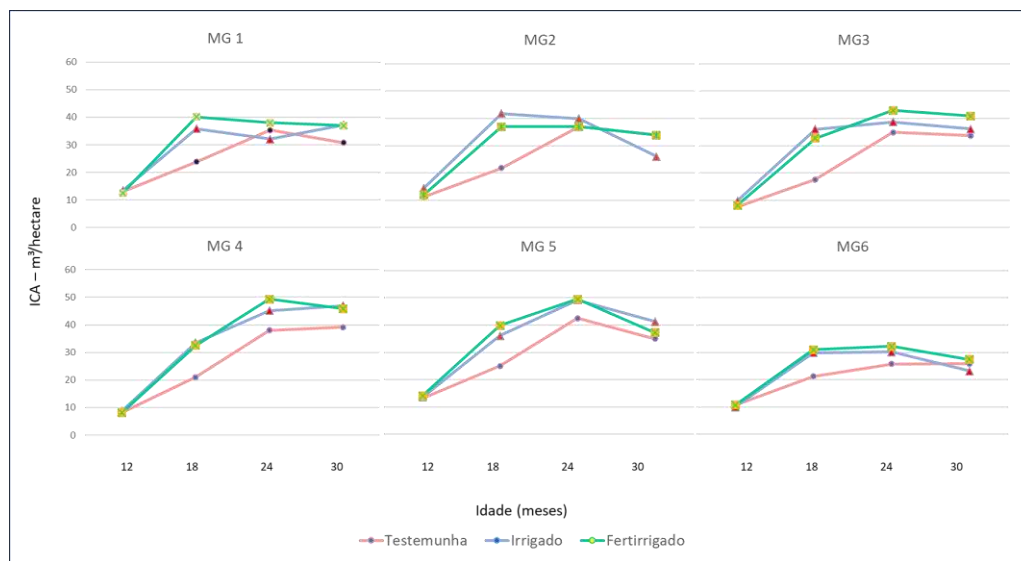
Fonte: Autor (2024).

Complementar às análises gráficas previamente apresentadas, a avaliação do incremento entre as medições florestais trouxe interpretações mais detalhadas em relação ao desempenho dos materiais submetidos à diferentes tratamentos e sítios. Além de permitir uma análise mais refinada em comparação com o volume acumulado. Nas tabelas 7 e 8, os valores absolutos de incremento e volume acumulado, além do incremento relativo dos tratamentos II e III em relação a testemunha estão apresentados para os sítios I e II respectivamente. O sítio florestal I apresentou os maiores incrementos relativos, com destaque para os materiais MG1, MG2 e MG3 na segunda medição florestal com valores variando de 52 a 100% de ganho incremental. Destaca-se que esta medição foi a primeira após a implantação do sistema de irrigação e ocorreu após um período seco. Os maiores incrementos absolutos foram observados na medição de 18 – 24 meses, com destaque para o MG5 em todos os sítios e tratamentos com incrementos variando de 42 a 58 m³/hectare, seguido pelo MG4 com incrementos variando de 37 a 48 m³/hectare.

No sítio florestal II, o mesmo comportamento foi observado e os incrementos relativos foram mais acentuados na segunda medição, onde os materiais MG1 e MG3 apresentaram as maiores discrepâncias com um incremento relativo variando de 24 a 30%. Outra informação importante a ser destacada é o coeficiente de variação para cada material genético e tratamento. De maneira geral, o MG1 se apresentou com uma maior variabilidade dos dados nos tratamentos II e III, corroborando com a representação gráfica dos boxplots na figura 9 e 10, onde fica evidenciado sua dispersão dos dados. O comportamento oposto é observado para o MG6, que apresentou a menor variação e conseqüentemente uma maior uniformidade, o que também pode ser observado nas referidas figuras.

Para complementar as informações apresentadas nas tabelas anteriores, foi elaborado curvas de incremento e expressas graficamente (Figura 11), permitindo a compreensão do perfil de crescimento para cada material e as respectivas variações de acordo com a suplementação de água e nutrientes.

Figura 11 - Curvas características de Incremento Corrente de acordo com o material genético e tratamento – Sítio Florestal I.



Fonte: Autor (2024)

Entre as curvas elaboradas e expostas na figura 11 destaca-se as que se referem à materiais advindos do cruzamento de *Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis*. Os materiais são MG1, MG3, MG4, MG5. Esses materiais submetidos ao tratamento testemunha se mostrou responsivo a partir do momento que os recursos (água) não são limitantes. Destaca-se a inflexão positiva da curva desses materiais entre a segunda e terceira medição. O segundo inventário florestal ocorreu após um período bem definido de estiagem (abril – setembro 2022), já a terceira medição ocorreu após um período de chuvas (setembro 2022 – março 2023).

Esse comportamento da curva do tratamento testemunha para os materiais que são cruzamento *Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis* evidencia uma habilidade para crescimento compensatório, corroborando com alguns trabalhos (DREW, DOWNES, *et al.*, 2009). Por outro lado, o MG6 (*Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis*) x *Eucalyptus urophylla*) apresentou uma taxa de crescimento constante e lento independente da disponibilidade de recursos, sem inflexões marcantes na curva de incremento. Esse perfil de crescimento é reportado para

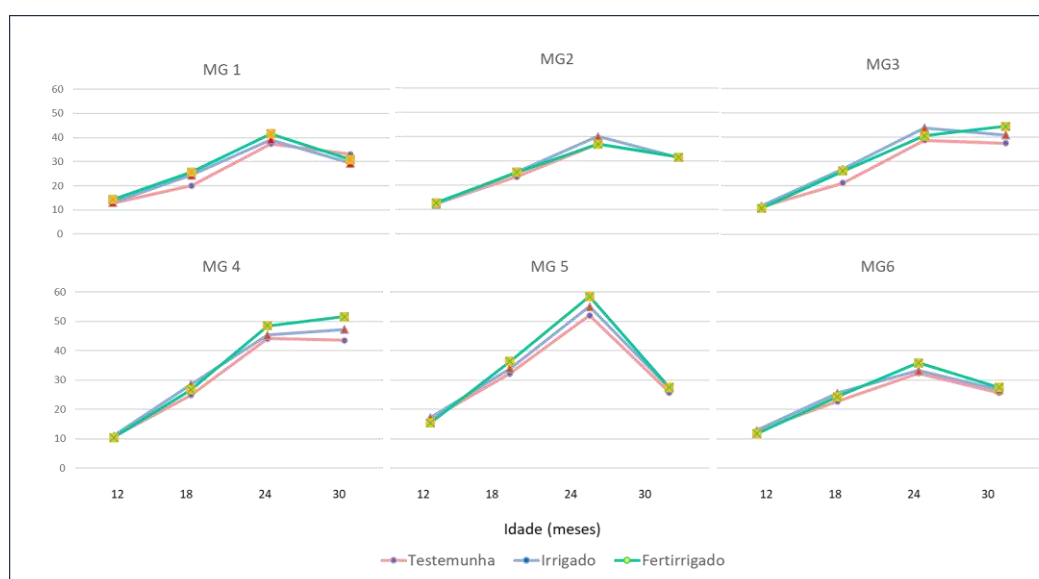
materiais clonais advindos do cruzamento (*Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis*) (DREW, DOWNES, *et al.*, 2009, EKSTEEN, GRZESKOWIAK, *et al.*, 2013).

Esse padrão de comportamento está relacionado à condutância estomática específica de cada clone. De maneira geral todos os materiais submetidos a condições de estresse hídrico sofrerão impactos negativos na sua condutância estomática, no entanto os materiais oriundos do cruzamento (*Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis*) apresentam uma maior condutância estomática em condições de estresse hídrico comparado com os materiais de *Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis*, que normalmente apresentam um condutância estomática maior em condições de não limitação hídrica (DREW, DOWNES, *et al.*, 2009, EKSTEEN, GRZESKOWIAK, *et al.*, 2013).

A maior condutância estomática dos clones advindos do cruzamento *Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis* em condições não limitantes pode ser correlacionada com a curva de incremento dos tratamentos II e III, onde se observa uma maior discrepância em relação a curva da testemunha, corroborando com os resultados apresentados por (DREW, DOWNES, *et al.*, 2009).

O mesmo comportamento de crescimento compensatório ocorreu no sítio florestal II (figura 12) nos materiais MG1, MG3, MG4, MG5. No entanto, como já mencionado anteriormente, a discrepância entre os tratamentos no sítio florestal II foi de menor magnitude.

Figura 12 - Curvas características de Incremento Corrente de acordo com o material genético e tratamento – Sítio Florestal II.



Fonte: Autor (2024)

Para sumarizar a análise exploratória do desempenho florestal, a aplicação do método de distribuição de decis – MDD permitiu uma visualização macro da distribuição das produtividades florestais de acordo com o sítio florestal, tratamento e material genético. A referida metodologia foi aplicada nos dados da medição florestal de trinta meses e as produtividades foram estratificadas em decis (tabela 9).

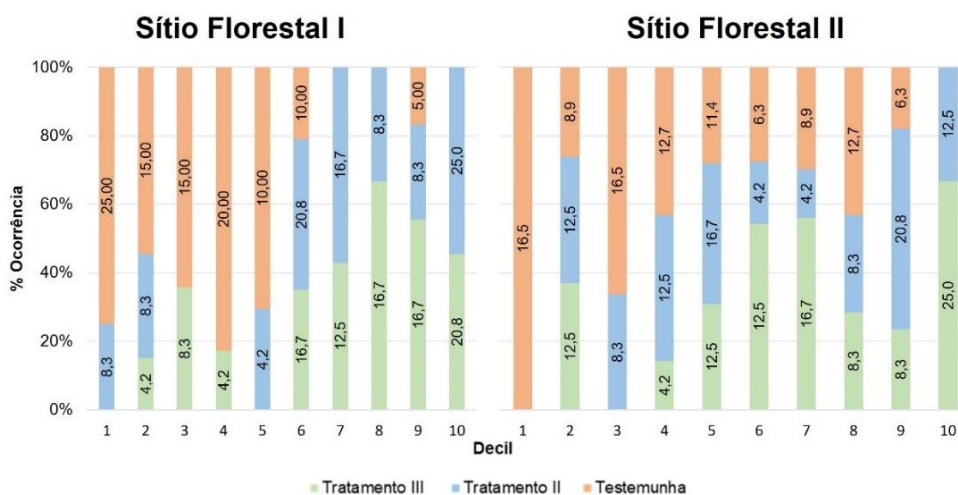
Tabela 9 - Estratificação dos decis e definição dos limites.

	Limite inferior	Limite Superior
D1	-	<93,8
D2	93,8	99,0
D3	99,1	103,5
D4	103,6	106,9
D5	107,0	113,4
D6	113,5	118,2
D7	118,3	121,3
D8	121,4	125,4
D9	125,5	134,1
D10	134,2	149,2

Fonte: Autor (2024)

Considerando uma análise dos tratamentos em relação aos sítios florestais, foi possível identificar uma maior presença da testemunha nos decis superiores no sítio florestal II (Figura 13), evidenciando a importância do sítio florestal no desempenho dos materiais. No sítio florestal I, 75% dos indivíduos da testemunha se concentraram na metade inferior dos decis.

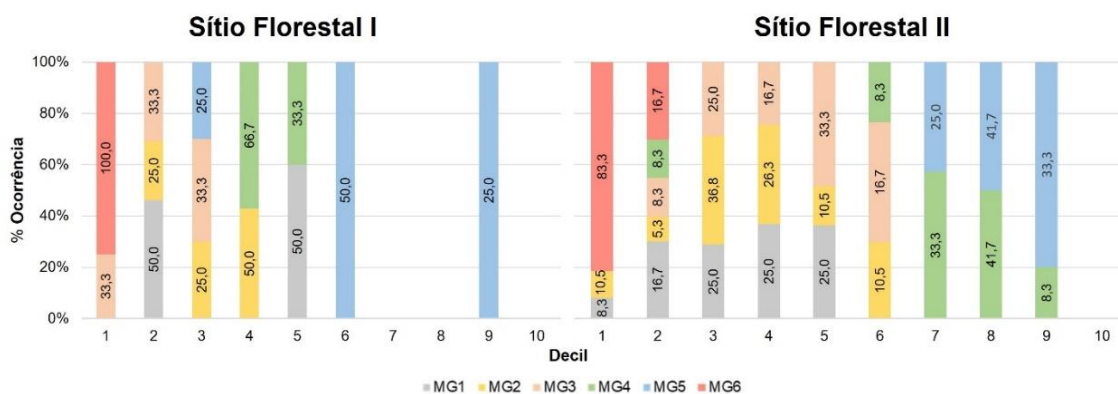
Figura 13. Análise MDD – avaliação dos tratamentos em relação aos sítios florestais.



Fonte: Autor (2024)

A análise de MDD foi expandida a nível de material genético e estratificada por tratamento para permitir uma compreensão mais detalhada dos materiais em análise. A distribuição das produtividades para a testemunha está apresentada na figura 14. Apenas o material MG5 se apresentou nos decis superiores (decis acima do 5) do sítio florestal I, os demais materiais foram alocados nos decis inferiores. Essa performance dos materiais no sítio I em conjunto com uma presença maior dos materiais nos decis superiores do sítio II (MG2, MG3, MG4 e MG5) reforça a influência das condições de sítio no desempenho dos materiais.

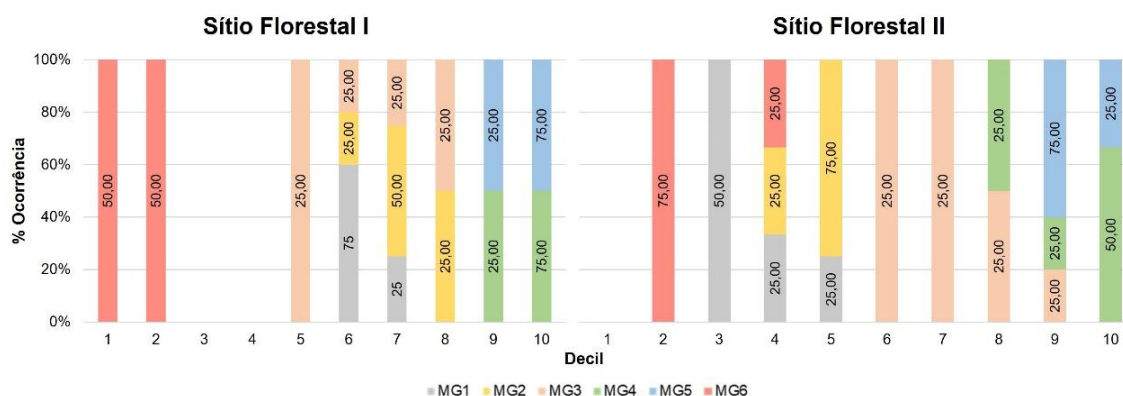
Figura 14 - Análise MDD aplicada à testemunha e estratificada por materiais.



Fonte: Autor (2024)

O tratamento irrigado apresentou um gráfico mais deslocado à direita no sítio florestal I, evidenciando a importância da suplementação de água no desempenho do cultivo (Figura 15). Os materiais 4 e 5 concentraram suas produtividades nos 20% superiores do respectivo sítio. Em contrapartida o MG6 se concentrou nos decis inferiores em ambos os sítios.

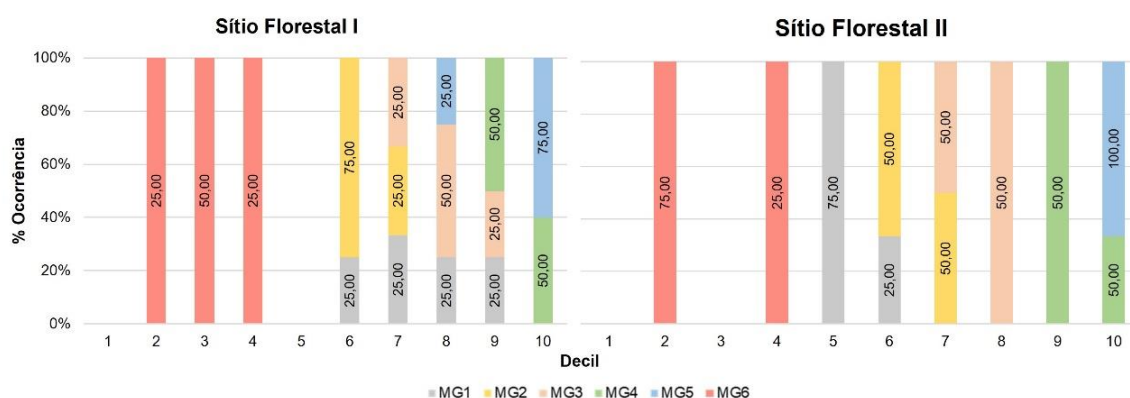
Figura 15 - Análise MDD aplicado ao tratamento irrigado.



Fonte: Autor (2024)

O tratamento fertirrigado apresentou o mesmo perfil de distribuição comparado ao irrigado, no entanto com algumas peculiaridades (Figura 12). Os materiais MG1 e MG3 se apresentaram entre os 20% mais produtivos no sítio I, demonstrando um ganho de desempenho com a suplementação nutricional via fertirrigação. Os materiais 4 e 5 continuaram se apresentando nos decis superiores majoritariamente.

Figura 16 - Análise MDD – Tratamento Fertirrigado.



Fonte: Autor (2024)

3.3 MODELOS DE CRESCIMENTO

De maneira geral, o perfil de crescimento de uma árvore apresenta um comportamento sigmoidal, o que possibilita uma modelagem por relações não lineares. Normalmente a utilização de modelos de crescimento em espécies florestais se dá pela função logística, modelo de Richards ou modelo de Gompertz (FRÜHAUF, DA SILVA, *et al.*, 2022). A partir da obtenção da curva de crescimento, é possível obter a compreensão de aspectos importantes para a tomada de decisão relacionadas aos tratamentos culturais e idade de corte, além de possibilitar a identificação de momentos de interesse, como ponto de maior taxa de crescimento, ponto de inflexão e aceleração do crescimento, entre outras informações que podem ser úteis no planejamento e manejo florestal.

No presente estudo foi considerado o modelo logístico para a modelagem da curva de crescimento. A escolha do modelo se deu pela sua ampla aplicabilidade e seu desempenho estatístico, levando em consideração o r^2 e o Critério de Aikake corrigido AICc. Os coeficientes dos modelos, os indicadores de qualidade do modelo

e as respectivas áreas da curva de crescimento acumulada e estratificada por medição florestal estão apresentadas nas tabelas 9 e 10, para os sítios I e II respectivamente.

As diferenças relativas maiores se deram no sítio florestal I, com um valor médio de 29% superior dos tratamentos II e III em relação à testemunha. Já no sítio florestal II essa diferença média foi de 10,8%. A nível de clone, destaca-se novamente o MG3 com o melhor desempenho relativo, com um volume acumulado superior em 42,4% e 17,2% no tratamento II e de 40,2% e 12,1% no tratamento III, nos sítios florestais I e II respectivamente.

A análise dos critérios adotados para a elaboração dos modelos de crescimento corroborou com os resultados já apresentados no item 3.2 nas figuras 9 e 11, reforçando o comportamento uniforme do MG6 com os menores valores de AICc e os maiores de r^2 , mostrando um bom ajuste dos dados obtidos em campo com o modelo. Por outro lado, o MG1 se comportou inversamente proporcional ao MG6, com valores de AICc elevados nos tratamentos II e III e valores menores de r^2 , reforçando a sua elevada variabilidade dos resultados obtidos.

O ajuste dos modelos de crescimento também reforçou a responsividade do MG3 à suplementação de água e nutrientes, corroborando com os resultados apresentados no item 3.2. O maior ganho incremental ocorreu no sítio florestal I, como já mencionado anteriormente, devido à menor capacidade de armazenamento de água do sítio. Apesar do MG3 ter sido o mais responsivo no sítio florestal II, o seu ganho relativo foi menor quando comparado com o sítio florestal I.

Tabela 10 - Informações dos modelos de crescimento e as respectivas integrais do sítio florestal I.

