

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE DOUTORADO**

**DESENVOLVIMENTO INICIAL E EVAPOTRANSPIRAÇÃO
DE CLONES DE EUCALIPTO SUBMETIDOS A FAIXAS DE
POTENCIAL MATRICIAL DA ÁGUA NO SOLO**

Danívio Batista Carvalho de Vasconcellos

**CRUZ DAS ALMAS, BAHIA
2023**

DESENVOLVIMENTO INICIAL E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE CLONES DE EUCALIPTO SUBMETIDOS A FAIXAS DE POTENCIAL MATRICIAL DA ÁGUA NO SOLO

Danívio Batista Carvalho de Vasconcellos

Engenheiro Agrônomo

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2008

Tese apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Luciano da Silva Souza

CRUZ DAS ALMAS, BAHIA

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

V331d

Vasconcellos, Danívio Batista Carvalho de.

Desenvolvimento inicial e evapotranspiração de clones de eucalipto submetidos a faixas de potencial matricial da água no solo / Danívio Batista Carvalho de Vasconcellos._ Cruz das Almas, BA, 2023.
145.; il.

Orientador: Prof. Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva
Coorientador: Prof. Dr. Luciano da Silva Souza

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Doutorado em Engenharia Agrícola.

1. Recursos Hídricos. 2. Agricultura Irrigada. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. II.Título.

CDD: 333.91

Ficha elaborada pela Biblioteca Universitária de Cruz das Almas - UFRB.
Responsável pela Elaboração - Neubler Nilo Ribeiro da Cunha (*Bibliotecário - CRB5/1578*)
(os dados para catalogação foram enviados pelo usuário via formulário eletrônico)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE DOUTORADO

DESENVOLVIMENTO INICIAL E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
CLONES DE EUCALIPTO SUBMETIDOS A FAIXAS DE POTENCIAL
MATRICIAL DA ÁGUA NO SOLO

Comissão Examinadora da Defesa da Tese de
Danívio Batista Carvalho de Vasconcellos

Aprovado em 10 de outubro de 2023

Documento assinado digitalmente
 ALISSON JADAVI PEREIRA DA SILVA
Data: 23/11/2023 16:15:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, IFBaiano
Orientador

Documento assinado digitalmente
 LUCIANO DA SILVA SOUZA
Data: 24/11/2023 05:19:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luciano da Silva Souza
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, UFRB
Coorientador

Documento assinado digitalmente
 EUGENIO FERREIRA COELHO
Data: 29/11/2023 23:30:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Eugênio Ferreira Coelho
EMBRAPA Mandioca e Fruticultura
Examinador Interno

Documento assinado digitalmente
 JOSE FERNANDES DE MELO FILHO
Data: 30/11/2023 18:05:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Fernandes de Melo Filho
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, UFRB
Examinador Externo

Documento assinado digitalmente
 ALEXSANDRO DOS SANTOS BRITO
Data: 30/11/2023 22:25:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alexsandro dos Santos Brito
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, IFBaiano
Examinador Externo

Documento assinado digitalmente
 TULIO BARROSO QUEIROZ
Data: 04/12/2023 21:56:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Túlio Barroso Queiroz
Bracell
Examinador Externo

*A minha família, fonte inesgotável da energia necessária para o despertar de cada dia em busca do que há de melhor em mim.
A minha avó Emília Fernandes, representante maior do amor, da fé, da esperança e da vida.*

Em especial a meus pais Maria Rita e Domingos Batista, pela formação dos meus valores e princípios.

Aos meus irmãos Ricelli e Domingos pelo apoio irrestrito.

A minha sogra Denize Contreiras e meu sogro Djalma Santos (em memória) pelo acolhimento em todos os momentos.

Eternamente a Melissa Batista e a Daniele de Vasconcellos, amores incondicionais.

Com carinho

Ofereço.

Em memória de meu avô Nestor Batista, agricultor entusiasta da irrigação, que partiu durante o desenvolvimento desse trabalho, com amor

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, criador de toda a vida. Como cristão, aprendi a importância dos valores e princípios que norteiam os caminhos da humanidade, a retidão, a generosidade, o amor, o perdão, a obediência, a resiliência, o respeito, entre outros. Na pesquisa científica, a busca da verdade é mais um importante aspecto a ser integrado no dia a dia do trabalho e estar na presença d'Ele só nos faz perceber o quanto ainda podemos avançar com o conhecimento de tudo o que se relaciona com obra magnífica que foi criada, nosso planeta Terra. Gratidão ao Senhor.

A minha filha Melissa Batista, por participar ativamente em vários momentos, me acompanhando na coleta de dados na estufa e nos laboratórios, tornando-os mais leves e divertidos. Espero que toda a energia dedicada a essa tese seja luz na sua trajetória de vida. A minha esposa Daniele de Vasconcellos, pelo amor dedicado em todos os anos juntos e durante essa fase tão importante da minha vida.

Foi incrível voltar à Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), instituição de minha formação profissional e acadêmica, depois de seis anos afastado em outros trabalhos, para iniciar as atividades como docente universitário. Rever professores que muito admiro desde a graduação e poder compartilhar minha experiência e conhecimentos com os alunos e com outros professores, tem sido extremamente satisfatório e gratificante, por isso agradeço imensamente a esta instituição de ensino superior por proporcionar esse ambiente para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da UFRB, por conceder o afastamento das minhas atividades docentes, tão necessário para o desenvolvimento do curso de doutorado e produção da tese com a dedicação necessária para atingir alto nível de qualidade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA) da UFRB e ao núcleo de Engenharia de Água e Solos (NEAS), na pessoa do coordenador Prof. Lucas Vellame, por oferecer um curso de doutorado de excelência no país e valorizar o estudo aprofundado e a pesquisa científica de temas relevantes para a sociedade, contribuindo com minha formação enquanto docente e pesquisador.

Ao professor Luciano Souza, em primeiro lugar pela confiança depositada quando aceitou me orientar no início do curso, em segundo pelos conhecimentos partilhados e, mais importante, pela amizade e respeito adquirido ao longo desse processo, no qual observo valores e princípios que irei me espelhar para ser uma pessoa e um professor melhor.