MG	Tratamento	Integral da Curva de Crescimento				Coeficientes			Modelo Logístico			Diferença volume acumulado (%) *			
		12 - 18	18 - 24	24 - 30	12 - 30	a	b	c	r ²	AICC	DOF	12 -- 18	18 -- 24	24--30	12 --30
MG6	Testemunha	120,41	263,32	428,86	812,58	102,9449	75,0065	0,1911	0,97	724,8	237				
	Irrigado	139,18	328,16	499,76	967,11	101,0195	124,9897	0,2382	0,96	874,6	237	15,6%	24,6%	16,5%	19,0%
	Fertirrigado	147,59	345,30	540,19	1033,08	113,6511	112,1131	0,2260	0,97	831,5	237	22,6%	31,1%	26,0%	27,1%
MG5	Testemunha	143,63	353,07	599,82	1096,52	138,4750	128,4883	0,2163	0,95	1061,7	237				
	Irrigado	174,63	432,34	718,79	1325,76	159,1459	136,1955	0,2246	0,93	1215,9	237	21,6%	22,5%	19,8%	20,91%
	Fertirrigado	189,16	467,49	746,45	1403,10	156,1358	144,5055	0,2366	0,97	1062,3	237	31,7%	32,4%	24,4%	27,96%
MG4	Testemunha	102,69	278,94	526,37	908,00	133,5308	195,3767	0,2203	0,95	1052,8	237				
	Irrigado	141,97	375,79	678,60	1196,36	162,8571	175,3662	0,2228	0,95	1128,3	237	38,3%	34,7%	28,9%	31,8%
	Fertirrigado	134,34	380,54	690,85	1205,73	157,8120	239,5296	0,2411	0,96	1126,1	237	30,8%	36,4%	31,2%	32,8%
MG3	Testemunha	90,50	249,94	470,61	811,05	116,7761	209,9631	0,2255	0,97	870,3	237				
	Irrigado	153,29	378,81	622,79	1154,89	135,7343	137,0728	0,2274	0,93	1145,6	237	69,4%	51,6%	32,3%	42,4%
	Fertirrigado	135,81	362,91	638,28	1137,00	145,3693	186,5203	0,2320	0,96	1046,7	237	50,1%	45,2%	35,6%	40,2%
MG2	Testemunha	124,50	303,90	528,47	956,88	128,3814	122,5685	0,2079	0,96	969,3	237				
	Irrigado	195,98	453,65	656,78	1306,42	126,4803	132,9238	0,2560	0,91	1221,3	237	57,4%	49,3%	24,3%	36,5%
	Fertirrigado	170,47	416,30	633,46	1220,23	125,7872	153,0346	0,2499	0,96	1012,0	237	36,9%	37,0%	19,9%	27,5%
MG1	Testemunha	140,84	322,58	532,34	995,76	124,7213	93,1366	0,2023	0,93	797,6	177				
	Irrigado	178,47	386,76	607,12	1172,35	136,3959	73,9743	0,1996	0,89	1244,9	237	26,7%	19,9%	14,0%	17,7%
	Fertirrigado	178,61	414,41	650,80	1243,82	138,4457	106,3472	0,2200	0,90	1257,8	237	26,8%	28,5%	22,3%	24,9%

* Diferença do volume acumulado relação a testemunha. Fonte: Autor (2024)

Tabela 11 - Informações dos modelos de crescimento e as respectivas integrais do sítio florestal I.

MG	Tratamento	Integral da Curva de Crescimento				Coeficientes			Modelo Logístico			Diferença volume acumulado (%) *			
		12 -- 18	18 -- 24	24--30	12 --30	a	b	c	r ²	AICC	DOF	12 -- 18	18 -- 24	24--30	12 --30
MG6	Testemunha	133,55	297,89	478,22	909,66	109,0550	83,6388	0,2020	0,97	2353,05	689				
	Irrigado	145,13	328,44	520,02	993,60	114,8613	91,7733	0,2111	0,98	731,8244	237	8,7%	10,3%	8,7%	9,2%
	Fertirrigado	133,52	321,05	522,90	977,47	114,6283	120,7123	0,2217	0,98	708,7287	237	0,0%	7,8%	9,3%	7,5%
MG5	Testemunha	176,81	431,99	673,00	1281,80	137,3136	143,6854	0,2414	0,97	2937,797	717				
	Irrigado	188,71	476,78	732,32	1397,81	144,7592	180,2836	0,2572	0,97	1008,064	237	6,7%	10,4%	8,8%	9,1%
	Fertirrigado	182,40	491,28	758,14	1431,82	146,9405	254,7437	0,2754	0,97	1000,875	237	3,2%	13,7%	12,7%	11,7%
MG4	Testemunha	125,14	329,89	604,32	1059,36	149,5557	171,5394	0,2183	0,95	3232,945	717				
	Irrigado	140,49	362,04	661,16	1163,68	166,8078	155,2817	0,2123	0,96	1056,14	237	12,3%	9,7%	9,4%	9,8%
	Fertirrigado	131,22	356,75	680,76	1168,74	176,4291	196,4723	0,2181	0,94	1186,391	237	4,9%	8,1%	12,6%	10,3%
MG3	Testemunha	121,46	299,87	538,38	959,71	138,0391	128,7244	0,2035	0,96	2876,02	717				
	Irrigado	140,34	355,87	628,24	1124,45	150,9365	145,3427	0,2157	0,97	932,27	237	15,5%	18,7%	16,7%	17,2%
	Fertirrigado	133,61	333,56	608,57	1075,74	159,4555	135,5541	0,2031	0,97	985,3151	237	10,0%	11,2%	13,0%	12,1%
MG2	Testemunha	135,39	320,29	537,99	993,67	126,1934	107,6388	0,2075	0,95	2968,233	713				
	Irrigado	139,70	342,92	570,25	1052,87	127,1499	130,4189	0,2219	0,95	1030,944	237	3,2%	7,1%	6,0%	6,0%
	Fertirrigado	141,73	351,12	606,19	1099,05	143,0054	131,8190	0,2144	0,97	918,6688	237	4,7%	9,6%	12,7%	10,6%
MG1	Testemunha	125,95	302,60	523,56	952,11	128,1370	114,1619	0,2044	0,93	3297,712	717				
	Irrigado	142,81	342,50	560,63	1045,94	124,1309	118,2718	0,2193	0,95	1011,355	237	13,4%	13,2%	7,1%	9,9%
	Fertirrigado	152,20	362,60	591,21	1106,01	130,7501	114,9562	0,2185	0,96	1001,9	237	20,8%	19,8%	12,9%	16,2%

* Diferença do volume acumulado relação a testemunha. Fonte: Autor (2024)

3.4 DEFINIÇÃO DOS PONTOS CRÍTICOS

A partir da elaboração das curvas de crescimento foi possível aplicar seguidas derivadas com o intuito de identificar o momento de máxima aceleração do crescimento (P1), o momento de maior taxa de crescimento (P2) e o ponto de máxima desaceleração do crescimento (P3). Considerando que o cultivo se encontra com 30 meses, o ponto de maior interesse para essa análise é o P1 e P2 que pode nos indicar uma aceleração do crescimento e conseqüentemente uma antecipação do ponto de colheita. Um resumo com os pontos obtidos de acordo com cada material genético/tratamento e sítio florestal está exposta na tabela 11.

Tabela 12 - Identificação dos pontos críticos de acordo com material genético e tratamento.

MG	Tratamento	Sítio Florestal I			Sítio Florestal II		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3
MG1	Testemunha	15,90	22,41	28,92	16,74	23,18	29,62
	Irrigado	14,97	21,57	28,17	15,76	21,76	27,76
	Fertirrigado	15,22	21,21	27,19	15,69	21,72	27,75
MG2	Testemunha	16,79	23,13	29,46	16,20	22,54	28,89
	Irrigado	13,96	19,10	24,25	16,01	21,95	27,88
	Fertirrigado	14,86	20,13	25,40	16,63	22,77	28,91
MG3	Testemunha	17,87	23,71	29,55	17,40	23,87	30,34
	Irrigado	15,85	21,64	27,43	16,98	23,09	29,19
	Fertirrigado	16,86	22,54	28,21	17,69	24,17	30,65
MG4	Testemunha	17,97	23,95	29,93	17,54	23,57	29,60
	Irrigado	17,28	23,19	29,10	17,56	23,76	29,96
	Fertirrigado	17,26	22,72	28,18	18,17	24,21	30,25
MG5	Testemunha	16,36	22,45	28,53	15,12	20,58	26,03
	Irrigado	16,01	21,88	27,74	15,08	20,20	25,32
	Fertirrigado	15,45	21,02	26,58	15,34	20,12	24,90
MG6	Testemunha	15,70	22,60	29,49	15,40	21,92	28,44
	Irrigado	14,74	20,27	25,80	15,17	21,40	27,64
	Fertirrigado	15,06	20,88	26,71	15,68	21,62	27,56

Fonte: Autor (2024)

A partir da definição destes pontos, observa-se uma rápida reação da suplementação de água e nutrientes via sistema de irrigação pelo MG2 no sítio florestal I e uma aceleração do processo de crescimento, com uma antecipação do P1 de 1,93 meses para o fertirrigado e 2,83 meses para o irrigado. Essa antecipação foi ainda mais significativa no P2, onde o ponto de máximo incremento do MG2 foi antecipado em 4 e 3 meses para os tratamentos II e III respectivamente. Essa análise corrobora com o comportamento observado na figura 10 inventário II, onde o boxplot do tratamento irrigado apresenta uma discrepância da testemunha, além da análise de incremento na tabela 7, onde foi demonstrado um incremento no segundo inventário de 87,6% para o tratamento irrigado em relação à testemunha.

De maneira geral, observa o comportamento das curvas referentes ao sítio florestal I com uma maior abertura dos tratamentos II e III em relação à testemunha. Esse formato da curva e as respectivas magnitudes das diferenças dos pontos críticos evidencia a questão da diferença da resposta dos tratamentos e materiais genéticos à condição de sítio florestal, corroborando com as demais análises apresentadas neste estudo.

O MG4 apresenta um perfil de aceleração do crescimento mais lento em relação aos demais clones. Os seus valores de P1 e P3 foram os maiores em ambos os sítios e em todos os tratamentos. Esse comportamento também pode ser verificado na figura 9, onde o MG4 se coloca entre os mais produtivos somente nas últimas medições e também pela análise da tabela 7, onde na terceira medição ele foi o que apresentou maior incremento frente aos demais materiais. A curva de crescimento e os respectivos pontos P1, P2 e P3 estão apresentados nas figuras 17, 18 e 19.

Figura 17 - Curvas de crescimento do MG1 e MG2 de acordo com o tratamento e sítio florestal. Identificação dos pontos P1, P2 e P3.

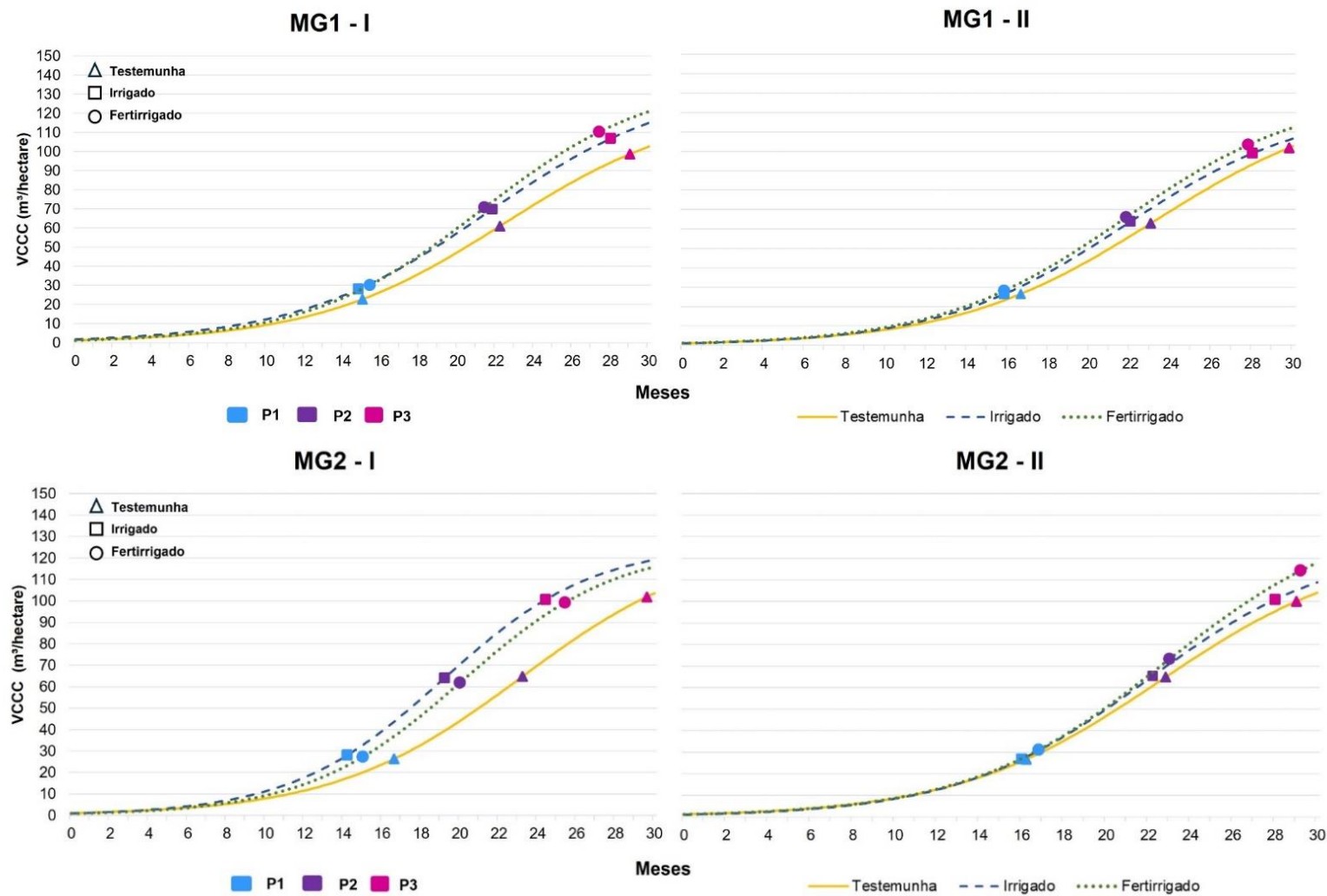
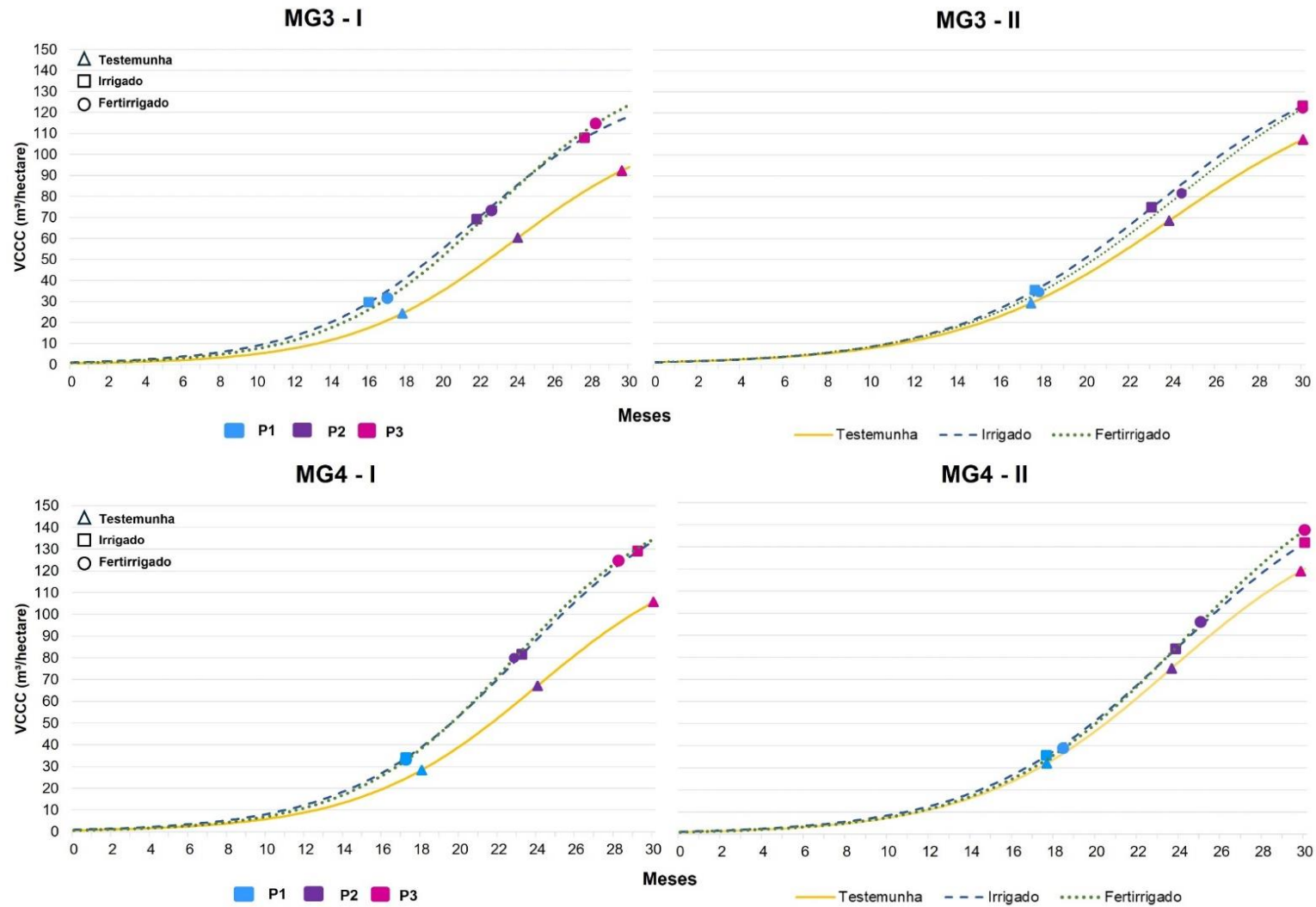
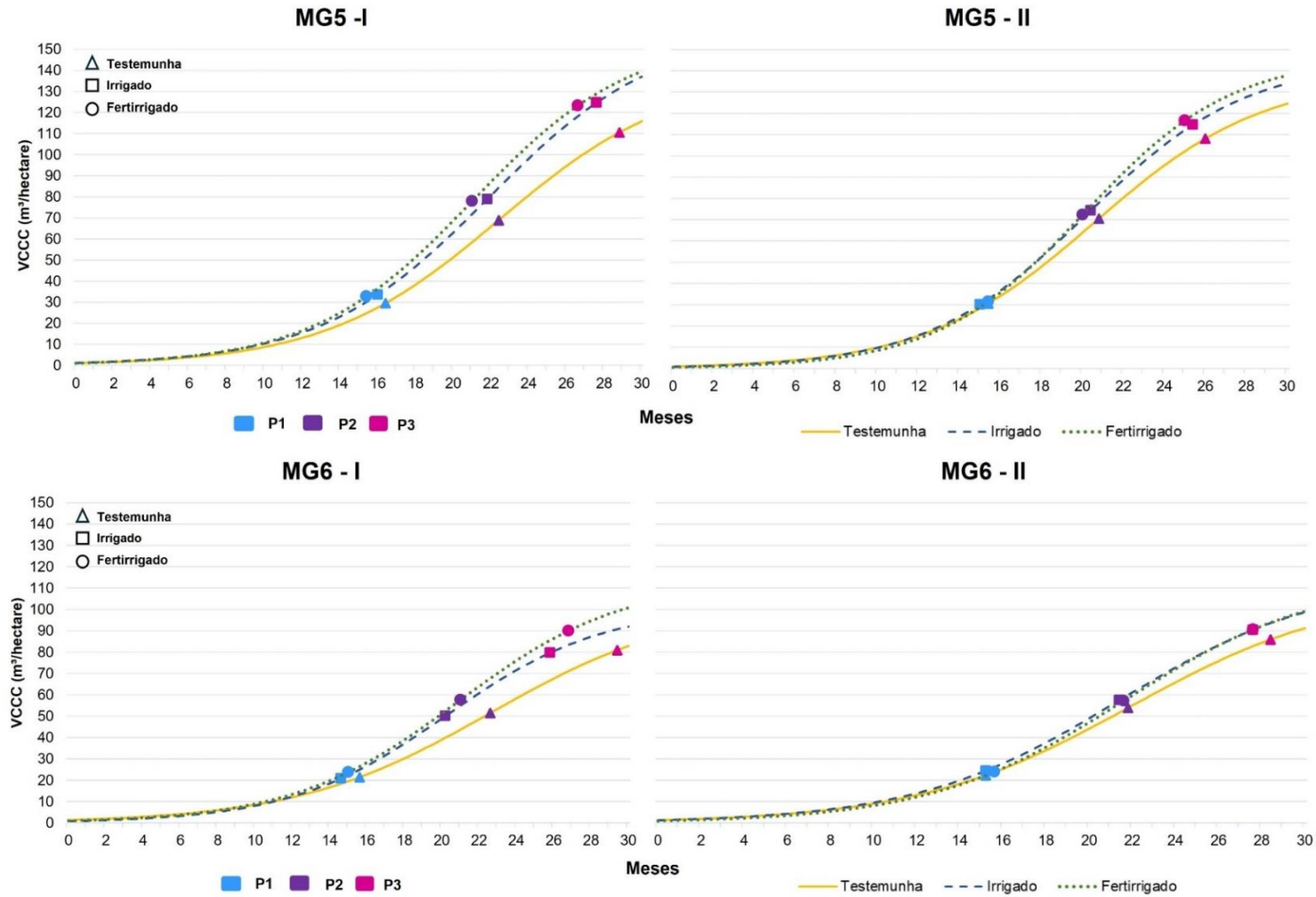


Figura 18 - Curvas de crescimento do MG3 e MG4 de acordo com o tratamento e sítio florestal. Identificação dos pontos P1, P2 e P3.