Ao Professor Alisson Silva, que assumiu a orientação desse trabalho no meio do curso, agradeço profundamente por contribuir significativamente para a minha formação acadêmico-científica, principalmente com seu olhar atual, objetivo e prático da pesquisa científica. Espero continuar essa parceria e tentarei refletir e continuar firme no propósito de construir o conhecimento científico com qualidade e impactos positivos diretos na sociedade, com especial atenção à física aplicada ao manejo da água no solo.

Ao Professor Manoel Teixeira, que se integrou ao experimento e contribuiu significativamente, tanto com sugestões e críticas ao trabalho, como disponibilizando o Laboratório de Ecofisiologia e instrumentos utilizados nas análises fisiológicas.

Aos docentes do PPGEA, todos foram fundamentais para a formação consolidada dos conhecimentos necessários ao desenvolvimento desse trabalho, mesmo os que não tive a oportunidade de ser aluno, entretanto, destaco os Professores Eugênio Coelho, Tales Soares, Aureo Oliveira, Vital Paz, Francisco Pereira e José Antônio Frizzone que, nitidamente, buscaram em todos os momentos a excelência no ensino da Pós-Graduação, mesmo no período em que precisamos nos distanciar fisicamente por conta da pandemia da Covid-19.

A lista de amigos e colegas que passaram pelo PPGEA é grande, posso não conseguir expressar minha gratidão a todos aqui, mas preciso destacar aqueles que me auxiliaram direta ou indiretamente, seja nas disciplinas, estudos e desenvolvimento dos trabalhos do experimento, seja nas ricas conversas nos corredores e na copa, tomando aquele café: Luiz Antonio Carvalho, Igor Santos, Lumi Toyosumi, Leandro Costa, Erivaldo Silva, Marcos Roberto, Juliana Benítez, Jéssica Couto, Lúcio Veimrober Júnior, Lucas Batista, Fábio Tayrone, Paulo Vítor Silva, José Carlos Lima e Vânio Souza.

Faço ainda um agradecimento aos amigos vinculados ao PPGEA como Pós-Doutores ou Professores Visitantes que me auxiliaram com dicas valiosas, na montagem do experimento e até mesmo na discussão dos resultados encontrados, Petterson Costa, Francisco Nascimento, Mairton Silva e Odílio Rocha Neto.

A pesquisa envolveu graduandos que contribuíram significativamente no desenvolvimento dos trabalhos, compondo uma equipe que superou as expectativas, poder compartilhar minha experiência e construir conhecimento junto com essa turma foi enriquecedor em todo o processo. Naan Salgado, Estela Sousa, Marcos Luan Souza e Marcos Pereira, minha gratidão é imensa, obrigado por me fazerem tão bem e por toda a dedicação e colaboração voluntária no nosso experimento.

À empresa Bracell, primeiramente na pessoa do Ricardo Previdente, à época responsável pelo Contrato que forneceu recursos financeiros para o desenvolvimento da pesquisa, e que colaborou diretamente com o objeto da pesquisa, visando a resolução de problemas relatados pela empresa na área de manejo da água nos solos florestais. A lago Neri, atual pesquisador responsável da área e que desde o início forneceu ricas informações, fez críticas e esteve sempre disposto a colaborar com o desenvolvimento do projeto e, finalmente a Túlio Queiroz, pesquisador da empresa, que tem contribuído bastante, principalmente com o olhar da ecofisiologia florestal, e por aceitar fazer parte da banca da defesa da tese.

Aos demais membros externos da banca, Professores José Fernandes Filho e Alexsandro Brito, por aceitarem o convite e, já antecipando, pelas críticas relevantes e olhar pragmático para a melhoria da tese.

À secretaria do PPGEA, na pessoa da Sueli Rodrigues, pela competência no atendimento das demandas, mas também por proporcionar momentos de confraternização alegres e fundamentais para o bom convívio social no NEAS.

Aos funcionários terceirizados que fazem o melhor a cada dia para tornar o ambiente do NEAS um espaço confortável. A Edilson Bastos, sempre disposto a resolver os problemas com presteza. Danilo Souza, agora meu colega no PPGEA, pessoa de grande coração, divertido, atencioso e inteligente. As funcionárias da limpeza, Lorana e D. Rita, prestativas com a sala que ocupei e os demais ambientes.

A todas as outras pessoas que fazem parte da minha vida, minha gratidão pela presença, amizade e carinho.

“Lembro do senhor Pitágoras, que me contava como é bela a matemática, é uma questão de lógica, os meus problemas se resolvem feito magia.”

(Chaps Melo & João Henrique Souza,
Matemagicamente)

DESENVOLVIMENTO INICIAL E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE CLONES DE EUCALIPTO SUBMETIDOS A FAIXAS DE POTENCIAL MATRICIAL DA ÁGUA NO SOLO

RESUMO: Em função das tendências observadas em relação à escassez hídrica e à distribuição irregular das chuvas e visando promover práticas de manejo da água sustentáveis em cultivos florestais, objetivou-se com esta pesquisa avaliar o desempenho produtivo inicial de clones comerciais de eucalipto irrigados por gotejamento submetidos a diferentes regimes hídricos, bem como estudar a evapotranspiração da cultura (ET_C) obtida por lisimetria de pesagem (LP) e balanço de água no solo (BAS) calculado por abordagens uni (1D) e multidimensionais (2D/3D). Foi desenvolvido um experimento em ambiente protegido com 36 parcelas arranjadas em esquema fatorial (4 x 3) seguindo um delineamento em blocos casualizados. Quatro clones, dois de *Eucalyptus urophylla* (UP1 e UP2) e dois híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* (GU3 e GU4) foram submetidos a 3 faixas de potencial matricial da água no solo (ψ): *baixa* (-86,7 a -33,9 kPa, déficit), *média* (-19,7 a -2,4 kPa, irrigação) e *alta* (-1,9 a 0 kPa, elevação do lençol freático a 0,1 m). O cultivo ocorreu em lisímetros de drenagem com 1,44 m² de área e 0,6 m de altura, sendo o manejo da irrigação realizado pelo monitoramento do ψ e do conteúdo de água no solo (θ) através da reflectometria no domínio do tempo (TDR). Análises de variância, testes de médias de Scott-Knot e análises de regressão linear permitiram avaliar o comportamento das árvores em função das faixas de ψ para as variáveis de crescimento e produção de biomassa, status hídrico da planta e produtividade da água. Para os cálculos da ET_C foram utilizados os métodos do LP e do BAS em planos 1D e 2D/3D. Os clones com maior desempenho nas condições experimentais foram de *E. urophylla*, com destaque para o UP1 e a faixa de ψ *alta* permitiu às árvores performance superior em praticamente todas as variáveis analisadas, especialmente no que diz respeito a eficiência produtiva relacionada à área foliar e ao uso da água. Os cálculos da ET_C demonstraram que o método do BAS, quando aplicado em eucalipto irrigado por gotejamento, apresenta maior precisão e acurácia se realizado partir de dados de θ obtidos em 3D.

Palavras-chave: *Eucalyptus* spp., conteúdo de água no solo, reflectometria no domínio do tempo, produtividade da água, status hídrico, lisimetria, balanço de água no solo, casa de vegetação.

EVAPOTRANSPIRATION AND RESPONSE OF YOUNG EUCALYPT CLONES TO SOIL WATER MATRIC POTENTIAL

ABSTRACT: In light of observed trends related to water scarcity and irregular rainfall distribution and aiming to promote sustainable water management practices in forest crops, this research aimed to evaluate the initial productivity of commercial eucalyptus clones under drip irrigation subjected to different water regimes. Additionally, the study explored crop evapotranspiration (ET_C) using weighing lysimetry (WL) and soil water balance (SWB) calculated through one-dimensional (1D) and multidimensional (2D/3D) approaches. The experiment was conducted in a controlled environment with 36 plots arranged in a factorial design (4 x 3) following a randomized block layout. Four clones, two from *Eucalyptus urophylla* (UP1 and UP2), and two hybrids of *E. grandis* x *E. urophylla* (GU3 and GU4), were subjected to three soil water matric potential (ψ) ranges: *low* (-86.7 to -33.9 kPa, deficit), *medium* (-19.7 to -2.4 kPa, irrigation), and *high* (-1.9 to 0 kPa, groundwater elevation at 0.1 m). Cultivation occurred in drainage lysimeters with an area of 1.44 m² and a height of 0.6 m, with irrigation management based on monitoring ψ and soil water content (θ) using time domain reflectometry (TDR). Variance analysis, Scott-Knot mean tests and linear regression analyses allowed the assessment of tree behavior concerning ψ ranges for growth variables, biomass production, plant water status, and water productivity. ET_C calculations utilized LP and BAS methods in 1D and 2D/3D plans. Clones from *E. urophylla* performed best under experimental conditions, notably UP1, and the *high* ψ range resulted in superior performance across nearly all analyzed variables, especially concerning productivity efficiency related to leaf area and water use. ET_C calculations demonstrated that the BAS method, when applied to drip-irrigated eucalyptus, provides greater precision and accuracy when using 3D θ data.

Keywords: *Eucalyptus* spp., soil water content, time domain reflectometry, water productivity, plant water status, lysimetry, soil water balance, agricultural greenhouse.

LISTA DE ABREVIATURAS

<i>AF</i>	Área foliar total (m ²)
<i>BAS</i>	Balanço de água no solo
<i>BFFo</i>	Biomassa fresca de folhas (g)
<i>BFFu</i>	Biomassa fresca do fuste (g)
<i>BFGa</i>	Biomassa fresca de galhos (g)
<i>BSFo</i>	Biomassa seca de folhas (g)
<i>BSFu</i>	Biomassa seca do fuste (g)
<i>BSGA</i>	Biomassa seca de galhos (g)
<i>CAD</i>	Capacidade total de água disponível do solo (m ³ m ⁻³)
<i>CC</i>	Capacidade de campo (m ³ m ⁻³)
<i>DAT</i>	Dias após o transplante
<i>ET_c</i>	Evapotranspiração da cultura (L planta ⁻¹ dia ⁻¹)
<i>ET_o</i>	Evapotranspiração de referência (L planta ⁻¹ dia ⁻¹)
<i>EUA</i>	Eficiência de uso da água
<i>f</i>	Fator de depleção da água no solo
<i>GU</i>	Clone do híbrido <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
<i>ITN</i>	Irrigação total necessária (L)
<i>k_a</i>	Constante dielétrica aparente
<i>K_c</i>	Coefficiente de cultura
<i>LP</i>	Lisimetria de pesagem
<i>PA</i>	Produtividade da água (g L ⁻¹)
<i>PMP</i>	Ponto de murcha permanente (m ³ m ⁻³)
<i>TDR</i>	Time domain reflectometry, reflectometria no domínio do tempo
<i>TI</i>	Tempo de irrigação (h)
<i>TRA</i>	Teor relativo de água na folha
<i>UP</i>	Clone da espécie <i>Eucalyptus urophylla</i>
<i>θ</i>	Conteúdo de água no solo (m ³ m ⁻³)
<i>ψ</i>	Potencial matricial da água no solo (kPa)
<i>ψ_f</i>	Potencial hídrico foliar (mPa)
<i>Δh</i>	Varição do armazenamento de água no solo (m ³ m ⁻³)
<i>1D</i>	Unidimensional
<i>2D</i>	Bidimensional
<i>3D</i>	Tridimensional