Fonte: Autor (2024)

Figura 19 - Curvas de crescimento do MG5 e MG6 de acordo com o tratamento e sítio florestal. Identificação dos pontos P1, P2 e P3.



3.5 AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS RESPOSTA

A partir da análise dos modelos lineares generalizados mistos – GLMM, foi evidenciado que todas as variáveis de crescimento (variáveis respostas) se mostraram estatisticamente significativas em relação às variáveis explicativas (material genético, tratamento e interação material genético e tratamento). Todos os modelos apresentaram *p*-valor menor que 0,00001 (Tabela 12), evidenciando a variabilidade de desempenho do cultivo de acordo com material genético, tratamento e interação de ambos.

Tabela 13 - Tabela de variância modelo completo versus modelo nulo - teste de Fischer.

Variável resposta	Variável Explicativa	BIC	AIC	Graus de liberdade	Deviance	Chi-square	p-value
VCCC	MG	183695	183615	5	183595	277,96	<0,000001
VCCC	Tratamento	183822	183766	2	183752	120,68	<0,000001
VCCC	MG*Tratamento	183561	183385	17	183341	531,98	<0,000001
DAP	MG	57033	56952	5	56932	376,85	<0,000001
DAP	Tratamento	57259	57203	2	57189	119,95	<0,000001
DAP	MG*Tratamento	56824	56648	17	56604	705,15	<0,000001
HT	MG	27649	27566	5	27546	161,44	<0,000001
HT	Tratamento	27701	27645	2	27631	77,07	<0,000001
HT	MG*Tratamento	27632	27455	17	27411	296,4	<0,000001

Fonte: Autor (2024)

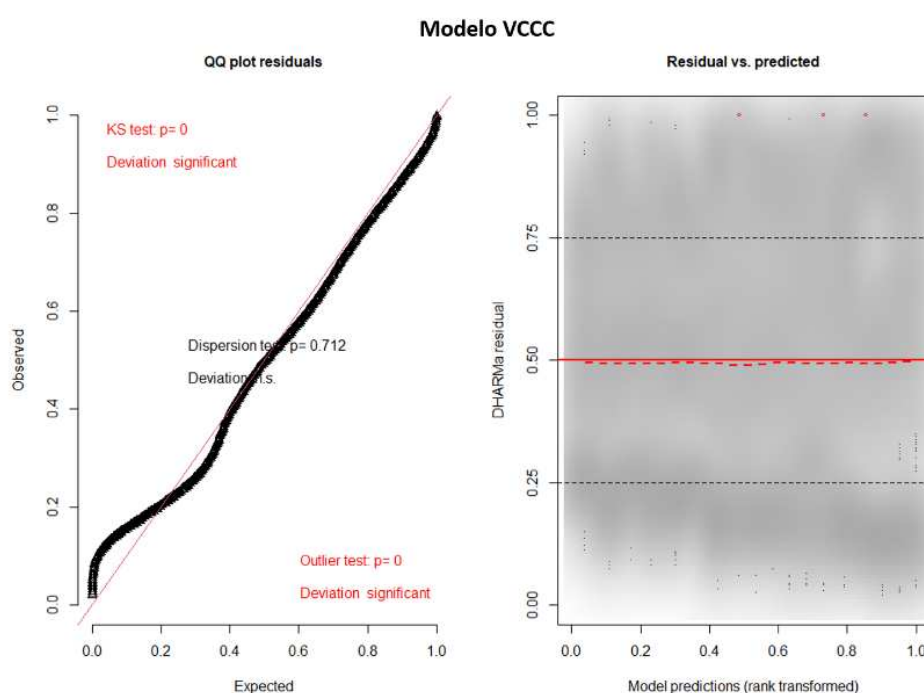
De acordo com o critério de informação de Akaike (AIC) e o critério de informação Bayesiano (BIC), os modelos que consideraram a variável explicativa a interação das variáveis resposta material genético e tratamento explicaram melhor a variabilidade em relação a todos as variáveis de crescimento. Os critérios de AIC e BIC foram acompanhados dos resultados da *deviance*, que apresentou as medidas de discrepância dos modelos e corroborou com o indicativo dos resultados anteriores, reforçando que os modelos onde a variável resposta considerou a interação de material genético e tratamento performou melhor do que os demais.

Os modelos que melhor explicaram as variáveis crescimento foram selecionados para uma representação gráfica e análise mais detalhada. A sintaxe dos melhores modelos se baseou na definição da variável de crescimento (VCCC, DAP e HT) como variável resposta em relação à variável explicativa interação Material

Genético e Tratamento. O aninhamento proposto foi considerando uma visão macro para micro, considerando a seguinte lógica: inventário – Sítio Florestal – Parcela. A distribuição Gaussiana foi considerada como a de melhor ajuste para os dados em análise. A equação 6 apresenta o detalhamento do modelo para a variável crescimento VCCC. Em seguida a figura 20 apresenta a análise de pressupostos.

$$GLMER = (VCCC \sim MG * Tratamento + (1 | \{inventario | sitio florestal | parcela\}) \text{distribuição} = Gaussian) \quad (6)$$

Figura 20 - Análise de pressupostos – Modelo VCCC ~MG*Tratamento.

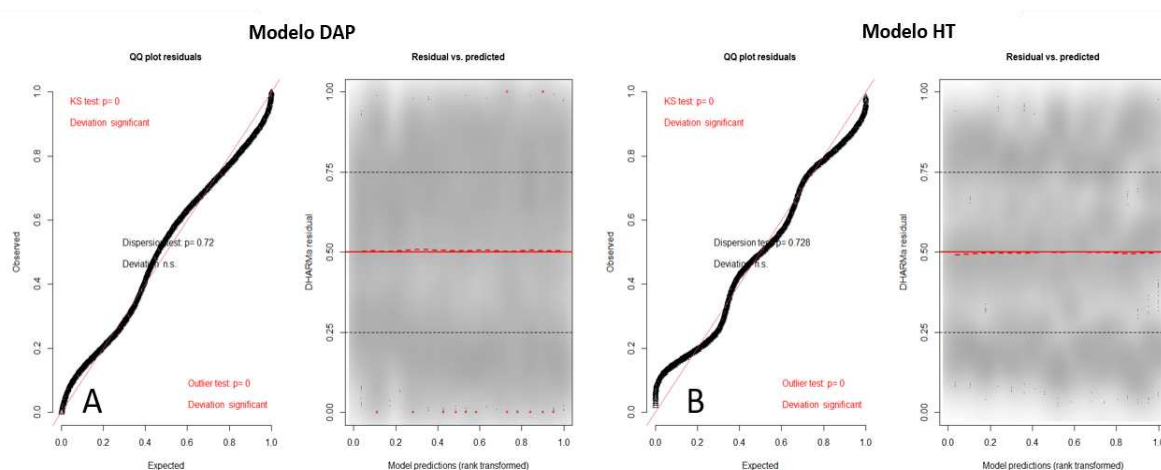


Fonte: Autor (2024).

A análise de pressupostos indicou que os resíduos não se ajustaram perfeitamente à distribuição normal e acusou uma significância para dispersão dos dados e presença de outliers. Apesar do resultado indicar a não normalidade dos dados, foi mantido a sintaxe do modelo, uma vez que a seleção do modelo linear misto generalizado (GLMM) foi devido a sua capacidade de incluir efeitos aleatórios e trabalhar com dados longitudinais. Além disso o modelo proposto se apresenta como a estrutura mais amplamente utilizada para dados que não se ajustam perfeitamente à distribuição gaussiana, além de apresentar um desempenho robusto contra desvios da suposição de efeito aleatório gaussiano (MCCULLOCH, NEUHAUS, 2011, PAN, LI, *et al.*, 2020) . O mesmo padrão ocorreu para as análises dos pressupostos do

modelo considerando a variável resposta diâmetro na altura do peito – DAP e altura total – HT (Figura 21.A e Figura 21.B). As sintaxes dos respectivos modelos estão descritas nas equações (7 e 8).

Figura 21 - Análise de pressupostos dos modelos: A – Modelo para variável DAP; B – Modelo para a variável HT.



Fonte: Autor (2024).

$$GLMER (HT \sim MG * Tratamento + (1 | \langle inventario | sitio florestal | parcela \rangle) \text{distribuição} = Gaussian) \quad (7)$$

$$GLMER (DAP \sim MG * Tratamento + (1 | \langle inventario | sitio florestal | parcela \rangle) \text{distribuição} = Gaussian) \quad (8)$$

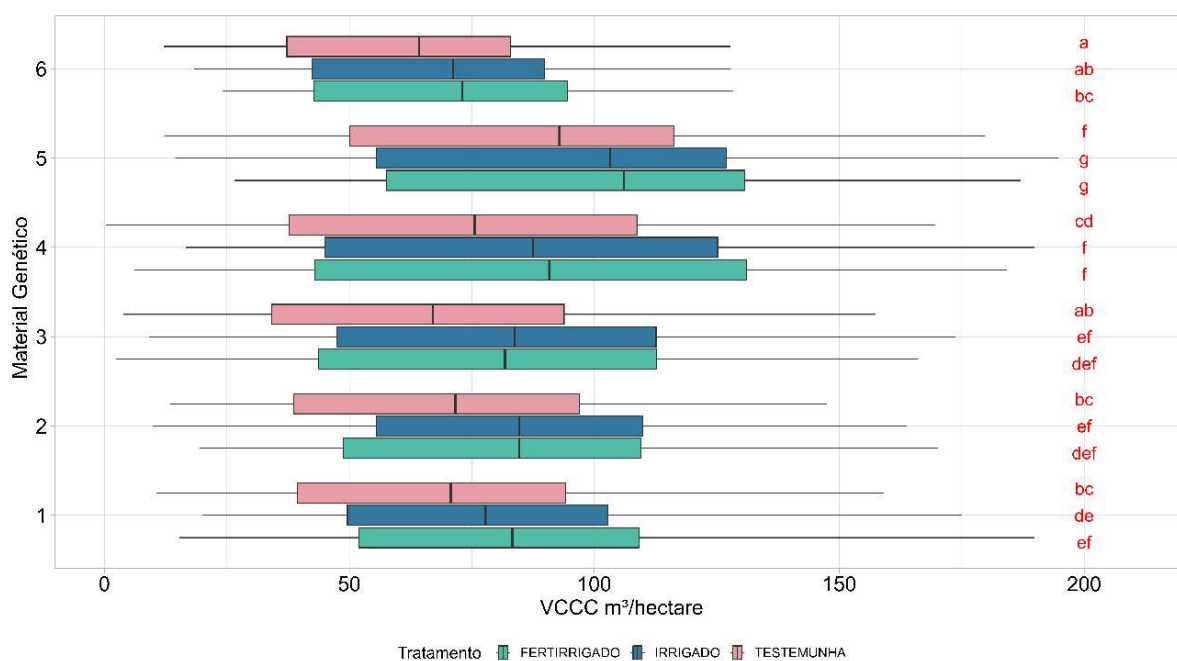
Para representar a variabilidade das variáveis de crescimento em relação à interação material genético e tratamento, foi representado graficamente por boxplot com as respectivas letras indicando as diferenças estatísticas significativas de acordo com a análise de contrastes.

A análise de comparações múltiplas permitiu confirmar as observações mencionadas previamente no item 3.2. A análise para a variável resposta VCCC se destacou pelo predomínio do MG5, com os tratamentos irrigado e fertirrigado performando iguais e superiores aos demais clones e tratamentos (Figura 22). Seguido pelo MG4 irrigado e fertirrigado, que foi similar ao MG5 no tratamento testemunha. Isso reforça a característica de elevado crescimento do respectivo clone. Isso pode ser observado no item 3.2 (figuras 11 e 12) onde a curva de incremento atingiu pontos mais elevados e mostrou um comportamento mais intensivo de crescimento.

O MG3 confirmou sua elevada exigência em relação à água e nutrição e reforçou o maior desempenho relativo. O material em discussão ficou entre os mais produtivos quando submetidos aos tratamentos II e III (suplementação de água e nutrientes), no entanto no tratamento testemunha foi similar ao MG6, se colocando entre os piores desempenhos.

O MG6 confirmou o seu desempenho inferior quando comparado com os demais clones e tratamentos. O seu melhor desempenho foi no tratamento fertirrigado, no entanto seu desempenho foi estatisticamente igual aos materiais I e II no tratamento testemunha. O MG1 por sua vez obteve um bom desempenho no tratamento III, no entanto apresentou uma elevada variabilidade dos dados observados em todos os tratamentos.

Figura 22 - Gráfico Boxplot e análise de contraste por GLMM para a variável VCCC m³/ha.



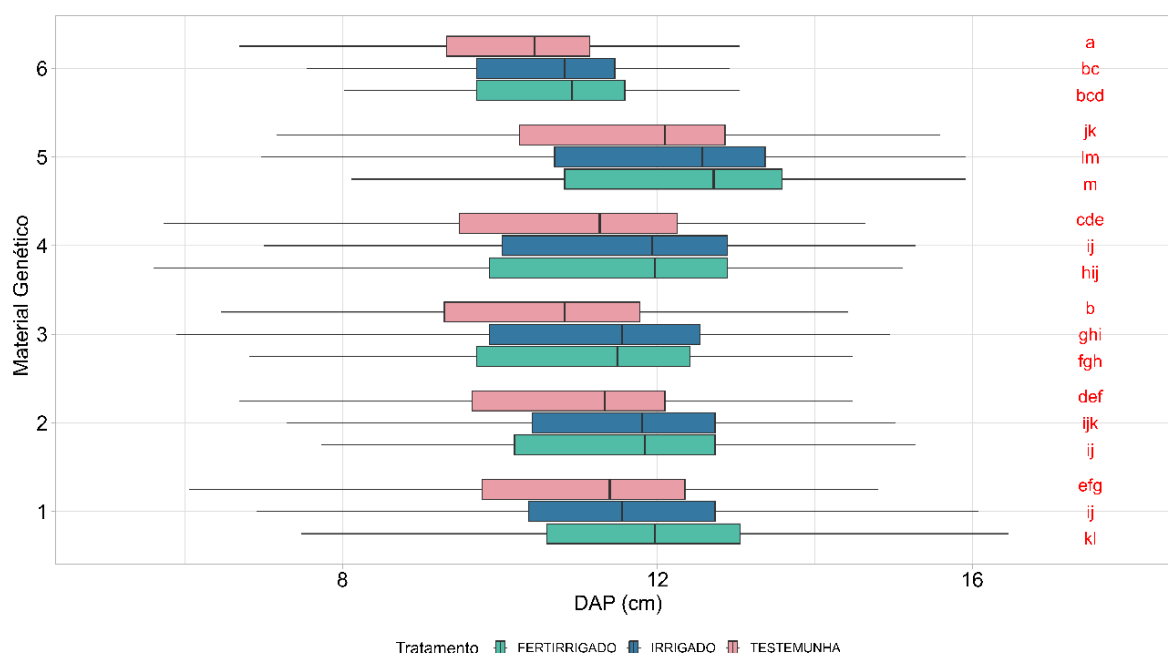
Fonte: Autor (2024).

De acordo com o gráfico e a respectiva análise de comparações múltiplas, podemos indicar que o manejo nutricional proposto pela empresa para os tratamentos testemunha e irrigado performou bem e está suprindo a demanda nutricional do cultivo e não se apresenta como um limitante de crescimento. Apesar de em alguns materiais apresentarem as maiores produtividades no tratamento III, esse tratamento não se

diferenciou estatisticamente do tratamento II (apenas irrigação). Isso pode nos indicar um consumo de luxo para os materiais que estão sob o tratamento III.

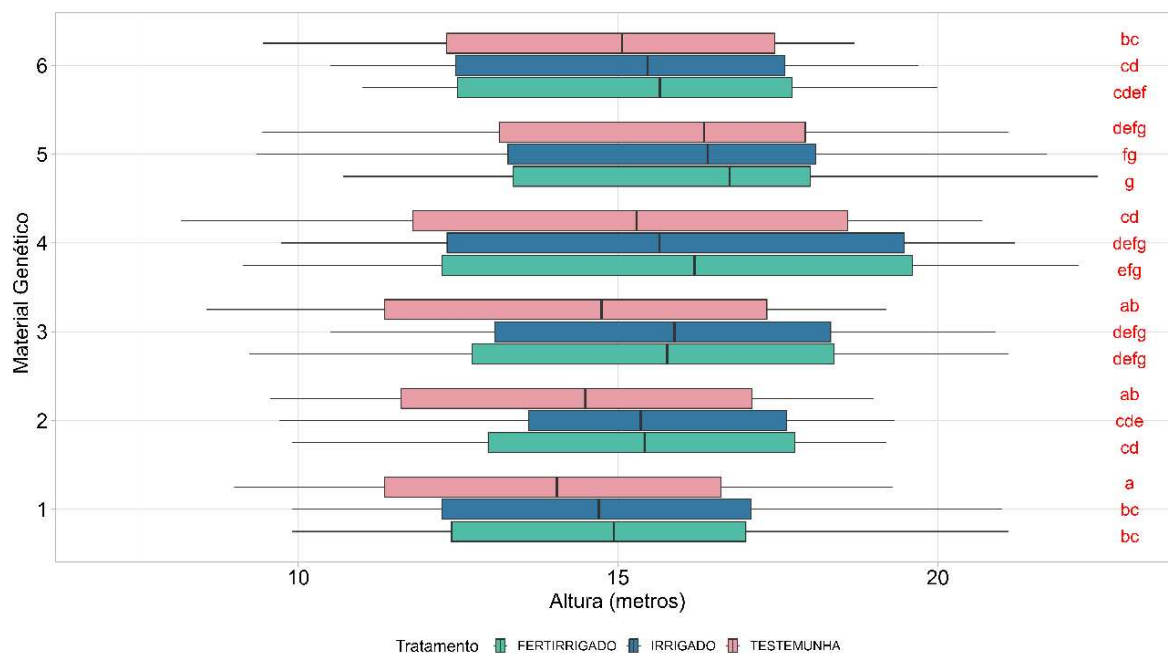
As demais variáveis de crescimento (DAP e altura) também passaram pela análise de contrastes. O DAP por ser o componente com maior contribuição na estimativa do volume, apresentou resultados similares à análise anterior de volume, com algumas pequenas diferenças (Figura 23). O MG5 submetido aos tratamentos II e III continuou com o melhor desempenho frente aos demais materiais. O destaque veio com o MG1 fertirrigado com um desempenho similar ao MG5 irrigado e testemunha, superando o MG4.

Figura 23 - Gráfico Boxplot e análise de contraste por GLMM para a variável DAP (cm).



Fonte: Autor (2024)

O MG1 obteve um maior diâmetro quando comparado com o MG4, no entanto no quesito altura o MG4 lidera com o MG5, acarretando nos maiores volumes. O MG1 obteve as menores médias de altura entre os materiais avaliados em todos os tratamentos (Figura 24). O MG2 apresentou a menor variação entre os tratamentos para o quesito altura. Os materiais MG3 e MG4 novamente se mostraram responsivos aos tratamentos e obtiveram os maiores valores de incremento de altura submetidos aos tratamentos II e III. O MG3 se apresentou com a testemunha entre os menores valores de altura e os tratamentos II e III entre os primeiros.

Figura 24 - Gráfico Boxplot e análise de contraste por GLMM para a variável HT (m).

Fonte: Autor (2024).

3.6 DESEMPENHO EM RELAÇÃO AS CONDIÇÕES DE SÍTIO

Para uma melhor compreensão do desempenho dos materiais genéticos submetido à diferentes condições de sítio florestal, foi replicado a metodologia de análise de modelos GLMM apresentada nos itens anteriores considerando a estratificação por grupos de tratamento e a variável resposta sendo representada pela interação material e genético e sítio florestal. A variável de crescimento VCCC foi considerada a variável resposta do modelo. Todos os modelos considerando a estratificação por tratamento foi significativo, o que nos indica uma contribuição das condições de sítio no desempenho dos materiais, independentemente do tratamento submetido. OS valores relacionados aos modelos estão expostos na tabela 14.

Tabela 13. Tabela de variância modelo completo versus modelo nulo - teste de Fischer.