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Talhão com as árvores de eucalipto mortas em região com má distribuição das chuvas e precipitação média anual de 900 mm, Inhambupe, Bahia.....	3
Figura 2. Cobertura e uso da terra no Brasil para o ano de 2020. Fonte: IBGE (2022).	5
Figura 3. Esquema simplificado da cadeia produtiva florestal. Fonte: MAPA (2018).....	8
Figura 4. Fluxograma com os objetivos do manejo da irrigação e variáveis a serem determinadas.....	12
Figura 5. Fator “ <i>f</i> ” calculado para diferentes culturas.....	14
Figura 6. Estufa agrícola utilizada no experimento.	31
Figura 7. Mudas transplantadas.....	31
Figura 10. Árvores do clone UP2 de <i>Eucalyptus urophylla</i> no dia do corte em cada uma das faixas de potencial matricial da água no solo (ψ).....	33
Figura 8. Croqui experimental.	34
Figura 9. Lisímetro de lençol freático de carga constante e tubo de acesso inserido no solo para monitoramento do nível da água.	35
Figura 11. Esquema de distribuição das sondas TDR no perfil do solo com foto ilustrativa..	36
Figura 12. Piranômetro LP02 (Hukseflux) e termohigrômetro.....	37
Figura 13. Curvas de calibração dos dados do conteúdo de água no solo obtidos a partir da constante dielétrica aparente das sondas TDR, conectadas ao reflectômetro (y_r) e aos multiplexadores (y_m).....	39
Figura 14. Curva de retenção da água no solo e destaque demonstrando as faixas de variação do potencial matricial da água no solo dos tratamentos irrigados e as respectivas lâminas de reposição.....	42
Figura 15. Mini controlador de irrigação utilizado no experimento.	42
Figura 16. Esquema de funcionamento do lisímetro de lençol freático de carga constante, figura meramente ilustrativa não representada em escala.	44
Figura 17. Fluxograma metodológico para determinação das variáveis utilizadas no cálculo do teor relativo de água na folha.....	46
Figura 18. Medição do potencial hídrico foliar com a câmara de Scholander.	47
Figura 19. Radiação Solar Global (RS) em valores semanais mínimos (min), médios (med) e máximos (max) medidos diariamente na estufa agrícola.....	48
Figura 20. Umidade Relativa do Ar (UR, eixo primário) e Temperatura (T, eixo secundário) em valores semanais mínimos (min), médios (med) e máximos (max) medidos diariamente na estufa agrícola.	49
Figura 21. Potencial matricial da água no solo (ψ) medida ao longo de uma semana nas condições estabelecidas para o experimento.....	50
Figura 22. Curvas de crescimento da altura total (AT, eixo primário) e diâmetro do caule (DC, eixo secundário) das árvores submetidas às faixas de potencial matricial da água no solo (ψ).....	56
Figura 23. Biomassa seca dos compartimentos da parte aérea dos clones de eucalipto, em valores absolutos (eixo primário) e relativos (eixo secundário).	59
Figura 24. Correlação entre os compartimentos de biomassa seca das árvores do experimento.....	60
Figura 25. Biomassa seca da parte aérea compartmentalizada do eucalipto em função das faixas de potencial matricial da água no solo, em valores absolutos (eixo primário) e relativos (eixo secundário).	61

Figura 26. Regressão linear da biomassa seca da parte aérea do eucalipto em função do conteúdo de água no solo para o potencial matricial da água no solo <i>médio</i> das faixas monitoradas.....	62
Figura 27. Regressão linear da área foliar em função do potencial matricial da água no solo <i>médio</i> das faixas monitoradas.....	63
Figura 28. Regressão linear da produtividade da água para biomassa seca do fuste em função da lâmina de água armazenada no perfil para o potencial matricial da água no solo <i>médio</i> das faixas monitoradas.....	66
Figura 29. Esquema de distribuição das sondas TDR no lisímetro.....	85
Figura 30. Lisímetro de pesagem do experimento com os instrumentos de coleta de dados.	86
Figura 31. Piranômetro LP02 (Hukseflux) e termo-higrômetro.	86
Figura 32. Curva de calibração para os dados do conteúdo relativo de água no solo obtidos a partir da constante dielétrica aparente das sondas TDR, conectadas nos multiplexadores.	89
Figura 33. Curva de retenção da água no solo demonstrando a faixa de variação de potencial matricial da água no solo e sua respectiva lâmina de reposição para manejo da irrigação.	91
Figura 34. Variabilidade espaço-temporal da média do conteúdo de água no solo para 6 ciclos de irrigação monitorados com as sondas TDR em eucalipto.	99
Figura 35. Processos de infiltração (a) e extração (b) da água no perfil bidimensional do solo para a média de 6 ciclos de irrigação monitorados com as sondas TDR em eucalipto.....	100
Figura 36. Relação entre os dados de infiltração e de extração de água no solo para cada um dos sensores TDR instalados no lisímetro cultivado com eucalipto irrigado por gotejamento.....	101
Figura 37. Conteúdo de água no solo nas distâncias e profundidades monitoradas do perfil do lisímetro de pesagem, durante 6 ciclos de irrigação em eucalipto.	102
Figura 38. Amplitude de variação média do conteúdo de água no solo no perfil bidimensional para 6 ciclos de irrigação monitorados com as sondas TDR em eucalipto.	103
Figura 39. Evapotranspiração de Referência (ET_o) em valores semanais mínimos (min), médios (med) e máximos (max) medidos diariamente na estufa agrícola.....	104
Figura 40. Evapotranspiração da cultura do eucalipto (ET_{cLP}) em valores semanais mínimos (min), médios (med) e máximos (max) medidos com base no lisímetro de pesagem.	105
Figura 41. Modelos de regressão linear da evapotranspiração do eucalipto estimada por balanço de água no solo de configurações não significativas no teste F (Mayer et al., 1994), $L \text{ planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$	107
Figura 42. Modelos de regressão linear da evapotranspiração do eucalipto estimada por balanço de água no solo das configurações que obtiveram alta precisão e exatidão, $L \text{ planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$	107
Figura 43. Dispersão dos dados semanais de evapotranspiração do eucalipto estimados por BAS, para a configuração 1D (a) e 3D (b), $L \text{ planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultado das análises químicas do solo do experimento.	32
Tabela 2. Potencial matricial da água no solo (ψ) medida a 0,1 m nas parcelas monitoradas do tratamento de lençol freático de carga constante (faixa de -1,9 a 0 kPa).....	36
Tabela 3. Parâmetros hidráulicos do solo utilizado no experimento.	40
Tabela 4. Planilha utilizada no manejo da irrigação do experimento.....	43
Tabela 5. Resumo estatístico dos dados do monitoramento do potencial matricial da água no solo (ψ), do conteúdo de água no solo (θ) e do armazenamento no perfil, caracterizando os tratamentos.....	51
Tabela 6. Altura da planta (cm) dos clones de eucalipto submetidos às faixas de potencial matricial da água no solo (ψ) para todas as medições do experimento.....	52
Tabela 7. Diâmetro do caule (mm) dos clones de eucalipto submetidos às faixas de potencial matricial da água no solo (ψ) para todas as medições do experimento.....	54
Tabela 8. Biomassa fresca e seca (g) da parte aérea compartimentalizada dos clones de eucalipto submetidos às faixas de potencial matricial da água no solo (ψ).....	57
Tabela 9. Área foliar total, relação biomassa seca do fuste e área foliar total, teor relativo de água na folha e potencial hídrico foliar dos clones submetidos às faixas de potencial matricial da água no solo (ψ).....	63
Tabela 10. Produtividade da água para a biomassa seca do fuste dos clones submetidos às faixas de potencial matricial da água no solo (ψ).....	65
Tabela 11. Resultado das análises químicas do solo do experimento.	84
Tabela 12. Coeficientes linear, angular e de ajuste das equações de calibração do lisímetro.	88
Tabela 13. Parâmetros hidráulicos do solo utilizado no experimento.....	90
Tabela 14. Planilha utilizada no manejo da irrigação do experimento.....	92
Tabela 15. Configurações de cálculo da variação do balanço de água no solo para as abordagens uni (1D) e multidimensionais (2D/3D).	96
Tabela 16. Índices estatísticos utilizados para comparar os modelos de regressão linear....	97
Tabela 17. Estatísticas descritivas da evapotranspiração de referência (ET_o) e do eucalipto (ET_c), L planta ⁻¹ dia ⁻¹ , índices estatísticos e análise comparativa dos modelos de regressão da estimativa da ET_c pelo balanço de água no solo (BAS) utilizando sondas TDR nas configurações 1D, 2D e 3D.....	106
Tabela 18. Valores médios mensais da evapotranspiração de referência (ET_o), da evapotranspiração do eucalipto pelos métodos da lisimetria de pesagem (ET_{cLP}) e do balanço de água no solo (ET_c) e do coeficiente de cultura (K_c).....	110

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

INTRODUÇÃO GERAL	1
Objetivo.....	3
Objetivos específicos	4
Revisão de Literatura.....	4
Contextualização.....	4
A cultura do eucalipto e o desenvolvimento de clones	7
Balanço de água no solo.....	9
Manejo da irrigação via solo.....	11
Referências.....	15
CAPÍTULO I	23
Desempenho inicial de clones de eucalipto sob faixas de potencial matricial da água no solo.....	25
Resumo.....	25
Response of young eucalypt clones to soil water matric potential.....	27
Abstract.....	27
Introdução	29
Material e Métodos.....	30
Configuração experimental	30
Determinação dos parâmetros hidráulicos do solo.....	37
Calibração dos sensores	38
Manejo da irrigação	39
Variáveis analisadas e estatística	44
Resultados e Discussão.....	48
Condições climáticas e caracterização das faixas de potencial matricial da água no solo.....	48
Altura da planta e diâmetro do caule.....	51
Biomassa compartimentalizada da parte aérea	57
Área foliar e variáveis indicativas do status hídrico da planta.....	62
Produtividade da água.....	65
Conclusões	67
Referências.....	67

CAPÍTULO II	75
Abordagem multidimensional do balanço de água no solo em eucalipto irrigado por gotejamento.....	77
Resumo.....	77
Multidimensional approach to soil water balance in drip-irrigated eucalyptus	79
Abstract.....	79
Introdução	81
Material e Métodos.....	83
Configuração experimental	83
Determinação dos parâmetros hidráulicos do solo.....	86
Calibração do lisímetro de pesagem e dos sensores TDR.....	88
Manejo da irrigação	89
Variabilidade espaço-temporal da água no solo.....	92
Evapotranspiração e balanço de água no solo	93
Análise estatística.....	96
Coeficiente de cultura e eficiência do uso da água	97
Resultados e Discussão	98
Análise espaço-temporal do conteúdo de água no solo	98
Evapotranspiração do eucalipto determinada por lisimetria e balanço de água no solo	103
Conclusões	111
Referências.....	111
CONSIDERAÇÕES FINAIS	119

INTRODUÇÃO GERAL

As áreas de cultivo das espécies de eucalipto vêm crescendo a cada ano, em 2021 o crescimento foi de 1,9 % comparado com 2020 no Brasil. É consequência do aumento da demanda industrial pelos produtos derivados da cultura, por exemplo, em 10 anos, as exportações de celulose cresceram mais de 80 % e a produção brasileira em mais de 60% (IBÁ, 2022).

Os esforços contínuos para melhorar a produtividade e a eficiência econômica de todos os envolvidos na cadeia produtiva torna o setor um dos mais importantes do agronegócio. Apresentam impactos socioambientais positivos, como a geração de emprego e renda à população e elevada contribuição para a balança comercial, ocupando o quarto lugar do agronegócio brasileiro, além disso, presta serviços ambientais como a regulação climática e de fluxos hídricos, redução das emissões de gases de efeito estufa, como o metano, e maior estoque de carbono, em comparação a sistemas agrícolas tradicionais, o que contribui na conservação e preservação dos recursos naturais (Oliveira & Oliveira., 2016).

Investimentos em pesquisa científica e em programas de reflorestamento e florestamento são cada vez mais frequentes, em 2021 foram R\$ 301,2 milhões investidos, sendo 17 % superior ao ano anterior (IBÁ, 2022). Objetivam, principalmente, a sustentabilidade dos cultivos e a resolução de problemas ambientais. Para o estabelecimento de bons povoamentos florestais, é necessária uma associação que envolva, principalmente, o melhoramento genético, no desenvolvimento de clones que apresentem maior qualidade da madeira para as diferentes finalidades, bem como, sejam capazes de resistir às condições adversas encontradas nas áreas de reflorestamento, antigas e novas (expansão), e o manejo sustentável do solo e da água.

Com o avanço das áreas para regiões de menor índice pluviométrico e, com os riscos relacionados às mudanças climáticas e ao déficit hídrico, relatado como o fator ambiental de maior importância na restrição da produtividade do eucalipto, observa-se a necessidade de investigar alternativas para o manejo da água nos sistemas silviculturais. Uma das alternativas é o uso da irrigação, de forma a permitir o estabelecimento da cultura nessas áreas e, até mesmo, proporcionar maior produtividade, sendo fundamental a definição de critérios para o manejo sustentável

da irrigação no cultivo do eucalipto e/ou estudos mais aprofundados da água nos ecossistemas florestais.