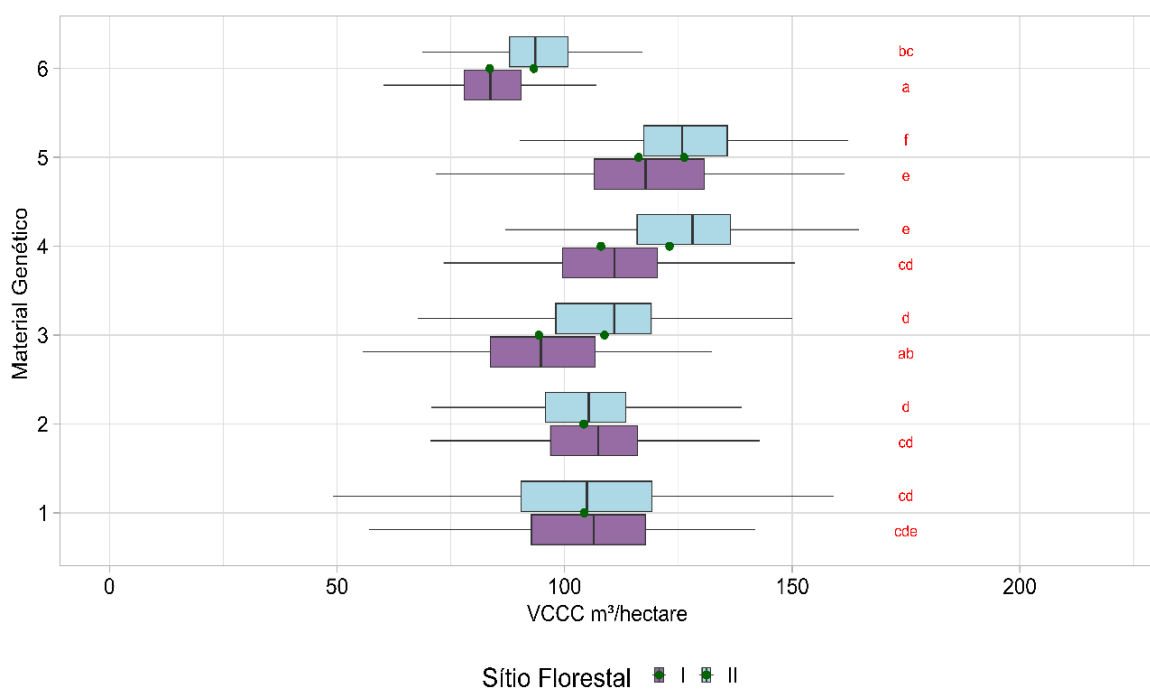
Tratamento	Variável Explicativa	BIC	AIC	GL	Deviance	Chi-square	p-value
Testemunha	MG*Sítio Florestal	76101	75986	11	75954	254,36	<0,001
Tratamento II	MG*Sítio Florestal	53935	53826	11	53794	161,17	<0,001
Tratamento III	MG*Sítio Florestal	53250	53142	11	53110	153,55	<0,001

Fonte: Autor (2024)

Uma exploração gráfica foi elaborada para representar o desempenho de cada material genético em relação às condições de sítio. Os dados foram agrupados de acordo com o respectivo tratamento. Uma análise de contraste foi realizada para complementar a compreensão gráfica e identificar as significâncias estatísticas.

Os resultados para o tratamento testemunha está descrito na figura 25. A partir da análise gráfica e a respectiva análise de contraste, fica evidenciado o potencial de crescimento do MG5 em relação aos demais materiais. O respectivo material ocupou as duas primeiras colocações seguido pelo MG3 e MG4, ambos no sítio florestal II. O desempenho dos materiais MG3, MG4, MG5 e MG6 se apresentaram discrepantes em relação ao sítio florestal. Já os materiais MG1 e MG2 não apresentou diferenças significativas.

Figura 25 - Gráfico Boxplot – Inventário Florestal IV – Tratamento Testemunha. Análise de contrastes.

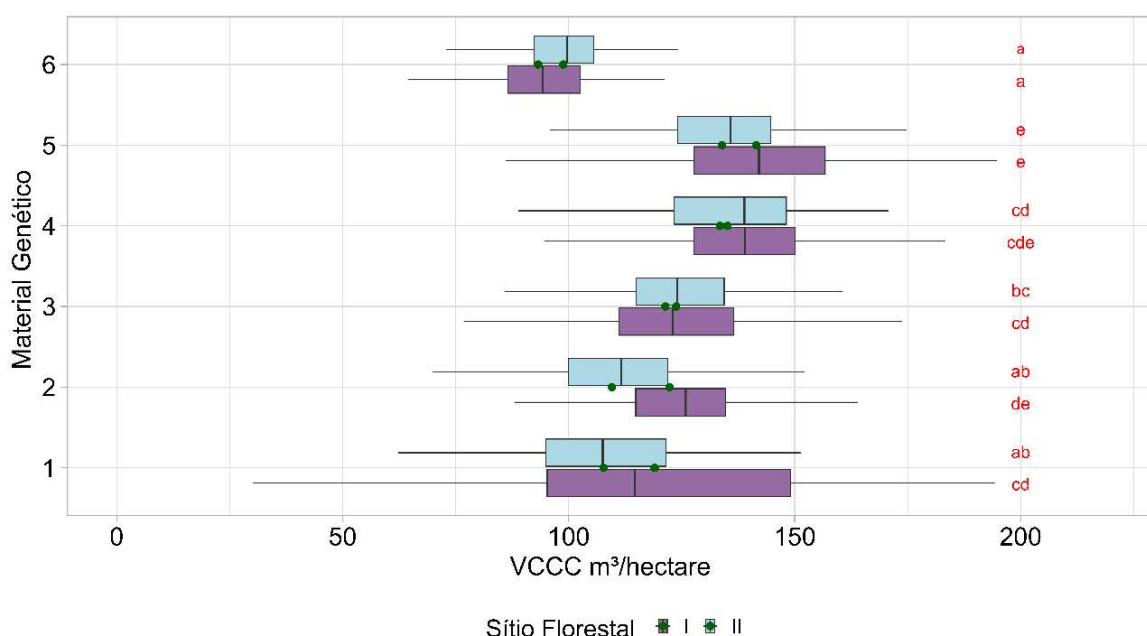


Fonte: Autor (2024).

Os resultados para o tratamento irrigado apresentaram um comportamento diferente ao encontrado no tratamento testemunha. Os resultados estão apresentados na figura 26. Os materiais genéticos que anteriormente apresentaram um comportamento discrepante entre sítios sob o tratamento II, não apresentaram diferenças estatísticas entre os sítios em análise. Os materiais MG1 e MG2 que previamente obtiveram desempenhos diferentes em relação ao sítio florestal, se

apresentaram com um desempenho melhor para o sítio florestal I. O melhor desempenho dos materiais MG1 e MG2 pode ser explicado pelo maior volume de irrigação (Sítio Florestal I: 920mm; Sítio Florestal II: 192mm) e sua adaptabilidade às condições de sítio. Já os demais materiais que performaram estatisticamente iguais em relação aos sítios (MG3, MG4, MG5, MG6) se mostraram mais eficientes em relação à produtividade de água, pois obtiveram resultados similares com um volume irrigado inferior. As características edafoclimáticas do sítio e o respectivo volume acumulado de chuva devem ser considerados nessa análise, para uma conclusão mais assertiva.

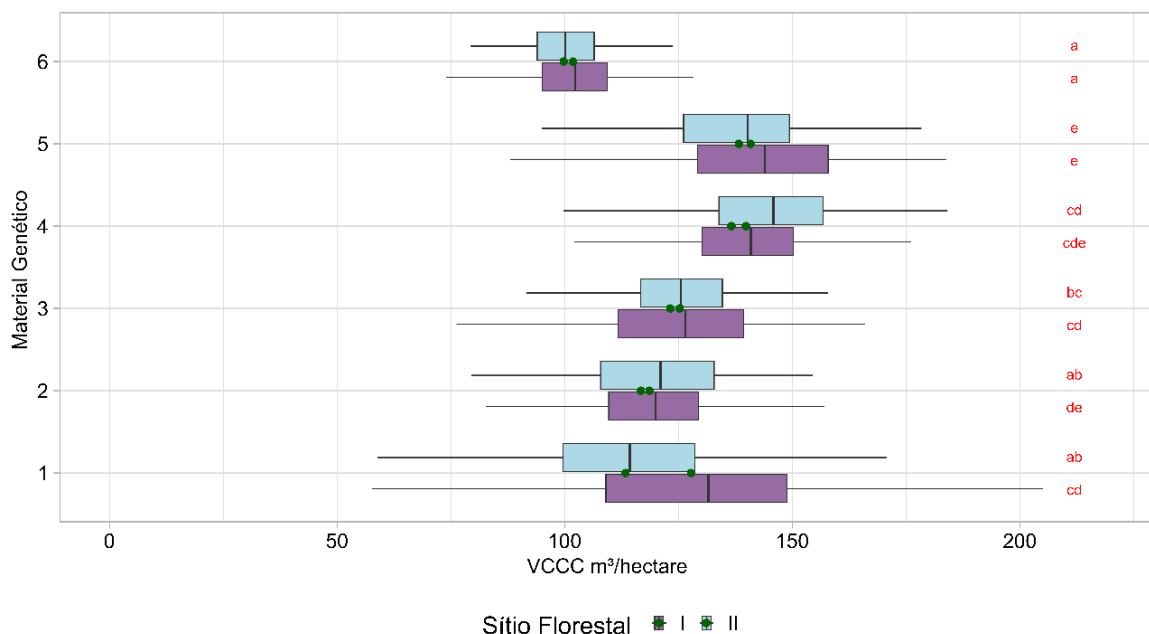
Figura 26 - Gráfico Boxplot – Inventário Florestal IV – Tratamento Irrigado. Análise de contrastes.



Fonte: Autor (2024).

O comportamento dos materiais genéticos submetidos ao tratamento fertirrigado se mostrou similar ao tratamento irrigado (Figura 27). Os materiais MG 1 e MG2 performaram melhor no sítio florestal I e os demais materiais se mostraram similares entre os sítios. Esse padrão de comportamento corrobora com o argumento do apresentado nos item 3.2, onde foi indicado que o manejo nutricional proposto pela empresa para os tratamentos testemunha e irrigado não se apresenta como um limitante de crescimento, sugerindo que o tratamento III esteja fornecendo um consumo de luxo para o cultivo.

Figura 27. Gráfico Boxplot – Inventário Florestal IV – Tratamento fertirrigado. Análise de contrastes.



Fonte: Autor (2024)

3.7 CONCLUSÃO

A suplementação de água e fertilizantes via sistema de irrigação se apresentou como uma técnica que possibilita o incremento da produtividade do cultivo de eucalipto e mudança no perfil de crescimento. Esse incremento é relativo em relação ao material genético e condições de sítio.

A compreensão das relações fisiológicas do cultivo de eucalipto em relação às condições edafoclimáticas do sítio e seu respectivo perfil de crescimento são informações cruciais para o planejamento silvicultural e a respectiva tomada de decisão da alocação dos materiais, seleção dos sítios florestais, tratos culturais, implantação e respectivo manejo de irrigação e manejo nutricional.

O perfil de crescimento e a respectiva taxa de incremento está diretamente relacionado à disponibilidade de recursos, principalmente a disponibilidade hídrica. Os melhores resultados relativos de produtividade se expressaram nos materiais mais exigentes em relação à água e nutrição

CAPÍTULO 2

IDENTIFICAÇÃO DOS FATORES LIMITANTES AO CRESCIMENTO DO EUCALIPTO: ABORDAGEM DO MANEJO DE IRRIGAÇÃO E NUTRIÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Notoriamente conhecido e explorado por sua elevada capacidade de adaptação às diferentes condições de sítio e seu rápido crescimento, o cultivo de eucalipto no Brasil vem se expandindo em grande parte em áreas marginais previamente antropizadas (conversão de áreas de pastagens) com baixa fertilidade, elevada acidez e regimes hídricos irregulares (ABREU-JUNIOR, FIRME, *et al.*, 2017). Essa condição edafoclimática favorece às perdas de produtividade e à um grande risco operacional, fazendo-se necessário um maior aprofundamento na compreensão dos processos fisiológicos de diferentes materiais genéticos submetidos às diferentes condições fisiográficas, disponibilidade de água, fertilização e manejo.

A resposta fisiológica de crescimento do eucalipto é variável e resultado da interação genética com as condições climáticas, condições de sítio e manejos submetidos. Esses processos se adaptam de acordo com as condições impostas ao longo do cultivo e se apresentam como estratégias de sobrevivência em situações de estresse abiótico (DE FREITAS, ELLI, *et al.*, 2021). Esse comportamento flexível reforça a existência de uma plasticidade fenotípica, que varia de acordo com o material genético e a condição submetida (CABRAL, ROCHA, *et al.*, 2010, STAPE, BINKLEY, *et al.*, 2004). Além dos fatores relacionados ao material genético, sítio e manejo florestal, a ocorrência de pragas, doenças e plantas daninhas influenciam negativamente o desempenho do eucalipto. Os impactos vão desde o aumento da competição interespecífica, redução da área foliar e conseqüentemente diminuição da fotossíntese e a respiração de manutenção (BINKLEY, CAMPOE, *et al.*, 2017).

A absorção de luz pelas folhas e a sua respectiva conversão em biomassa (eficiência do uso da luz) seguido pelo particionamento e alocação de fotoassimilados para os diferentes tecidos vegetais, é reconhecido como a principal engrenagem no processo fisiológico de crescimento florestal à nível de indivíduo. No entanto, à nível de povoamento florestal, o efeito benéfico do aumento da capacidade de absorção e eficiência do uso da luz, apesar de manter a relação positiva com a produtividade, pode ser coibido por outros fatores limitantes (LE MAIRE, GUILLEMOT, *et al.*, 2019).

Dentre os diversos fatores limitantes, o déficit hídrico se destaca por sua elevada capacidade em inibir os benefícios do aumento de absorção e eficiência do uso da luz, principalmente em cultivos adultos após o fechamento do dossel (CHRISTINA, NOUVELLON, *et al.*, 2015, 2017). Além de fatores relacionados à variação entre materiais genéticos, condições de sítio e manejo florestal (FORRESTER, AMMER, *et al.*, 2018), espaçamento de plantio (NARDINI, SCHWERZ, *et al.*, 2021), heterogeneidade e competição dentro do povoamento (BINKLEY, CAMPOE, *et al.*, 2013, BINKLEY, STAPE, *et al.*, 2010, HAKAMADA, HUBBARD, *et al.*, 2020).

O déficit hídrico influencia diretamente no processo de fotossíntese e transpiração, através da sua importante atuação no mecanismo de condutância estomática. Ambos os processos estão relacionados à lógica de funcionamento dos estômatos, onde em condições de déficit hídrico eles se fecham para a manutenção do potencial de água na folha acima de um valor crítico, oferecendo uma resistência à difusão da água de dentro da folha para atmosfera. No entanto, esse mecanismo de segurança acarreta uma redução na condutância estomática e se constitui como uma barreira para a aquisição de CO₂. Em resumo, a estratégia de reduzir a perda de água para a atmosfera e manutenção do potencial hídrico da folha em condições de déficit hídrico do solo, gera uma redução indireta nas taxas fotossintéticas e consequentemente no potencial produtivo do cultivo (LANDSBERG, WARING, 2017, STAPE, BINKLEY, *et al.*, 2004).

O déficit hídrico e a eficiência da nutrição são considerados importantes fatores limitantes ao crescimento do cultivo de eucalipto. A adoção da técnica de irrigação em cultivos comerciais de eucalipto em larga escala e ao longo de todo o ciclo, não é uma prática usual e é pouco difundida. Além disso, a adoção da técnica de irrigação deve vir acompanhada de um manejo nutricional adequado à novos tetos produtivos e condições operacionais. A interação da adoção da tecnologia de irrigação com um manejo de fertilização potencial, pode permitir o alcance de produtividades mais elevadas e uma redução do *Yield Gap*.

Tendo em vista o que foi exposto, o presente estudo tem como objetivo a identificação dos fatores limitantes ao crescimento e suas respectivas magnitudes: abordagem do desempenho e manejo da fertilização e irrigação; além dos respectivos objetivos específicos: (i) Análise da qualidade do balanço e equilíbrio nutricional; e (ii) Compreensão do comportamento e exigências de diferentes materiais genéticos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido em dois sítios florestais na região Costa Leste do estado do Mato Grosso do Sul entre os municípios de Três Lagoas e Selvíria, com características distintas em relação às características físico-hídricas do solo. Os sítios estão separados à uma distância de quinze quilômetros em linha reta e apresentam a mesma classificação climática e pedológica: clima tropical Aw (classificação de Koppen-Geiger), com verão quente e úmido e inverno seco. A precipitação média anual é de 1294mm (Normal Climatológica 1981 – 2010 INMET), a temperatura do ar média anual varia de 20,3°C a 27,0 °C; latossolo vermelho. As mudas de eucalipto foram alocadas em um espaçamento de 3,40m x 2,60m perfazendo um total de 1131 árvores/hectare.

O primeiro sítio está localizado na Fazenda Barra Dourada (20° 31' S 51° 44' W). Apresenta teores médios (valores referentes à um metro de profundidade): argila 12%, areia total 86,75% (areia grossa 11,75% e areia fina 75%) e silte 1,25%. Densidade do solo média é de 1,48 gcm⁻³ e porosidade total de 35%. O transplântio das mudas ocorreu no dia 21/04/2021.

O segundo sítio florestal está localizado na Fazenda Da Mata II (20°29' S 51°31'W). Com teores médios: argila 30,5%, areia total 67,5% (areia fina 46% e areia grossa 21,5%) e silte 2%. Apresenta uma densidade média de 1,39 gcm⁻³ e uma porosidade total de 39%. O transplântio das mudas ocorreu no dia 25/05/2021. Os valores referentes à capacidade de água disponível no solo para ambos os sítios florestais estão detalhados na tabela 1.

Tabela 1 - Análise da capacidade de água disponível no solo por sítio florestal.

Sítio Florestal	Camada do solo (cm)	CC g/g	PMP g/g	Ds g/cm ³	AD (kg/kg)	CAD (m ³ /m ³)	CAD média (m ³ /m ³)
Sítio Florestal I	0-20	0,12	0,01	1,55	0,11	0,176	0,1617
	20-40	0,13	0,01	1,48	0,12	0,177	
	40-70	0,10	0,01	1,45	0,09	0,131	
	70-100	0,12	0,01	1,45	0,11	0,164	
Sítio Florestal II	0-20	0,12	0,02	1,40	0,10	0,137	0,2028
	20-40	0,15	0,01	1,34	0,14	0,182	
	40-70	0,18	0,01	1,32	0,17	0,218	
	70-100	0,19	0,01	1,49	0,18	0,274	

CC: Capacidade de campo (g/g); PMP: Ponto de Murcha Permanente (g/g); Ds: Densidade do solo (g/cm³) Água disponível (kg/kg); CAD: Capacidade de Água disponível (m³/m³). Fonte: Autor (2024).

2.2 LAYOUT EXPERIMENTAL E CLONES AVALIADOS

Seis materiais genéticos foram submetidos à três tratamentos com quatro repetições em dois sítios florestais distintos, totalizando 144 unidades experimentais. Os tratamentos foram divididos em: (i) Testemunha – Cultivo convencional sem suplementação de irrigação e ou fertirrigação; (ii) Irrigado – Suplementação da demanda hídrica via sistema de irrigação; (iii) Fertirrigado – Suplementação da demanda hídrica e nutricional parcelada via sistema de irrigação.

Os materiais genéticos avaliados e os respectivos critérios para adoção foram: MG1, MG3, MG4, MG5 (*Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis*); com as características predominantes: Resistência estresse hídrico, densidade, densidade e rendimento, e crescimento respectivamente. O MG2 (*híbrido de Eucalyptus urophylla*) se apresenta com uma elevada adaptação e resistência a pragas, enquanto o MG6 (*Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis*) x *Eucalyptus urophylla*) se destaca pela resistência ao estresse hídrico. Cada material genético apresentava 4 parcelas (repetições), que por sua vez continham 3 linhas com 15 plantas/linha, totalizando 45 plantas/parcela e uma área de 400m².

2.3 MANEJO NUTRICIONAL

Os manejos nutricionais adotados se diferenciaram na dose e no seu respectivo método de aplicação e parcelamento. Para todos os tratamentos foi considerado previamente ao plantio a correção da acidez com a aplicação de 1900kg ha⁻¹ de calcário dolomítico (35% CaO + 12% MgO).

Os tratamentos I e II (testemunha e irrigado) apresentaram um manejo da fertilização similar. A estratégia consistiu em um parcelamento subdividido em pré-plantio, fertilização de base com 250 kg/ha de organomineral e 150 kg/ha de super simples convencional, primeira cobertura após seis meses de plantio com aplicação de 270kg/ha de NK mais micronutrientes (10-00-33 + 12S + 0,4%B + 0,4Cu + 0,4%Zn), segunda cobertura com dez meses de plantio de 420 kg/ha de NK mais enxofre e boro (09-00-30 + 7%S + 1,8%B), e uma terceira cobertura aos quatorze meses de idade com suplementação de N, S, B, Cu, Zn. O detalhamento do montante aplicado por nutriente se encontra na tabela 2.