No Litoral Norte do estado da Bahia, a silvicultura teve início na década de 70 e, desde o plantio até a colheita, utiliza tecnologias focadas na qualidade do produto, baseadas na finalidade a que se destina a madeira. As pesquisas são desenvolvidas em diversas áreas, como por exemplo, na genética, com o desenvolvimento de genótipos que buscam melhorar a qualidade da madeira, bem como, adaptá-los às condições edafoclimáticas, na mecanização, com o desenvolvimento de máquinas e tratores com melhores condições de trabalho e eficiência nas mais diversas etapas de produção. Além desses, estudos com enfoque no manejo racional da água têm sido desenvolvidos (Binkley et al., 2020; Nóia Júnior et al., 2019; González Perea et al., 2018; Gonçalves et al., 2017b).

Entretanto, nos últimos anos, empresas do setor, preocupadas com a sustentabilidade dos sistemas florestais, têm relatado quedas na produtividade e até mesmo a mortalidade dos plantios em diversas áreas de regiões do Estado da Bahia, atrelando o fato, como já colocado, aos estresses abióticos, a exemplo do déficit hídrico e da deficiência de oxigênio às plantas causada pelo encharcamento do solo (Sachdev et al., 2021). Outro fator corresponde à seleção de genótipos de maior interesse na qualidade da madeira para suas diferentes finalidades. Justifica-se, dessa forma, a intensificação de estudos para resolver o problema em questão e promover maiores produtividades.

As áreas de plantio consolidado de eucalipto, com precipitação em torno de 900 mm anuais, associada a secas prolongadas e má distribuição ao longo do ano, têm sido praticamente abandonadas, visto que o investimento se perde por volta de 1 a 2 anos após o plantio, com talhões devastados, apresentando todas as árvores mortas (Figura 1).



Figura 1. Talhão com as árvores de eucalipto mortas em região com má distribuição das chuvas e precipitação média anual de 900 mm, Inhambupe, Bahia.

Em áreas da empresa Bracell, líder na produção de celulose solúvel especial, poucos clones comerciais atendem os critérios de qualidade para essa finalidade. Estima-se um total de mais de 10.000 ha com talhões em condições semelhantes ao relatado no parágrafo anterior, havendo a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias que permitam a mitigação dos efeitos do déficit hídrico nessas áreas e sua utilização sustentável, a exemplo dos sistemas irrigados.

Observa-se, portanto, a necessidade de avançar nos estudos relacionados ao conhecimento dos parâmetros hidráulicos dos solos florestais e das variáveis do balanço hídrico em eucalipto, para construir estratégias de manejo da irrigação que possam garantir a máxima eficiência de uso da água, bem como, avaliar os clones comerciais submetidos a condições de estresse hídrico, com a finalidade de permitir o avanço da cultura para fronteiras de condições climáticas menos favoráveis.

Objetivo

Avaliar o desenvolvimento inicial de clones de eucalipto em diferentes condições de disponibilidade hídrica em ambiente controlado e calcular a evapotranspiração por meio da lisimetria de pesagem e do balanço de água no solo, estudando a variabilidade espaço-temporal do conteúdo de água no solo.

Objetivos específicos

- I. Identificar um ou mais clones de eucalipto que tenham maior adaptabilidade às condições de baixo, médio e alto potencial matricial de água no solo;
- II. Analisar as respostas de crescimento, de produção e de status hídrico de clones de eucalipto em função das condições impostas por diferentes faixas de potencial matricial da água no solo;
- III. Avaliar a produtividade da água na produção de biomassa de clones de eucalipto e o efeito da mudança de faixas de potencial matricial da água no solo;
- IV. Realizar o balanço da água no solo cultivado com eucalipto irrigado por gotejamento, por meio de dados coletados por lisimetria de pesagem e por sondas de monitoramento do conteúdo da água no solo com abordagens uni, bi e tridimensionais, no estágio inicial de desenvolvimento da cultura, em ambiente controlado, para estimativa da evapotranspiração;
- V. Estudar a variabilidade espaço-temporal do conteúdo de água no solo em cultivo de eucalipto irrigado por gotejamento;
- VI. Avaliar o potencial produtivo de clones comerciais de eucalipto na condição de maior disponibilidade de água.

Revisão de Literatura

Contextualização

Os produtos da cadeia produtiva florestal representaram 1,2 % da economia brasileira, o maior na última década, e 7,3 % do industrial no ano de 2021, fazendo deste setor uma referência mundial e de grande força econômica brasileira (IBÁ, 2022). Os registros históricos demonstram que a década de 1970 foi marcada pela criação da política governamental de incentivos fiscais para o reflorestamento, que começaram ainda na década de 1960. Com esses incentivos foi possível ampliar consideravelmente o estoque de madeira nesses plantios (Gonçalves et al., 2016).

Desde então, se investiu em pesquisa e capacitação profissional sobre a silvicultura, consolidando seu uso em plantios comerciais, bem como o avanço no

manejo sustentável dos plantios florestais. O Brasil detém as melhores tecnologias na silvicultura do eucalipto, atingindo cerca de $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de produtividade, em rotações de sete anos. A média nacional encontra-se na liderança do ranking global, com $38,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no ano de 2021 (IBÁ, 2022).

A área de árvores plantadas para fins industriais no Brasil totalizou 9,93 milhões de hectares em 2021, com aumento de 0,2 % em relação a 2020. Esse total corresponde a apenas 1 % do território brasileiro (Figura 2), sendo o restante ocupado por áreas naturais, pastagens, mosaicos de ocupação em área florestal e campestre, áreas agrícolas, corpos d'água e áreas artificiais (IBÁ, 2022; IBGE, 2022)..

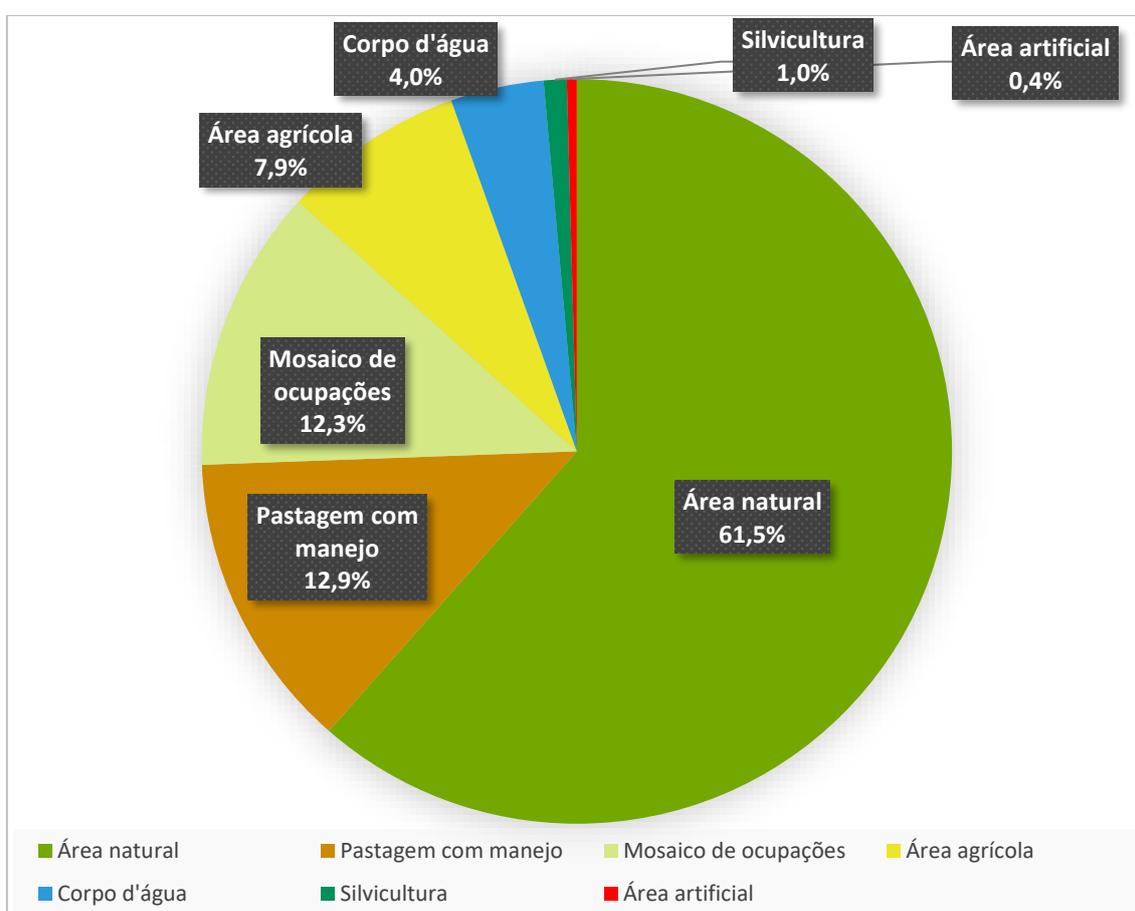


Figura 2. Cobertura e uso da terra no Brasil para o ano de 2020. Fonte: IBGE (2022).

Nesse mesmo ano, os plantios de eucalipto ocupavam 7,53 milhões de hectares do total de árvores plantadas no País, o que representa 75,8 % do total, e estão localizados principalmente nos estados de Minas Gerais (29,7 %), Mato Grosso do Sul (13,8 %) e São Paulo (13 %). A Bahia se destaca entre os estados do Nordeste com 8,6 % (IBÁ, 2022).

Esta espécie florestal é, portanto, a que tem maior destaque na economia nacional e internacional, fato que contribui para o investimento em pesquisa e desenvolvimento (Gonçalves et al., 2017a). Segundo o Plano Nacional de Desenvolvimento de Florestas Plantadas (MAPA, 2018), o setor apresentou um saldo positivo na balança comercial de US\$ 10 bilhões de dólares, respondendo por 5 % das exportações totais e 10 % das exportações do agronegócio, sendo posicionado em quarto lugar, atrás apenas dos complexos soja, carnes e sucroalcooleiro.

Destaca-se ainda por ter rápido crescimento, potencial para grande número de aplicações (celulose e papel; comercialização da madeira in natura; siderurgia a carvão vegetal; cosméticos; entre outras) e adaptabilidade a regiões de variadas características edafoclimáticas.

Entretanto, de modo geral, as áreas de produção de eucalipto encontram-se em um ambiente bastante sensível à antropização. De acordo com Gonçalves et al (2016), isso se deve às seguintes razões ecológicas e históricas:

- i) As condições climáticas são muito ativas (altos índices pluviométricos e térmicos);
- ii) significativa parte das plantações é realizada em relevo acidentado;
- iii) os solos são de baixa fertilidade natural e pobres em minerais primários, portanto sem ou com baixas reservas de nutrientes;
- iv) grande parte das plantações foi estabelecida em áreas agrícolas com solos degradados, onde houve previamente significativa perda da capacidade de suporte do solo.

Alguns autores afirmam que as restrições da produtividade estão relacionadas aos fatores ambientais na seguinte ordem decrescente de importância: déficit hídrico, deficiência de nutrientes, profundidade e resistência do solo à penetração (Gonçalves et al., 2008). Observa-se que a maior importância é dada ao déficit hídrico, fato que justifica os estudos relacionados ao balanço hídrico e manejo da água em solos florestais.

Por esses motivos, é de extrema importância buscar a utilização racional dos recursos edafoclimáticos, visando a sustentabilidade e a melhoria do potencial produtivo dos solos no longo prazo, a partir do conhecimento aprofundado das relações entre o manejo silvicultural e as condições e atributos dos solos e da água nos sistemas florestais.

A cultura do eucalipto e o desenvolvimento de clones

Pertencente à família Myrtaceae, o gênero *Eucalyptus* compreende mais de 800 espécies cultivadas em diferentes regiões do mundo. Nativas da região da Austrália, as plantas desse gênero apresentam características morfológicas do tipo arbusto baixo a árvore alta, medindo em torno de 10 m a 60 m de comprimento. As folhas das plantas juvenis se diferem das plantas adultas em virtude do dimorfismo foliar (Mendes et al., 2019). As flores atraem abelhas que produzem um mel de qualidade renomada mundialmente (Laws, 2013).