Tabela 2- Dose dos nutrientes aplicadas no manejo I e II.

Época	Nutrientes aplicados (kg/ha)								
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Zn
Pré-plantio				475	137				
Base	22	113	40	49		44	0,93	1,24	1,55
1ª cobertura	27		89			35	1,08	1,08	1,08
2ª cobertura	38		126			29	7,56		
3ª cobertura	137					20	6,24	6,24	6,24
Total	224	113	255	524	137	128	15,81	8,56	8,87

Fonte: Autor (2024).

O manejo nutricional para o tratamento III foi igual ao detalhado para o manejo I e II, no entanto após o décimo quinto mês iniciou-se a suplementação de nutrientes via sistema de irrigação. A recomendação dos nutrientes variou para cada sítio florestal e foi condicionada ao monitoramento nutricional através da coleta e análises foliares realizadas aos doze e dezoito meses após o plantio.

O procedimento para a coleta de folhas se baseou em seleção de quinze ramos por árvore, alocados nos quatros diferentes pontos cardeais na parte superior do terço médio. Após a coleta dos ramos, quatro folhas do terço médio foram coletadas de cada ramo, totalizando sessenta folhas coletadas por árvore.

A partir da primeira análise foliar, foi elaborada uma recomendação de adubação específica para cada sítio florestal. A escolha dos fertilizantes era de acordo com a demanda nutricional, questões operacionais, compatibilidade química para mistura e análise química da água de irrigação. Para o sítio florestal I, a suplementação nutricional via o sistema de irrigação se iniciou no décimo quinto mês após o plantio. Um parcelamento equitativo semanal a partir do décimo quinto até o vigésimo mês foi realizado totalizando vinte e quatro aplicações. Foram aplicados 45 kg/ha de ácido bórico, 69 kg/ha de sulfato de amônio, 35kg/ha de sulfato de zinco, 28,3kg/ha de sulfato de cobre e 318 kg/ha de ureia. Para o sítio florestal II, os fertilizantes utilizados foram os mesmos, no entanto em doses diferentes: 58 kg/ha ácido bórico, 90 kg/ha sulfato de amônio, 13kg/ha de sulfato de zinco, 7kg/ha sulfato de cobre e 366 kg/ha de ureia.

Após a segunda análise foliar, uma nova recomendação de adubação foi elaborada e as aplicações ocorreram no intervalo do vigésimo sexto mês até o trigésimo mês após o plantio. Para sítio florestal I, os fertilizantes e as respectivas

doses foram: 170 kg/ha de Cloreto de Potássio KCl, 117kg/ha de fosfato monoamônico MAP e 630 kg/ha de sulfato de magnésio. Para o sitio florestal II foram aplicados 363 kg/ha de fosfato monopotássico MKP e 688kg/ha de sulfato de potássio SOP. O acumulado das aplicações de fertirrigação estão detalhados na tabela 3.

Tabela 3- Dose de nutrientes aplicados via fertirrigação no tratamento III.

	Dose de Nutrientes aplicados via Fertirrigação (kg/ha)							
	N	P	K	Mg	S	B	Cu	Zn
Sítio I	173,1	57,9	176,9	49,6	138,8	7,6	7,1	7,0
Sítio II	188,3	109,1	272,8	0,0	91,2	9,8	1,6	2,7

Fonte: Autor (2024).

Para cada aplicação, o fertilizante foi solubilizado em 1800 L de água e injetada na adutora por meio do injetor (FertiOne™, Netafim®) por três horas, com uma taxa de injeção de 600 L h⁻¹. Em geral, a fertirrigação foi realizada no terço final do tempo de irrigação. O tempo de injeção e tempo de limpeza da fertirrigação foi suficientemente longo para garantir uma uniformidade de distribuição do fertilizante equivalente à uniformidade de distribuição da água (DA SILVA et al., 2022).

2.4 SISTEMA E MANEJO DE IRRIGAÇÃO

O sistema de irrigação adotado foi gotejamento com gotejadores autocompensantes - Dripnet PCAS 16250™, Netafim®, espaçados em 0,45 metros na linha, com uma taxa de aplicação de 1,3mm/hora. Cada tratamento foi alocado em um setor de irrigação com 84 linhas de plantio com um comprimento de 112 metros, incluindo todos os materiais genéticos em estudo e totalizando uma área de 3,125 hectares/setor. Cada setor funciona de maneira individualizada possibilitando a adoção dos manejos de forma independente.

A estratégia para o manejo da irrigação consistiu em repor a totalidade da evapotranspiração do cultivo (ET_c), adotando turno de rega variável e uma profundidade de raiz efetiva de um metro de profundidade. A estimativa da ET_c foi realizada pelo método FAO modificado (BERNARDO et al., 2019). O referido método se baseia na utilização da evapotranspiração de referência (ET_o), estimado pela metodologia de Pennam-Monteith (ALLEN et al., 1998), além de um coeficiente de cultivo – K_c (ALLEN et al., 1998; DORENBOS & PRUITT, 1977), acompanhado de um

coeficiente de estresse hídrico – K_S e um coeficiente de localização. O método adaptado é representado pela equação 1:

$$ET_C = ET_0 \times K_C \times K_S \times K_L \quad (1)$$

Onde, ET_C é a evapotranspiração do cultivo (mm^{-1}dia); ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm^{-1}dia); K_C é o coeficiente de cultivo, adimensional e variável de acordo com o estágio fenológico. Inicialmente foram utilizados valores de K_C advindos da literatura (ALVES et al., 2020) que posteriormente foram adaptados a partir de um monitoramento da água disponível no solo com coleta e análise da umidade gravimétrica. O K_S coeficiente de estresse hídrico, adimensional, valores diários de acordo com a água disponível para o cultivo (BERNARDO et al., 2019); e o K_L coeficiente de localização, diretamente relacionado à porcentagem de área molhada (PAM) ou porcentagem de área sombreada (PAS), utilizando-se o maior valor dentre essas porcentagens, de acordo com a metodologia proposta por Fereres em 1981 (VILLALOBOS & FERERES, 1990).

2.5 MENSURAÇÃO FLORESTAL E ANÁLISE EXPLORATÓRIA

O acompanhamento do desenvolvimento do cultivo foi realizado através de inventários florestais realizados a partir dos doze meses de idade e com intervalos a cada seis meses (12, 18, 24 e 30 meses de idade). Cada material genético apresentava quatro parcelas para cada tratamento, sendo composto por três linhas com quinze árvores cada, totalizando quarenta e cinco árvores com uma área total de aproximadamente quatrocentos metros quadrados. Todos os indivíduos da parcela foram medidos em relação à CAP - circunferência na altura do peito (1,30m) com o auxílio de fita métrica e conseqüentemente transformado em DAP – Diâmetro na altura do peito, HT – altura total com a utilização de um hipsômetro digital, a partir destas informações o volume foi estimado de acordo com a equação alométrica ajustada para cada clone. Para representar a estimativa de volume foi considerado o volume comercial com casca, representado pela sigla VCCC (m^3/ha).

2.6 ANÁLISE DO EQUILÍBRIO E BALANÇO NUTRICIONAL

A partir das coletas foliares e dos respectivos teores obtidos nas folhas, foi aplicado o índice diagnóstico de balanço nutricional - Índice de Balanço de Kenworthy, IBK (KENWORTHY, 1961). Objetivou-se com a aplicação deste índice a simplificação da interpretação dos resultados das análises foliares e análise de cada nutriente de maneira isolada dos demais, permitindo a compreensão do status do balanço em relação à população de referência. Foi adotado uma variabilidade de 20% do teor ótimo, que por sua vez foi extraído dos valores da população de referência apresentados em Galdino, 2015. A classificação dos resultados se deu de acordo com as faixas apresentadas na figura 1. Para o cálculo do índice, as seguintes fórmulas matemáticas são aplicadas para cada nutriente:

$$P = 100 \times \frac{\text{teor na amostra}}{\text{teor ótimo}} \quad (1)$$

$$I = CV \times \frac{(\text{teor na amostra} - \text{teor ótimo})}{\text{teor ótimo}} \quad (2)$$

$$IKW = P - I \quad (3)$$

Figura 1- Classificação do Índice de Balanço de Kenworthy, IBK

CLASSIFICAÇÃO	FAIXA	
DEFICIENTE	<	50
ABAIXO DO NORMAL	50	83
SUFICIENTE	83	117
ACIMA DO NORMAL	117	150
EXCESSIVO	>	150

Fonte: KENWORTHY (1961).

Concomitante à avaliação do balanço nutricional, foi aplicado a metodologia do Sistema Integrado de Diagnóstico e Recomendação – Método DRIS (BEAUFILS, 1973), para avaliação do equilíbrio nutricional, considerando a população de referência apresentada por Galdino, 2015. O método em questão leva em consideração as relações duais entre teores de nutrientes, incorporando a variabilidade dessas relações duais na população de referência. Para medir o afastamento entre o valor da relação da lavoura sob diagnóstico e a média, de modo a

padronizar a escala em unidades de desvio padrão, foi aplicado o cálculo das funções DRIS proposto por Jones, 1981:

$$f\left(\frac{x}{y}\right) = \frac{\left(\frac{x}{y}\right) - \left(\bar{X}\left(\frac{x}{y}\right)\right)}{\sigma\left(\frac{x}{y}\right)} \quad (4)$$

Onde X/y é a relação dual (ex. N/P, N/K), \bar{X} é o teor médio do nutriente na população de referência, σ é o desvio padrão da amostra de referência. O valor do índice DRIS indica o afastamento em relação ao ponto ótimo (média da norma), expresso em unidades de desvio padrão. O somatório dos índices será sempre igual a zero, a ordem crescente dos índices indica a sequência dos mais limitante para o menos limitante. Após o cálculo do índice DRIS para todos os macros e micronutrientes, foi obtido o Índice de Equilíbrio Nutricional – IEN, que representa o grau de equilíbrio global da lavoura. Esse índice é obtido através do somatório dos valores absolutos dos índices DRIS de cada nutriente. Para interpretação dos resultados obtidos de DRIS e IEN, considera-se que quanto mais próximo de zero, mais equilibrado está o cultivo em relação à população de referência.

2.7 ANÁLISE DOS COMPONENTES PRINCIPAIS

Com o objetivo de compreender a interação das variáveis relacionadas à sítio florestal, suplementação de água e nutrientes via sistema de irrigação, manejo nutricional, materiais genéticos e sua respectiva resposta aos diferentes tratamentos e sítios florestais, foi proposto a aplicação da técnica multivariada de análise de componentes principais - PCA.

Devido à elevada variabilidade entre materiais genéticos e tratamentos, optou-se em estratificar as informações e a análise por material genético. Cada material genético foi submetido à uma análise de PCA, considerando as variáveis explicativas: Valores de IBK e DRIS para todos os macro e micro nutrientes (duas coletas, 12 e 18 meses de idade), IEN, volume irrigado, dose de fertilizantes, quantidade de eventos de irrigação, quantidade de eventos de fertirrigação, lâmina média, precipitação acumulado, características edáficas dos sítios florestais (CAD, argila, areia total, relação areia grossa/areia total, densidade do solo, matéria orgânica) e a característica de crescimento VCCC m³/hectare.

Esse compilado de informação foi organizado e submetido à análise PCA no software estatístico TIBCO Statistica ® 14.1. Foi definido previamente a redução da dimensionalidade dos dados e a determinação do número de componentes principais visando obter o mais próximo de ao menos 70% da variação total (RENCHEER, 2002). Outro critério adotado foi o de Kaiser (KAISER, 1958), onde o autor recomenda a seleção de componentes principais que apresentem um autovalor maior ou igual a 1,0. A partir deste critério, estaríamos selecionando sempre os componentes que explicam a maior parte da variação no conjunto de dados. Após a seleção dos componentes principais, a mesma lógica foi aplicada às variáveis, onde foram selecionadas todas as que apresentaram um *loading* acima de 0,7, o que significa que são variáveis com um r^2 superior à 0,5 e que explica no mínimo 50% do componente principal.

2.8 MENSURAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DAS VARIÁVEIS EXPLICATIVAS

A partir da seleção dos componentes principais e das respectivas variáveis de acordo com os critérios mencionado anteriormente. Foi aplicado uma lógica de cálculo para obter as comunalidades e a respectiva contribuição e peso das variáveis.

Os *loadings* relativos à cada variável e componente principal foram elevados ao quadrado e as comunalidades obtidas. Em seguida, as comunalidades foram multiplicados pelo autovalor respectivo de cada componente principal e somadas, representando a contribuição de cada variável. O somatório de todas as contribuições e a respectiva proporcionalidade foi realizada para se obter a informação em porcentagem. Para a obtenção dos pesos de cada variável foi considerado a relação do respectivo valor dividido pelo menor valor obtido.

Com os valores de peso para cada variável foi realizado um agrupamento das variáveis de acordo com as respectivas características. As variáveis foram agrupadas de acordo com: indicadores da qualidade da nutrição, irrigação, fertilização (dose), sítio florestal e parcelamento da fertilização. A partir da formação dos grupos foi calculado a média dos pesos das respectivas variáveis contidas em cada grupo. Após a definição da média dos pesos das variáveis contidas em cada grupo, foi considerado a relação do valor médio obtido por cada grupo em relação ao menor valor obtido, obtendo assim o peso para cada grupo.

A partir da identificação das variáveis de contribuição e seu respectivo peso, foi realizado uma análise sob material genético que obteve uma menor explicação da variação em relação à suplementação de água via sistema de irrigação. Para esta análise foi considerado os dados do desempenho do cultivo (variável crescimento VCCC (m³/hectare)). Para definir se os valores de produtividade se diferenciaram estatisticamente foi aplicado uma análise de Modelo Linear Generalizado Misto – GLMM através do pacote LME4 do repositório r. Os modelos selecionados foram submetidos à uma estimativa de médias de mínimos quadrados, a partir do pacote *emmeans* ®. Após a determinação das médias, um teste *post hoc* e comparações múltiplas entre pares foi aplicado para identificar quais médias diferem a partir do pacote *multcomp* ® com a função *cld*. O teste Tukey foi adotado com um $\alpha = 0,05$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CLIMA E IRRIGAÇÃO

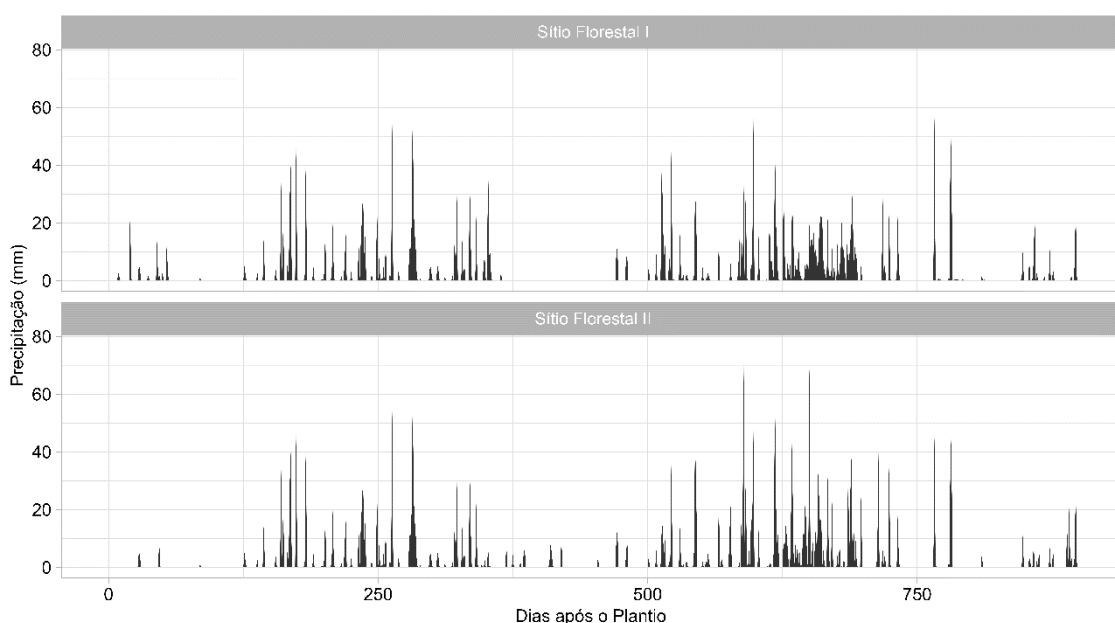
As variáveis climáticas monitoradas desde o transplântio das mudas até o último inventário florestal possibilitou compreender o comportamento dos materiais em campo e identificar períodos de estiagem e variação da demanda evapotranspirométrica ao longo do ciclo. As precipitações acumuladas variaram entre os sítios florestais: O sítio florestal II apresentou um volume acumulado de 2638mm, seguido pelo sítio florestal I com 2529mm (Figura 2). Essa diferença se deu basicamente no período avaliado em 2023, onde a diferença de precipitação entre sítios foi de 105mm maior para o sítio II.

A partir do monitoramento climático foi possível identificar uma variabilidade de precipitação em relação à normal climatológica (1981 – 2015 Três Lagoas-MS, INMET). A normal climatológica para o local do estudo é de 1294,4 mm, no entanto no ano de 2022 o acumulado de precipitação foi de 1032,1 e 1027,6mm para os sítios florestais I e II respectivamente, uma queda de 20% em relação à normal. Considerando apenas o período de janeiro a outubro para contrastarmos com o período de 2023, a normal climatológica é de 956mm, no entanto no ano de 2022 durante o mesmo período, foi registrado uma precipitação acumulada de 771 mm e 710mm, referente aos sítios florestais I e II, isso significou uma queda no volume acumulado de 19,3% e 25,7% respectivamente.

No ano subsequente o comportamento foi o inverso, com um volume acumulado (janeiro – outubro) de 1095,8mm e 1207,3 mm para os sítios I e II, expressando um incremento de precipitação de 14,6% e 26,3% para os respectivos sítios florestais.

Para o sítio florestal I, durante o período de 25/04/2022 (DAP 364) até o dia 07/08/2022 (DAP 469) foi registrado um longo e bem definido período de estiagem (105 dias) que coincidiu com início das irrigações nos setores tratamentos II e III. No ano subsequente, esse padrão de distribuição de chuvas não se repetiu e foram registrados seis eventos de precipitação com volume acima de 20mm/dia e um volume acumulado de 250,8mm entre os meses de abril a agosto (DAP 706 – 828). Esse volume e distribuição de chuva minimizou o déficit hídrico para o tratamento testemunha.

Figura 2- Distribuição Pluviométrica – Sítio Florestal I 2529 mm acumulados; Sítio Florestal II 2638mm.



Fonte: Autor (2024).

A lâmina de irrigação aplicada para cada tratamento variou de acordo com o sítio florestal, volume e distribuição de precipitação, fila de prioridade e questões operacionais. Foi definido a prioridade dos setores do tratamento III, para alcançar o objetivo de aplicar e parcelar toda a recomendação de fertilizantes. As condições operacionais do sítio florestal I foram satisfatórias e não apresentaram limitação de água e ou energia, o que permitiu uma boa condução e aplicação da estratégia de manejo de irrigação.

Para uma melhor compreensão e visualização da distribuição de chuvas, irrigação e respectiva água disponível no solo, foram elaborados balanços hídricos de cada tratamento e seu respectivo sítio florestal. O tratamento II apresentou um acumulado de irrigação de 920mm distribuídos em cinquenta eventos de irrigação com uma lâmina média de 18,5mm (Figura 3). A irrigação se deu início apenas em abril de 2022, doze meses após o transplântio das mudas. As medições florestais foram realizadas em um intervalo de seis meses a partir do décimo segundo mês, a data das medições estão destacadas no gráfico com a linha tracejada em vermelho.

O volume acumulado de irrigação para cada intervalo de medição foi de 384 mm (12 – 18 meses); 211,5 mm (18 - 24 meses) e 324,5 mm (24 – 30 meses). A umidade do solo estimada para o período total foi de 69,2% da capacidade de campo (considerando um metro de profundidade de raiz para fins de manejo de irrigação). Considerando um recorte do balanço hídrico a partir do início da suplementação de água via sistema de irrigação, a umidade média estimada vai para 80,6% da capacidade de campo. Os pontos em vermelho distribuídos ao longo do gráfico representam checagem de umidade e calibração do balanço através da coleta e análise da umidade gravimétrica do solo. O balanço hídrico do tratamento III (Figura 4) apresenta um perfil semelhante ao tratamento II, no entanto com algumas particularidades.

Figura 3 - Balanço Hídrico Tratamento II- Sítio Florestal I.

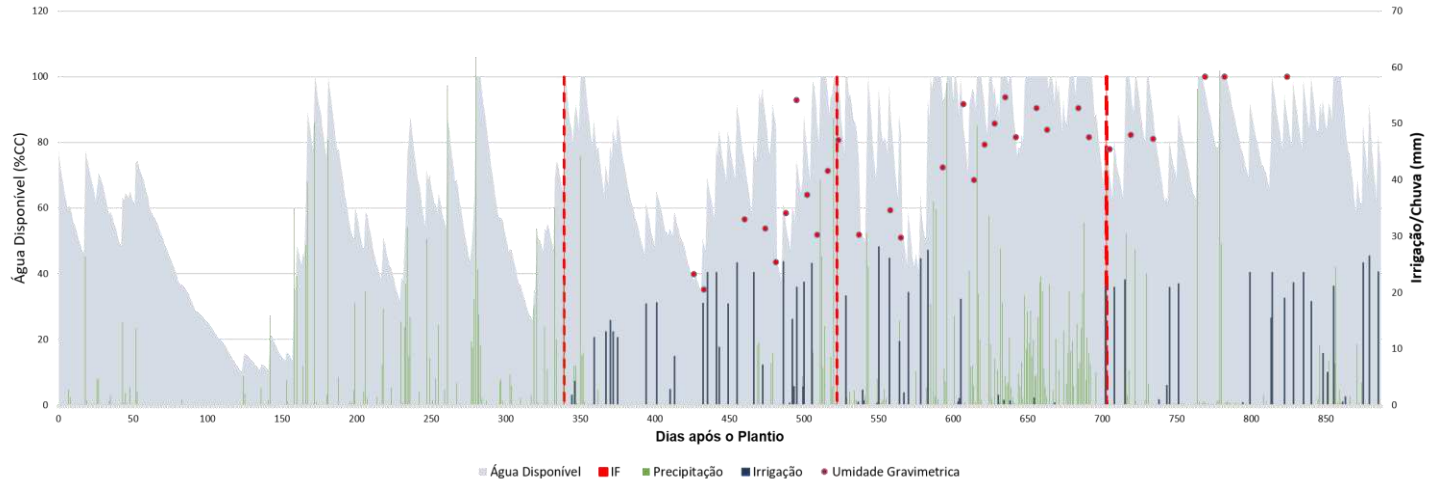
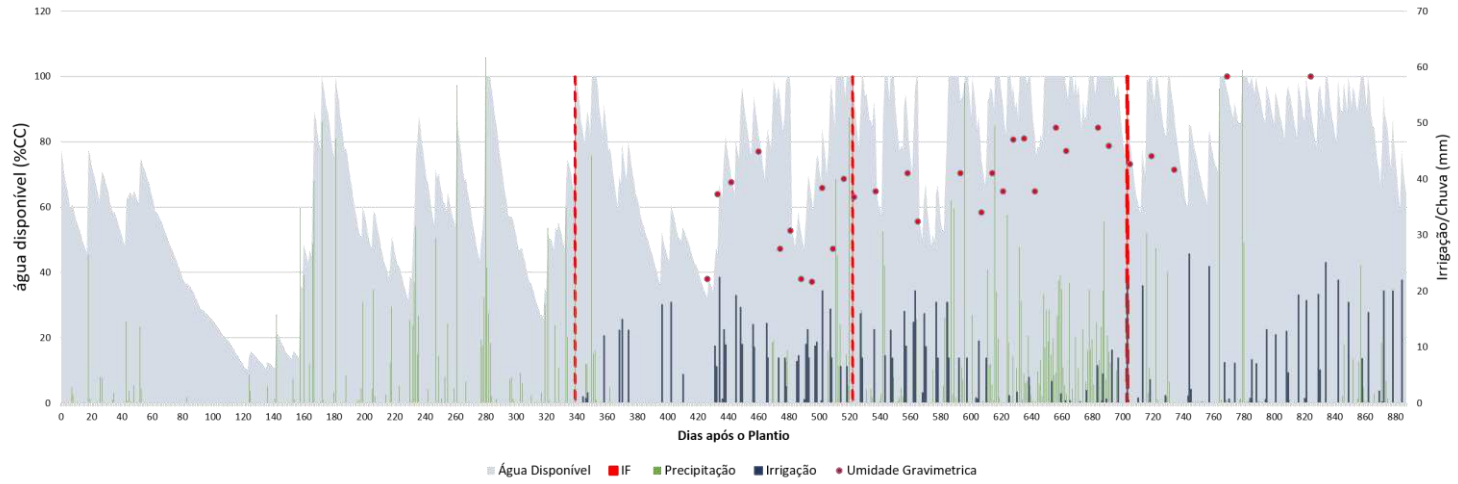


Figura 4 - Balanço Hídrico Tratamento III – Sítio Florestal I.



Fonte: Autor (2024)

Os tratamentos com aplicação de fertilizantes via sistema de irrigação (Fertirrigação) foram prioritários frente aos demais para atender ao parcelamento e a programação da dose. O tratamento III apresentou um acumulado de irrigação de 1065mm divididos em sessenta e seis eventos de irrigação com uma lâmina média de 16,2mm. Deste total de eventos, 86% das aplicações foram eventos de fertirrigação, performando a aplicação de água e nutrientes (cinquenta e sete eventos de fertirrigação). O montante acumulado foi distribuído de acordo com os inventários, sendo acumulado por intervalo 400mm, 312,9 e 352,1mm respectivamente.

O sítio florestal II apresentou algumas limitações operacionais, o que limitou o montante de irrigação aplicado. O tratamento III (Figura 5) foi priorizado e apresentou um acumulado de 730mm distribuídos em quarenta e duas aplicações e uma lâmina média de 17,4mm. O volume irrigado foi distribuído entre as medições florestais: 224mm, 219mm e 288mm. Do total de aplicações, trinta e quatro foram fertirrigação, representando mais de 80% das aplicações. Apesar de um montante acumulado menor, o tratamento apresentou estimativas de umidade similares ao tratamento III do sítio florestal I, com uma umidade de 67,2% considerando todo o período e 79,3% considerando apenas o período pós implantação do sistema de irrigação.

Já o tratamento II foi prejudicado em relação ao montante aplicado. Com um volume de irrigação acumulado de apenas 192mm distribuídos em quinze aplicações e uma lâmina média de 12,8mm (Figura 6). As irrigações foram concentradas apenas entre as medições 12 – 18 meses com 117mm e 18 – 24 meses com 75mm. No último intervalo não foi possível realizar irrigações e a suplementação de água se deu somente pela chuva. Com esta limitação de irrigação, o tratamento apresentou uma umidade estimada de 60,9% considerando todo o ciclo e de 66,3% considerando o período após a implantação do sistema.

Figura 5 - Balanço Hídrico tratamento III- Sítio Florestal II.

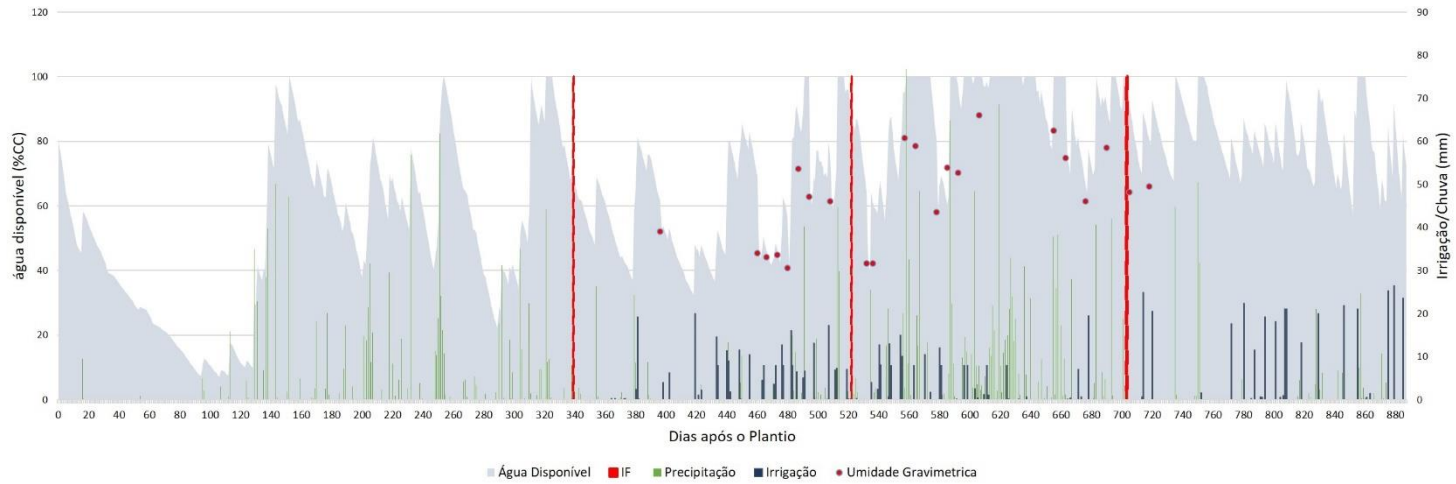
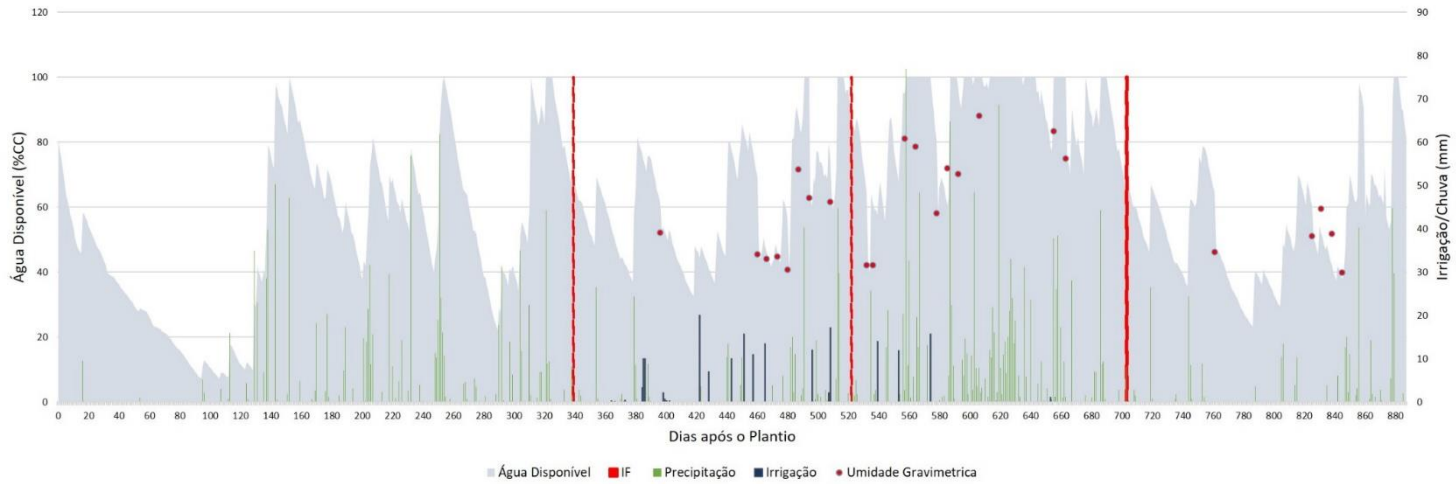


Figura 6 - Balanço Hídrico Tratamento II- Sítio Florestal



Fonte: Autor (2024).

O compilado das informações de volume irrigado de cada sítio e tratamento se encontra na tabela 3.

Tabela 3 - Informações sobre irrigação e fertirrigação estratificado por tratamento e sítio florestal.

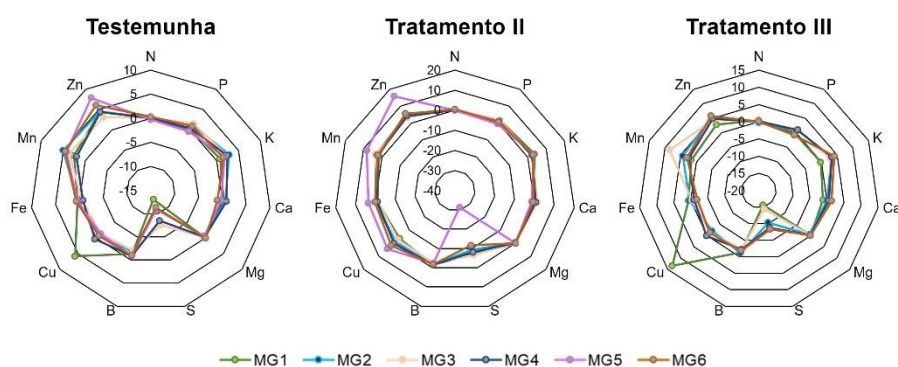
Sítio Florestal	Tratamento	Irrigação acumulada (mm)	Eventos de irrigação	Eventos de Fertirrigação	Lâmina média (mm)
Sítio Florestal I	Tratamento I				
	Tratamento II	920	50		18,5
	Tratamento III	1065	66	57	16,2
Sítio Florestal II	Tratamento I				
	Tratamento II	192	15		12,8
	Tratamento III	730	42	34	17,4

Fonte: Autor (2024)

3.2 AVALIAÇÃO DO EQUILÍBRIO E BALANÇO NUTRICIONAL

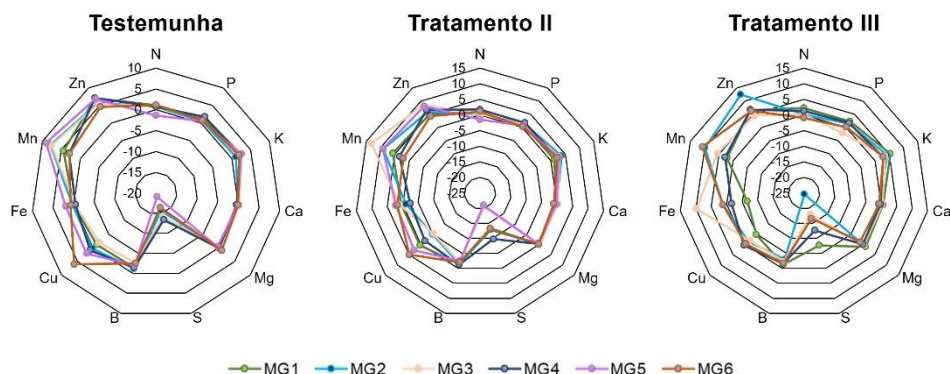
A partir das coletas e análises foliares, foi aplicado a metodologia do Sistema Integrado de Diagnóstico e Recomendação – Método DRIS, para estimar o nível de equilíbrio dos nutrientes no cultivo em estudo. A primeira coleta foi realizada no dia 20/04/2022 aos 12 meses de idade, ainda sem influência da suplementação de água e nutrientes via sistema de irrigação. Entre os macronutrientes avaliados o enxofre apresentou maior variabilidade e indicou uma carência do nutriente considerando o equilíbrio ideal da população de referência para os sítios I e II (Figura 7 e Figura 8). Os nutrientes N, P e K se apresentaram em equilíbrio com pequenas variações acima da referência. Por outro lado, os micronutrientes zinco, manganês e cobre apresentaram valores mais distantes do ponto zero da população de referência, e se apresentaram como um excedente na condição de equilíbrio.

Figura 7 - Primeira Coleta de folhas – Sítio Florestal I – Análise DRIS.



Fonte: Autor (2024)

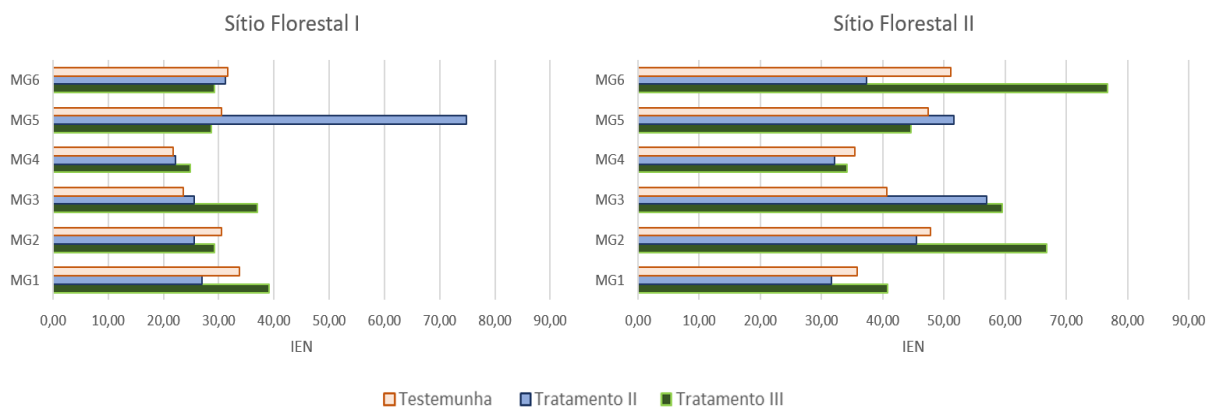
Figura 8 - Primeira Coleta de folhas – Sítio Florestal II – Análise DRIS.



Fonte: Autor (2024)

Para sumarizar toda a informação da análise DRIS, foi aplicado o índice de equilíbrio nutricional considerando os valores de DRIS obtidos na primeira análise. Este índice apresentou um comportamento mais uniforme e um melhor desempenho do sítio florestal I (Figura 9). Essa análise nos indica que o programa nutricional desenvolvido e aplicado pela empresa está mais ajustado para condições de sítio mais arenosa (áreas de cultivos majoritárias na região).

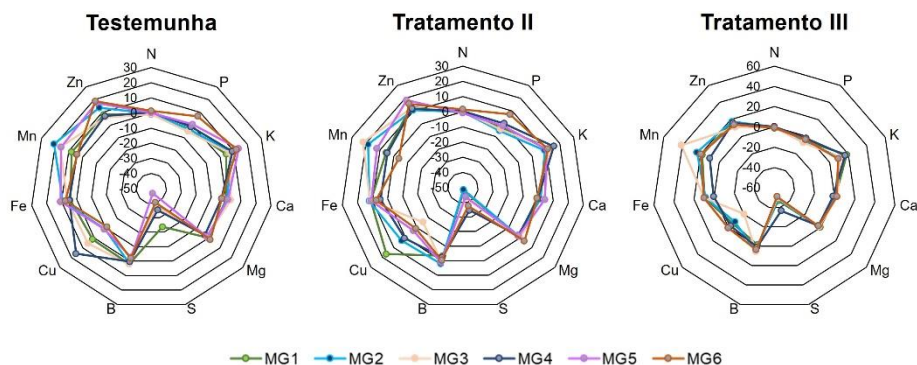
Figura 9 - Índice de equilíbrio nutricional considerando a primeira coleta de folhas



Fonte: Autor (2024)

A segunda coleta foi realizada no dia 09/11/2022 e já contava com a influência dos tratamentos II e III. Ambos os sítios apresentaram um desequilíbrio em relação ao macronutriente enxofre – S (deficiência) e o micronutriente zinco – Zn (excesso) em todos os tratamentos (Figura 10).

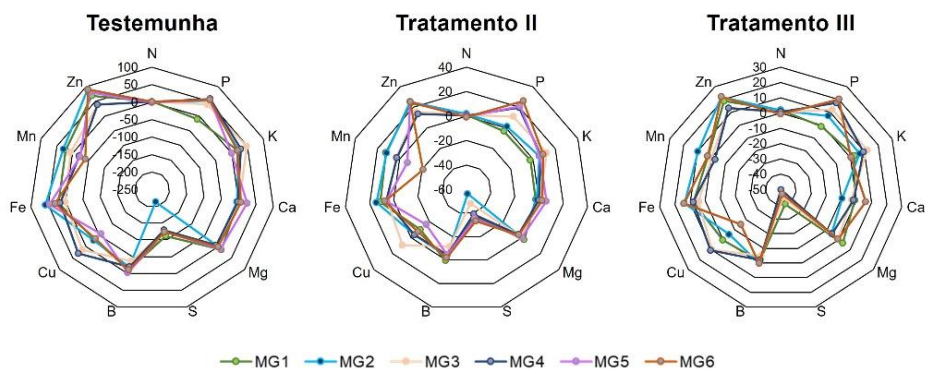
Figura 10 - Segunda Coleta de folhas – Sítio Florestal I – Análise DRIS.



Fonte: Autor (2024)

O tratamento testemunha no sítio florestal II apresentou um desequilíbrio mais acentuado e valores mais distantes do equilíbrio da população de referência (Figura 11). Esse comportamento corrobora com a informação mencionada anteriormente de que o programa nutricional elaborado e aplicado pela empresa está mais ajustado para condições de sítio similares ao sítio florestal I.

Figura 11 - Segunda Coleta de folhas – Sítio Florestal II – Análise DRIS.



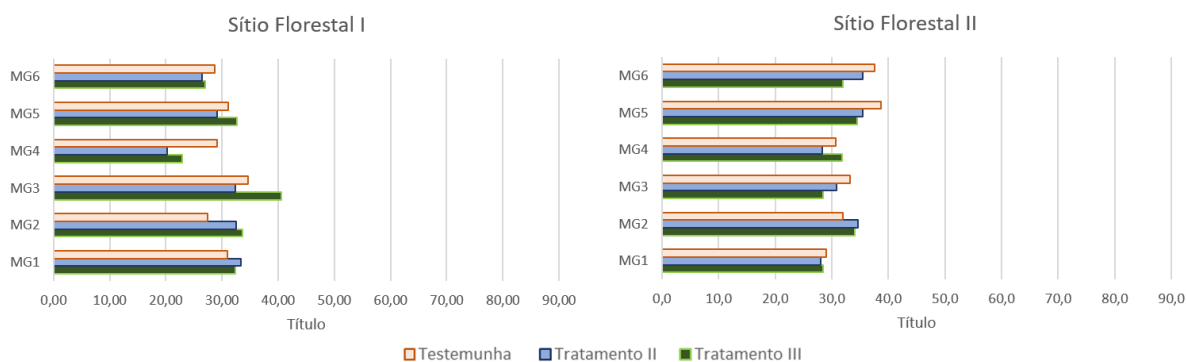
Fonte: Autor (2024)

A ocorrência da deficiência de S nas áreas de cultivo florestal tem aumentado e está diretamente relacionado à baixa fertilidade e elevado grau de intemperismo, uso de fertilizantes concentrados, com a ausência ou baixo teor de enxofre, e ao aumento da produtividade e às sucessivas rotações sem reposição adequada das quantidades exportadas. (ALVAREZ V. et al., 2007).

A avaliação e compreensão do equilíbrio entre os nutrientes é de suma importância para o correto manejo nutricional. Se tratando do macronutriente enxofre, ele está diretamente relacionado com dois importantes macronutrientes, fósforo e nitrogênio. Em condições de deficiência de P e fornecimento de S em excesso, algumas vias metabólicas podem ser comprometidas a apresentar limitação no desenvolvimento do cultivo. No caso do nitrogênio, a adição conjunta dos nutrientes pode resultar em uma interação sinérgica e benéfica ao cultivo (UCHÔA, 1999).

Apesar do desequilíbrio identificado para o macronutriente enxofre, o índice de equilíbrio nutricional apresentou uma melhora em relação à primeira coleta (Figura 12), principalmente no sítio florestal II, onde os valores ficaram mais próximos ao equilíbrio da população de referência.

Figura 12 - Índice de equilíbrio nutricional considerando a segunda coleta de folhas.



Fonte: Autor (2024)

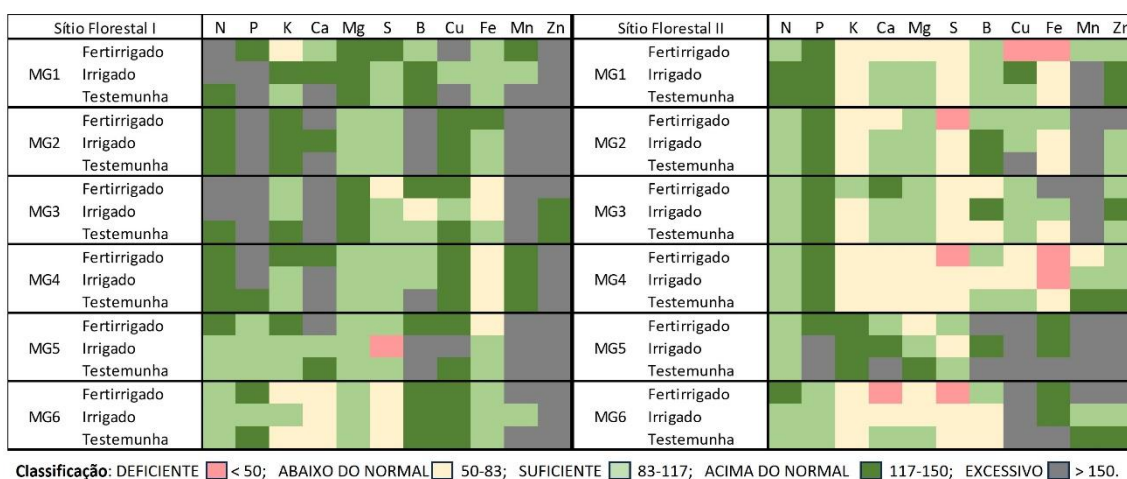
O comportamento para o indicador de balanço nutricional na primeira coleta foi similar ao indicador de equilíbrio nutricional, onde ficou evidenciado que o programa nutricional aplicado é mais ajustado às condições do sítio florestal I, onde foi possível observar que a maior parte dos materiais genéticos apresentaram os teores dos nutrientes na faixa do suficiente ou acima do normal.

O sítio florestal I apresentou apenas um material genético em apenas um tratamento com deficiência de algum nutriente (Figura 13), em contrapartida o sítio florestal II apresentou um desbalanço maior com os macronutrientes potássio e enxofre se apresentando como limitantes, seguidos pelo micronutriente ferro e cobre. Os micronutrientes zinco e manganês se apresentaram como excessivo, corroborando com a análise de equilíbrio DRIS

demonstrada na figura 11, onde fica evidenciado o desequilíbrio dos dois micronutrientes.

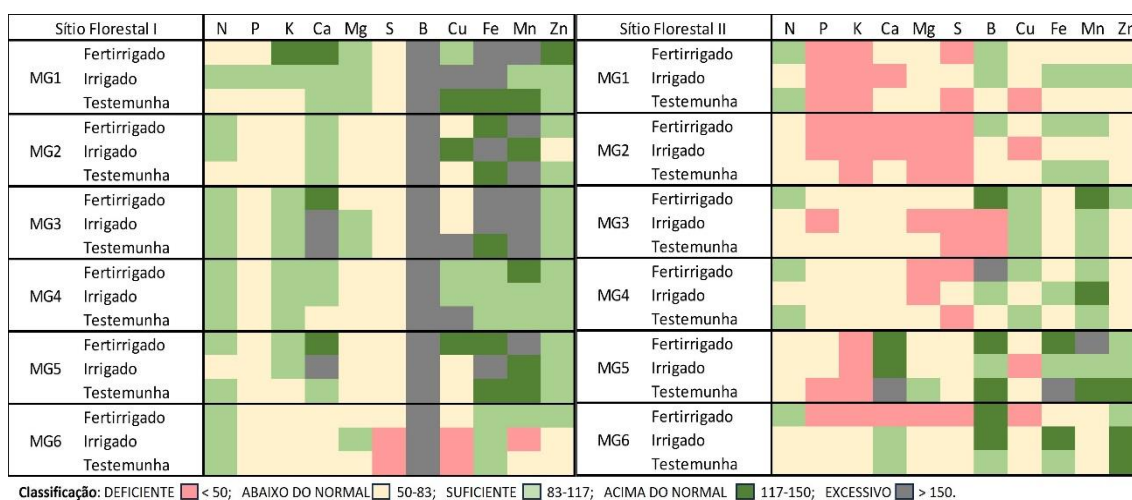
Como mencionado anteriormente, a segunda coleta foi realizada no dia 09/11/2022 e já contava com a influência dos tratamentos II e III. Durante esse intervalo entre coletas foi acumulado os seguintes volumes de irrigação para cada tratamento: Tratamento II: 461 mm e 135mm; tratamento III: 507mm e 262mm, sítio florestal I e II respectivamente. A classificação para a segunda coleta foi mais heterogênea e apresentou um nível de desbalanço maior novamente para o sítio florestal II (Figura 14), reforçando a questão de o programa nutricional estar mais ajustado para o sítio florestal I.

Figura 13 - Classificação do Índice de Balanço de Kenworthy – IBK – Primeira coleta.



Fonte: Autor (2024)

Figura 14 - Classificação do Índice de Balanço de Kenworthy – IBK - segunda coleta.



Fonte: Autor (2024)

Todos os macronutrientes avaliados apresentaram níveis abaixo do normal e ou deficientes na segunda coleta do sítio Florestal II. O sítio florestal I por sua vez se destacou por um excesso do micronutriente boro. Apesar do programa nutricional ter considerado a aplicação de boro no sistema, acredita-se que o fato do cultivo ter sido suplementado com água durante esse período e não permitido a ocorrência de déficit hídrico favoreceu a absorção e disponibilidade desse micronutriente para a floresta.

3.2 ANÁLISE DOS COMPONENTES PRINCIPAIS

Todos os materiais genéticos apresentaram análises de componentes principais com os dois principais componentes explicando mais de 80% de toda a variação dos dados (Tabela 4), atendendo ao critério proposto (RENCHER, 2002). A seleção dos componentes também atendeu ao critério de Kaiser (Kaiser, 1958) e selecionou componentes com autovalores superiores a 1,0. O MG6 apresentou uma explicação acumulada maior comparado aos demais materiais.

Tabela 4 - Resumo das Análises de Componentes Principais.

MG	PC	Autovalor	% Total	Autovalor acumulado	% acumulado
MG1	PC1	21,07	65,85	21,07	65,85
	PC2	7,22	22,55	28,29	88,40
MG2	PC1	16,41	54,70	16,41	54,70
	PC2	9,32	31,07	25,73	85,77
MG3	PC1	21,03	61,85	21,03	61,85
	PC2	7,89	23,20	28,92	85,05
MG4	PC1	17,85	63,74	17,85	63,74
	PC2	7,13	25,45	24,97	89,19
MG5	PC1	18,22	60,73	18,22	60,73
	PC2	7,19	23,96	25,41	84,69
MG6	PC1	12,04	66,87	12,04	66,87
	PC2	4,30	23,90	16,34	90,77

Fonte: Autor (2024)

As variáveis explicativas foram selecionadas seguindo critério restritivo de considerar apenas as variáveis que explicassem 50% ou mais da variação, o que representa um *loading* >0,7. Apesar de toda a variabilidade apresentada entre os materiais genéticos, destaca-se que todos os materiais apresentaram *loadings* maiores que 0,7 no componente principal I e elevada contribuição das variáveis relacionadas às características de sítio florestal. O que nos indica uma importância desse fator na definição do comportamento e desempenho do material genético. A seleção das variáveis e o respectivo valor de *loading* diferenciou entre os materiais genéticos em análise (Tabelas 5).

Tabela 5 - Apresentação das variáveis respostas e seus respectivos loadings de acordo com o componente principal e material genético.

Variáveis	MG1		MG2		MG3		MG4		MG5		MG6	
	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2
DRIS1_P									0,781	-0,061		
DRIS1_Ca							-0,765	0,262				
IBK1_N	-0,794	0,354	-0,883	0,149	-0,848	0,276						
IBK1_P			-0,797	-0,089					0,810	-0,086		
IBK1_N			-0,812	-0,181	-0,702	0,052	-0,829	0,226				
IBK1_Ca					-0,837	0,148	-0,818	0,394				
IBK1_S			-0,868	0,103								
IBK1_B											0,714	0,314
IBK1_Cu									0,725	-0,111		
IBK1_Fe									0,754	-0,023		
IBK1_Zn					-0,702	0,075						
DRIS2_N	0,863	-0,264	0,821	-0,153	0,804	-0,026						
DRIS2_P					0,934	-0,232	0,940	-0,249	0,900	-0,341		
DRIS2_Mg									0,728	0,050		
DRIS2_B					-0,931	-0,064						
DRIS2_Mn									-0,799	0,062		
DRIS2_Zn											-0,796	0,099
IEN_2											-0,756	-0,178
IBK2_N					-0,797	0,144	-0,782	0,193			0,822	0,132
IBK2_P	-0,875	0,307										
IBK2_K	-0,938	0,179										
IBK2_Ca	-0,869	0,164					-0,721	0,195	-0,812	0,317		
IBK2_Mg					-0,713	0,355						
IBK2_S	-0,755	0,300	-0,730	0,061	-0,770	0,120						
IBK2_B	-0,870	0,165	-0,899	-0,184	-0,852	0,048						
IBK2_Fe	-0,841	0,256			-0,944	0,019	-0,924	-0,027	-0,804	0,012		
IBK2_Mn					-0,904	0,148						
IBK2_Zn	-0,807	0,309			-0,803	-0,120						

Continuação – Tabela 5.

Variáveis	MG1		MG2		MG3		MG4		MG5		MG6	
	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2
N	-0,449	-0,866	0,349	-0,898	-0,423	-0,901	-0,450	-0,869	-0,475	-0,853	0,209	0,962
P	-0,284	-0,924	0,349	-0,898	-0,265	-0,932	-0,291	-0,915	-0,322	-0,901	0,059	0,994
K	-0,343	-0,914	0,349	-0,898	-0,322	-0,930	-0,348	-0,908	-0,378	-0,893	0,111	0,992
S	-0,571	-0,739	0,349	-0,898	-0,542	-0,797	-0,567	-0,754	-0,586	-0,737		
B	-0,399	-0,894	0,349	-0,898	-0,375	-0,920	-0,402	-0,893	-0,429	-0,876	0,161	0,982
Cu			0,349	-0,898								
Zn			0,349	-0,898								
Chuva	0,939	-0,288	0,9864	0,026	0,9478	-0,279	0,9438	-0,32	0,9143	-0,382	-0,99	0,1002
Argila	0,962	-0,144	0,9621	0,1844	0,9716	-0,147	0,9709	-0,187	0,9471	-0,256	-0,992	-0,045
Areia Total	-0,962	0,1405	-0,961	-0,188	-0,972	0,1433	-0,971	0,1834	-0,948	0,2529	0,9914	0,0482
AF/AT	-0,889	0,4165	-0,984	0,1262	-0,899	0,398	-0,892	0,4385	-0,859	0,4923	0,9629	-0,236
Ds	-0,934	0,3055	-0,988	-0,006	-0,943	0,2955	-0,938	0,3364	-0,908	0,3974	0,9882	-0,119
CAD	0,9309	-0,315	0,988	-0,006	0,9397	-0,304	0,9351	-0,345	0,9047	-0,406	-0,987	0,1287
M.O	0,939	-0,288	0,9864	0,026	0,9478	-0,279	0,9438	-0,32	0,9143	-0,382	-0,99	0,1002
Fert*	-0,532	-0,792	-0,221	-0,768	-0,504	-0,842	-0,53	-0,802	-0,551	-0,786		
Irrigação	-0,854	-0,432	-0,545	-0,725	-0,753	-0,464	-0,801	-0,475	-0,791	-0,473		
Irr. X**	-0,852	-0,452			-0,749	-0,491	-0,796	-0,498	-0,788	-0,494		
Lam. ***			-0,352	-0,745								
I_1****	-0,875	-0,307					-0,809	-0,361	-0,795	-0,364		
I_2****	-0,822	-0,529	-0,514	-0,742	-0,496	-0,843	-0,772	-0,57	-0,769	-0,563		
I_3****	-0,84	-0,442	-0,567	-0,726	-0,494	-0,851	-0,803	-0,475	-0,79	-0,474		

Fert. * = Quantidade de eventos de Fertirrigação; Irr.X** = Quantidade de eventos de irrigação; Lam.*** = Lâmina Média de irrigação; I_1, I_2, I_3**** = Irrigação acumulada nos intervalos entre inventários florestais (12 – 18; 18 – 24; 24 – 30 meses). Fonte: Autor (2024)

3.3 CONTRIBUIÇÃO DAS VARIÁVEIS EXPLICATIVAS

A partir da análise de componentes principais e da respectiva contribuição das variáveis explicativas, foi possível analisar e compreender melhor os resultados das medições florestais e o nível de exigência dos materiais genéticos em análise. As variáveis e respectivas contribuições estão apresentados na tabela 6.

Tabela 6 - Variáveis explicativas e suas respectivas contribuições de acordo com o material genético.

	MG1	MG2	MG3	MG4	MG5	MG6
Indicadores de qualidade de nutrição	22,1%	22,2%	22,0%	21,1%	17,2%	31,5%
Fertilização - Dose	13,1%	18,3%	14,5%	14,3%	13,2%	18,8%
Sítio Florestal	26,8%	30,3%	28,7%	27,1%	35,7%	49,7%
Irrigação	23,0%	17,2%	18,4%	21,5%	19,1%	0,0%
Parcelamento da Dose - Fertirrigação	15,0%	12,1%	16,4%	16,0%	14,8%	0,0%
	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Fonte: Autor (2024)

Os materiais MG1, MG3 e MG4 apresentaram um padrão similar de distribuição de variáveis e sua respectiva explicação. Os respectivos materiais são oriundos do cruzamento *E.urophylla* X *E. grandis*. Esse cruzamento é o mais adotado no Brasil, pois sua adaptação edafoclimática é compatível com as regiões onde estão concentradas as maiores áreas de plantio. A elevada adaptabilidade do *E. urophylla* tem sido considerada no processo de hibridação com *E. grandis*, visando a obtenção de materiais tolerantes à seca e resistentes ao cancro do eucalipto (GONÇALVES, ALVARES, *et al.*, 2013).

Neste grupo de materiais, a variável sítio florestal representou sozinha uma contribuição de 27,5%, seguida pelos indicadores relacionados ao manejo nutricional (Indicadores de qualidade de nutrição e dose) explicando 35% da variabilidade. As variáveis relacionadas à suplementação de água e nutrientes via sistema de irrigação (irrigação + fertirrigação) explicaram em média 37% da variação. De acordo com a tabela 5, os loadings para as variáveis relacionadas à irrigação apresentaram valores entre 0,75 – 0,90 e majoritariamente se concentraram no componente principal um, destacando a importância das variáveis na explicação da variação. Este resultado indica uma maior sensibilidade desses materiais ao déficit hídrico.

O déficit hídrico influencia diretamente no processo de fotossíntese e transpiração, através da sua importante atuação no mecanismo de condutância estomática. Ambos os processos estão relacionados à lógica de funcionamento dos estômatos, onde em condições de déficit hídrico eles se fecham para a manutenção do potencial de água na folha acima de um valor crítico, oferecendo uma resistência à difusão da água de dentro da folha para atmosfera. No entanto, esse mecanismo de segurança acarreta uma redução na condutância estomática e se constitui como uma barreira para a aquisição de CO₂. Em resumo, a estratégia de reduzir a perda de água para a atmosfera e manutenção do potencial hídrico da folha em condições de déficit hídrico do solo, gera uma redução indireta nas taxas fotossintéticas e conseqüentemente no potencial produtivo do cultivo (LANDSBERG, WARING, 2017, STAPE, BINKLEY, *et al.*, 2004).

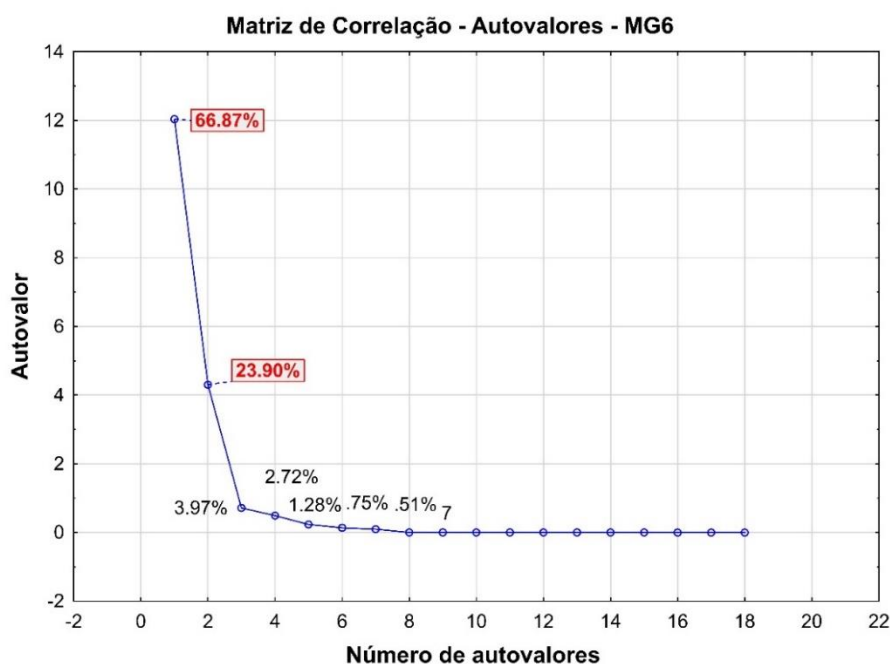
O MG5 também é originário do cruzamento *E.urophylla* X *E. grandis*, no entanto se diferenciou dos demais ao apresentar uma explicação menor para as variáveis relacionadas à irrigação e uma colaboração superior das características de sítio florestal (35%). Os indicadores de qualidade de nutrição e dose apresentaram menor contribuição comparado com os demais, indicando uma forte adaptabilidade do material ao programa nutricional proposto e uma menor sensibilidade ao déficit hídrico.

O MG2 apresentou algumas peculiaridades no seu resultado, se diferenciando dos demais materiais. Apesar de ele apresentar uma contribuição de 29,3% das variáveis que estão relacionadas à irrigação (Irrigação + fertirrigação), essas foram menores quando comparados aos materiais MG1, MG3, MG4 e MG5, o que nos indica uma menor dependência da suplementação de água. O material em análise é um híbrido *E. urophylla* e apresentou um comportamento flexível de acordo com as condições impostas ao longo do ciclo do cultivo. Esse padrão de comportamento reforça a existência de uma plasticidade fenotípica, que varia de acordo com o material genético e a condição submetida (CABRAL, ROCHA, *et al.*, 2010, STAPE, BINKLEY, *et al.*, 2004). O MG2 é amplamente adotado nos cultivos comerciais no Brasil, esta flexibilidade de opções permite obter rendimentos semelhantes aos obtidos em condições de baixo estresse hídrico (GONÇALVES, ALVARES, *et al.*, 2013).

O MG6 apresentou um comportamento discrepante em relação aos demais materiais estudados. Foi o único material em que as variáveis relacionadas à suplementação de água e fertilizantes via sistema de irrigação não explicaram a

variação. Praticamente 50% da sua variabilidade foi explicada pelas características relacionadas às condições de sítio e a outra metade explicada pelos indicadores relacionados ao manejo nutricional. A análise de componentes principais para o MG6 apresentou uma explicação da variação para os dois primeiros componentes acima de 90% (Figura 15).

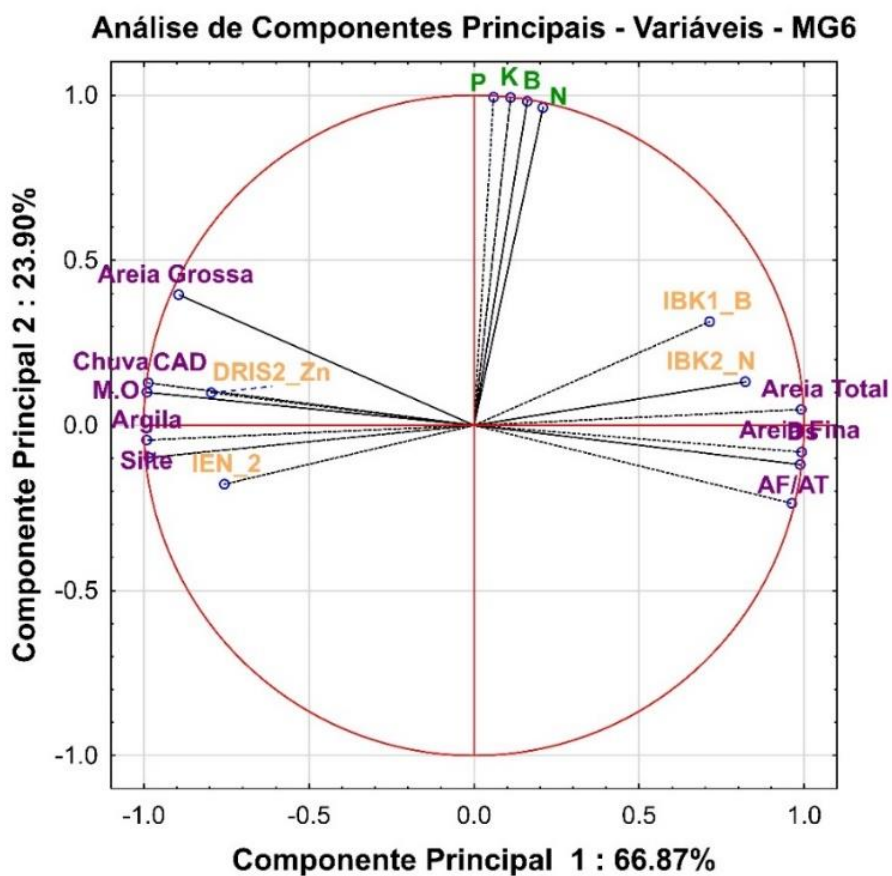
Figura 15 - Matriz de correlação dos autovalores e definição do número de componentes principais.



Fonte: Autor (2024)

O componente principal 1 apresentou uma explicação da variação de 66,87%, essa elevada explicação está diretamente relacionada aos valores de *loadings* das variáveis que caracterizam o sítio florestal e estão expostos na tabela 5. Os respectivos *loadings* apresentaram valores próximo de 1,0. A distinção dos sítios florestais a partir do componente principal 1 é visível no gráfico das variáveis (Figura 16). Complementar às variáveis de sítio, algumas variáveis relacionadas à indicadores de qualidade nutricional também apresentaram contribuição, com *loadings* variando de 0,7 – 0,8. O componente principal 2 foi majoritariamente composto por variáveis relacionados a dose e explicou apenas 23,90% da variação

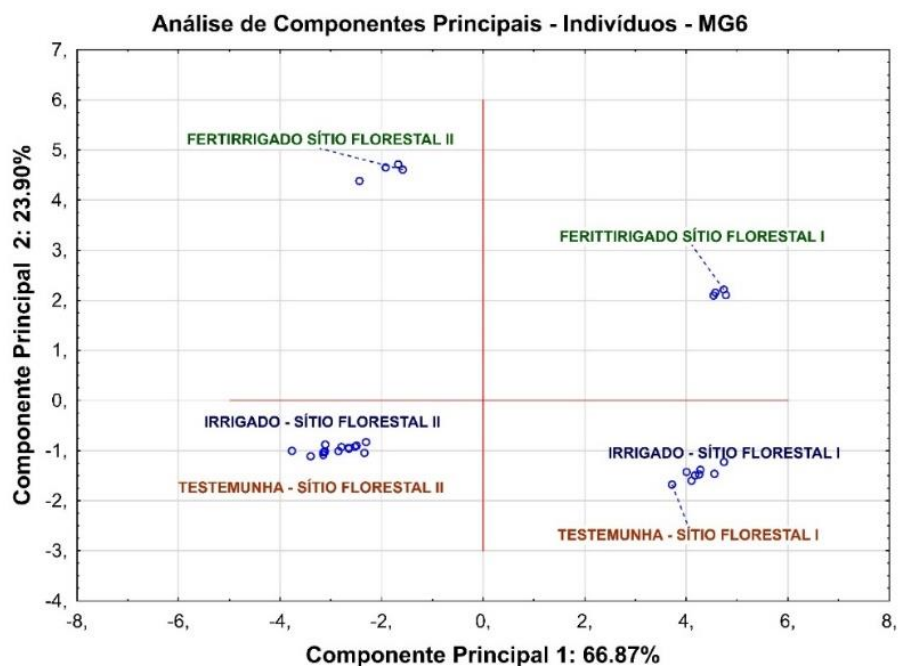
Figura 16 - Gráfico de variáveis- análise de PCA MG6.



Fonte: Autor (2024)

A distribuição dos indivíduos corroborou com os resultados da PCA onde foi identificado a não contribuição das variáveis relacionadas à irrigação em relação a explicação da variação. A partir da análise do gráfico de indivíduos (Figura 17), fica evidenciado que os indivíduos do tratamento II (Irrigado) tiveram uma variação semelhante ao tratamento testemunha, a PCA agrupou bem os indivíduos de acordo com o sítio florestal e alocou na parte superior os indivíduos do tratamento III que se apresentam diretamente proporcionais à maiores doses aplicadas.

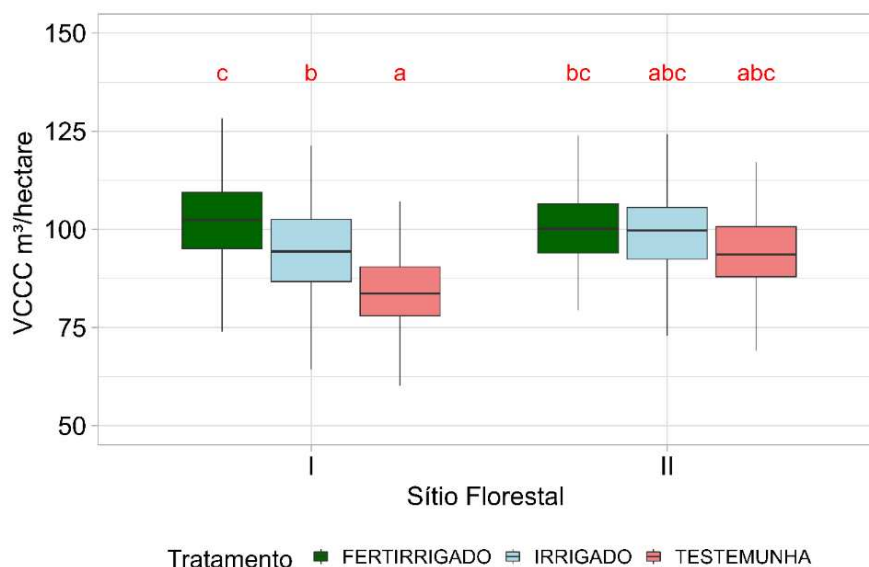
Figura 17 - Gráfico de indivíduos- análise de PCA MG6.



Fonte: Autor (2024)

Para concluir a análise dos componentes principais do MG6, foi elaborado um gráfico de boxplot (Figura 18) com uma análise de comparação múltipla de médias, considerando a variável de crescimento VCCC m³/hectare e os respectivos tratamentos e sítios florestais.

Figura 18 - Desempenho do MG6 submetidos a diferentes tratamentos e condições de sítio.



Fonte: Autor (2024)

O gráfico corrobora com a análise PCA, pois evidencia a importância da variável sítio florestal e a não significância das variáveis relacionadas à suplementação de água e nutrientes via sistema de irrigação. A análise de comparação múltiplas de médias destaca que o desempenho do tratamento testemunha no sítio II apresentou um desempenho estatisticamente igual aos tratamentos II e III em ambos os sítios.

A explicação para esse comportamento diferente dos demais, se deve ao fato do MG6 em sua conformação genética apresentar-se como *tri-cross* (*E. Camaldulensis* x *E. Grandis*) x *E. Urophylla*. A presença do *E. Camaldulensis* no cruzamento confere uma maior condutância estomática em condições de estresse hídrico, possibilitando uma maior resistência em condições de estresse abióticos (DREW, DOWNES, *et al.*, 2009).

Embora o MG2 (*E. urophylla*) também tenha apresentado um comportamento favorável à resistência a estresse hídrico, o MG6 se destacou nesse quesito. De maneira geral, *E. camaldulensis* possui maior resistência à seca e maior densidade de madeira que *E. urophylla*, bem como mais alelos importantes para hibridização (GONÇALVES, ALVARES, *et al.*, 2013). Ademais, o *E. urophylla* apresenta maior crescimento volumétrico em regiões já adaptadas em comparação com *E. camaldulensis*, além de apresentar uma maior capacidade de adaptabilidade e uma gama mais ampla de ambientes adaptáveis (DREW, DOWNES, *et al.*, 2009, GONÇALVES, ALVARES, *et al.*, 2013).

4. CONCLUSÃO

A aplicação da técnica multivariada análise de componentes principais se mostrou satisfatória na identificação das variáveis de contribuição e na compreensão do comportamento e nível de exigência dos materiais genéticos.

As variáveis relacionadas ao déficit hídrico (Irrigação e sítio florestal) apresentaram maior contribuição na explicação da variação. Considerando as variáveis unitárias, a variável sítio florestal apresentou uma maior explicação da variação dos dados e se mostrou um importante fator na determinação do potencial produtivo.

A identificação dos fatores limitantes e a compreensão da sua respectiva contribuição são fatores cruciais para o melhor planejamento silvicultural, seleção de sítios florestais, alocação de materiais genéticos e definição dos tratamentos culturais.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU-JUNIOR, C. H., FIRME, L. P., MALDONADO, C. A. B., *et al.* "Fertilization using sewage sludge in unfertile tropical soils increased wood production in Eucalyptus plantations", **Journal of Environmental Management**, v. 203, p. 51–58, 2017. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.07.074. .

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVES, M. E. B., MANTOVANI, E. C., NEVES, J. C. L., *et al.* "Simulação da produtividade do eucalipto sob diferentes condições de disponibilidade hídrica na região Centro-Leste de Minas Gerais", **Agrometeoros**, v. 26, n. 2, p. 327–336, 2020. DOI: 10.31062/agrom.v26i2.26416. .

BARROS, A. P. V. **Produção de madeira e eficiência de uso de nutrientes modelados conforme a classe de produtividade de povoamentos clonais de eucalipto**. 2021. 96 f. Universidade Federal de Viçosa - UFV, 2021. Disponível em: <https://locus.ufv.br/server/api/core/bitstreams/d282becc-b115-4aeb-8e6a-2934c1950b97/content>.

BERNARDO, S.; SOARES, A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. 625 p.

BINKLEY, D., CAMPOE, O. C., ALVARES, C., *et al.* "The interactions of climate, spacing and genetics on clonal Eucalyptus plantations across Brazil and Uruguay", **Forest Ecology and Management**, v. 405, n. July, p. 271–283, 2017. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.09.050. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>.

BINKLEY, D., CAMPOE, O. C., GSPALTL, M., *et al.* "Light absorption and use efficiency in forests: Why patterns differ for trees and stands", **Forest Ecology and Management**, v. 288, p. 5–13, 2013. DOI: 10.1016/j.foreco.2011.11.002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2011.11.002>.

BINKLEY, D., STAPE, J. L., BAUERLE, W. L., *et al.* "Explaining growth of individual trees: Light interception and efficiency of light use by Eucalyptus at four sites in Brazil", **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1704–1713, 2010. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.05.037. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.05.037>.

BOUCHER, D., ELIAS, P. **Planting for the Future How Demand for Wood Products Could Be**. . [S.l: s.n.], 2014. Disponível em: www.ucsus.org/futurewooduse.

CABRAL, O. M. R., ROCHA, H. R., GASH, J. H. C., *et al.* "The energy and water balance of a Eucalyptus plantation in southeast Brazil", **Journal of Hydrology**, v. 388, n. 3–4, p. 208–216, 2010. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.04.041. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.04.041>.

CHRISTINA, M., NOUVELLON, Y., LACLAU, J. P., *et al.* "Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest", **Functional Ecology**, v. 31, n. 2, p. 509–519, 2017. DOI: 10.1111/1365-2435.12727. .

CHRISTINA, M., NOUVELLON, Y., LACLAU, J. P., *et al.* "Sensitivity and uncertainty analysis of the carbon and water fluxes at the tree scale in Eucalyptus plantations using a metamodeling approach", **Canadian Journal of Forest Research**, v. 46, n. 3, p. 297–309, 2015. DOI: 10.1139/cjfr-2015-0173. .

CORDIDO, J. P. de B. R. **Eficiências nutricionais máximas e mínimas em povoamentos de eucalipto**. 2019. 86 f. Universidade Federal de Viçosa - UFV, 2019. Disponível em: <https://locus.ufv.br/server/api/core/bitstreams/0d63bde3-c192-4fcf-9810-2d65b89a3b70/content>.

DA SILVA, G. H., DA CUNHA, F. F., DE BRITO, L. F. A. "Advance Time to Determine Injection and Flushing Times in Drip Fertigation", **Horticulturae**, v. 8, n. 12, 2022. DOI: 10.3390/horticulturae8121103. .

DE FREITAS, C. H., ELLI, E. F., SENTELHAS, P. C. "On-farm assessment of eucalypt yield gaps — a case study for the producing areas of the state of Minas Gerais, Brazil", **International Journal of Biometeorology**, v. 65, n. 10, p. 1659–1673, 2021. DOI: 10.1007/s00484-021-02120-1. .

DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. P 179. (FAO Irrigation and Drainage, 24).

DREW, D. M., DOWNES, G. M., GRZESKOWIAK, V., *et al.* "Differences in daily stem size variation and growth in two hybrid eucalypt clones Differences in daily stem size variation and growth in two hybrid eucalypt clones", **Trees**, v. 23, n. August 2019, p. 10, 2009. DOI: 10.1007/s00468-008-0303-y. .

EKSTEEN, A. B., GRZESKOWIAK, V., JONES, N. B., *et al.* "Southern Forests : a Journal of Forest Science Stomatal characteristics of Eucalyptus grandis clonal hybrids in response to water stress Stomatal characteristics of Eucalyptus grandis clonal hybrids in response to water stress", **Southern Forests**, n. September 2013, p. 1–7, 2013. .

FAO. **Global Forest Resources Assessment 2020**. 1. ed. Rome, Italy, FAO -Food and Agriculture Organization of United Nations, 2020. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca9825en>.

FORRESTER, D. I., AMMER, C., ANNIGHÖFER, P. J., *et al.* "Effects of crown architecture and stand structure on light absorption in mixed and monospecific *Fagus sylvatica* and *Pinus sylvestris* forests along a productivity and climate gradient through Europe", **Journal of Ecology**, v. 106, n. 2, p. 746–760, 2018. DOI: 10.1111/1365-2745.12803. .

FRÜHAUF, A. C., DA SILVA, É. M., GRANATO-SOUZA, D., *et al.* "Description of Height Growth of Hybrid Eucalyptus Clones in Semi-Arid Region Using Non-Linear Models", **Brazilian Journal of Biometrics**, v. 40, n. 2, p. 138–151, 2022. DOI: 10.28951/bjb.v40i2.543. .

GALDINO, M. **VALORES DE REFERÊNCIA E FAIXAS DE SUFICIÊNCIA PARA AVALIAÇÃO DO ESTADO NUTRICIONAL DA CULTURA DO EUCALIPTO NO BRASIL**. 2015. 51 f. Universidade Federal de Viçosa - UFV, 2015. Disponível em: https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/10362/1/texto_completo.pdf.

GONÇALVES, J. L. de M., ALVARES, C. A., HIGA, A. R., *et al.* "Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations", **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6–27, 2013. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.12.030. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>.

HAKAMADA, R. E., HUBBARD, R. M., MOREIRA, G. G., *et al.* "Influence of stand density on growth and water use efficiency in Eucalyptus clones", **Forest Ecology and Management**, v. 466, n. January, 2020. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118125. . IBÁ. "Relatório Anual IBÁ - 2023", 2023. .

LANDSBERG, J., WARING, R. "Water relations in tree physiology: Where to from here?", **Tree Physiology**, v. 37, n. 1, p. 18–32, 2017. DOI: 10.1093/treephys/tpw102.

LE MAIRE, G., GUILLEMOT, J., CAMPOE, O. C., *et al.* "Light absorption, light use efficiency and productivity of 16 contrasted genotypes of several Eucalyptus species along a 6-year rotation in Brazil", **Forest Ecology and Management**, v. 449, n. April, p. 117443, 2019. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.06.040. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.06.040>.

MADUREIRA, G. de C. **EFICIÊNCIA NUTRICIONAL, CICLAGEM BIOQUÍMICA E MODELAGEM DE CRESCIMENTO DE ÁRVORES DE TECTONA GRANDIS**. 2021. 110 f. Universidade Federal de Viçosa - UFV, 2021. Disponível em: <https://locus.ufv.br/server/api/core/bitstreams/530d693e-f3e8-4899-95cf-c9b7c598b6aa/content>.

MCCULLOCH, C. E., NEUHAUS, J. M. "Misspecifying the shape of a random effects distribution: Why getting it wrong may not matter", **Statistical Science**, v. 26, n. 3, p. 388–402, 2011. DOI: 10.1214/11-STS361.

NARDINI, C., SCHWERZ, F., NETO, D. D., *et al.* "Biomass and radiation use efficiency in Eucalyptus plantations as affected by spacing of planting", **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 48, n. 128, p. 1–14, 2021. DOI: 10.18671/SCIFOR.V48N128.19.

PAN, L., LI, Y., HE, K., *et al.* "Generalized linear mixed models with Gaussian mixture random effects: Inference and application", **Journal of Multivariate Analysis**, v. 175, 2020. DOI: 10.1016/j.jmva.2019.104555.

PAYN, T., CARNUS, J. M., FREER-SMITH, P., *et al.* "Changes in planted forests and future global implications", **Forest Ecology and Management**, v. 352, p. 57–67, 2015. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.06.021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.021>.

PIRARD, R., DAL SECCO, L., WARMAN, R. "Do timber plantations contribute to forest conservation?", **Environmental Science and Policy**, v. 57, p. 122–130, 2016. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.12.010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2015.12.010>.

RENCHER, A. C. "Methods of multivariate analysis", **Wiley - Interscience**, v. 2, n. 03, p. 727, 2002. DOI: 10.5860/choice.33-1586.

SANQUETTA, C. R., PIVA, L. R. de O., SANQUETTA, M. N. I., *et al.* "Mercado De Celulose No Brasil E Em Cinco Grandes Países", **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 2, p. 189, 2020. DOI: 10.5380/biofix.v5i2.69749.

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. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.01.020. .

VILLALOBOS, F.J.; FERERES, E. Evaporation measurements beneath corn, cotton and sunflower canopies. **Agronomy Journal**, v. 82, n. 1, p. 1153- 1159, 1990.