No Brasil, o eucalipto foi introduzido no início do século XIX, como planta ornamental ou quebra-ventos (Pereira et al., 2000), e, posteriormente, passou a ser utilizada para o fornecimento de madeira na construção de casas, trilhos de trens, carroças e pontes. Em meados do século XX, mais da metade das árvores plantadas em hectares reflorestados era de eucalipto (Revolti, 2015; Laws, 2013). Atualmente, são utilizadas pelas indústrias farmacêuticas, de perfumaria, por meio da extração de óleos e enchimento de comprimidos.

Extratos vegetais e óleos voláteis são utilizados como agentes antibacterianos (Sabo & Knezevic, 2019). Entretanto, um dos principais interesses do plantio comercial dessa cultura visa a exploração da biomassa lenhosa para a obtenção de painéis de madeira reconstituída, que são utilizados na confecção de móveis, e das fibras, da celulose e do papel (Saulle et al., 2018; Vilasboa et al., 2018). Por ser constituído de hemicelulose, o eucalipto possui uma estrutura flexível que pode ser utilizada para a produção de papel absorvente e tecido (Dogramaci et al., 2019). É também cultivado com o objetivo de promover biomassa para a geração de calor e energia em substituição à utilização de combustíveis fósseis, por apresentar madeira com alta densidade, baixa umidade e ser facilmente colhido durante todo o ano (Leslie et al., 2012).

Analisando a cadeia produtiva de florestas plantadas (Figura 3) podem ser observados os diversos fatores que determinam a demanda por produtos, sendo os painéis, celulose, papel, madeira serrada, carvão vegetal e energia, os que se destacam. Observa-se a diversidade de áreas que são beneficiadas com o setor, desde o processo pré-industrial com os insumos até o destino dos produtos aos mercados interno e externo.

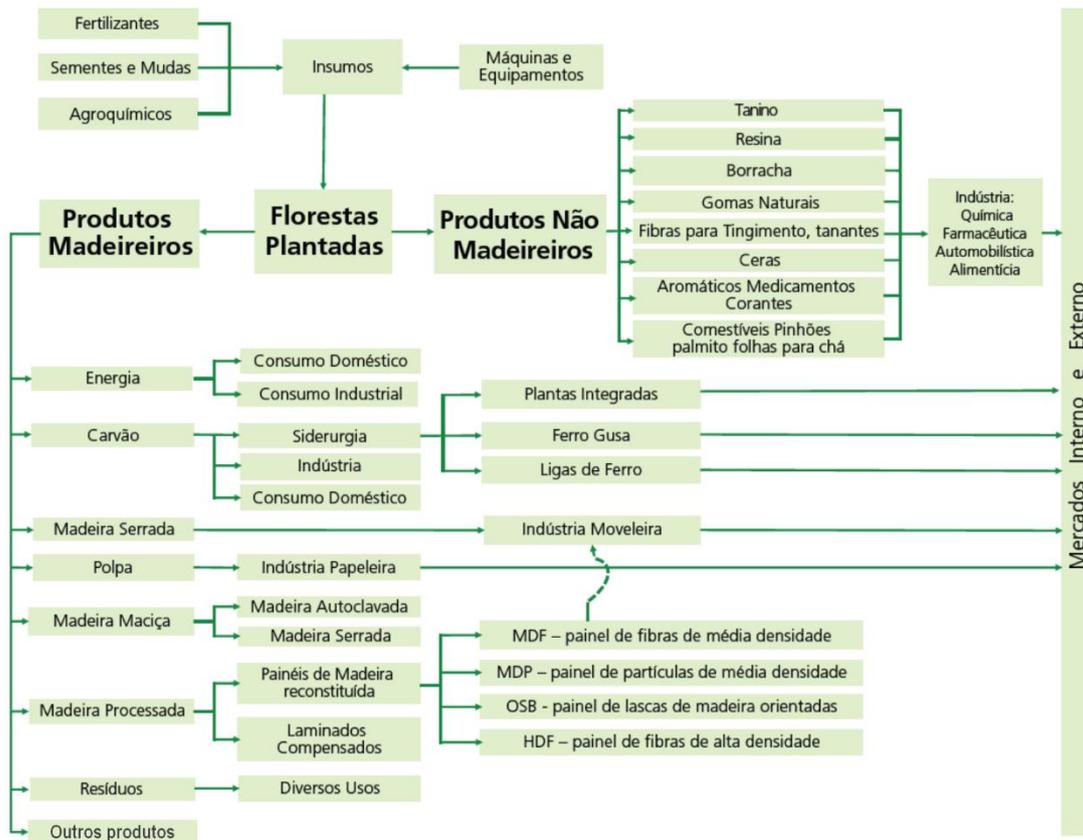


Figura 3. Esquema simplificado da cadeia produtiva florestal. Fonte: MAPA (2018).

Seu potencial em termos de estoque de carbono também chama atenção. No Brasil até 80 toneladas de $\text{CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ podem ser estocados por alguns híbridos jovens, considerando todo o ciclo (Vilasboa et al., 2019). Entretanto, ocorrem grandes diferenças no teor de carbono estocado, que pode variar de acordo com a localidade, nível de poluição ambiental ou mesmo a espécie ou clone estudado, isso refletirá na produção da biomassa lenhosa e, conseqüentemente, na sua utilização sustentável, preservando assim as árvores nativas que seriam utilizadas para os mesmos fins (Smith et al., 2017).

Além de todas as vantagens citadas, as espécies de eucalipto se adaptam a diferentes climas, são de fácil manejo, crescem rapidamente e apresentam rendimento econômico elevado (Costa & Streck, 2018), sendo, por isso, bastante cultivadas. Todavia, alguns tratamentos silviculturais interferem nas propriedades tecnológicas da madeira, a exemplo da irrigação. O desenvolvimento das plantas é afetado pela disponibilidade de água e nitrogênio, especialmente durante o crescimento inicial, período que vai do plantio até o primeiro ano, fase de produção em que há a maior exigência em consumo desse recurso (Bernardino et al., 2019). Há

estudos que indicam que a irrigação pode reduzir a densidade básica, elevar o comprimento das fibras e até mesmo alterar a composição química da madeira (Benites et al., 2018). Entretanto, esses estudos chegaram apenas na suposição, ainda não comprovada.

Com relação ao manejo da água, algumas práticas são adotadas para promover impactos positivos em serviços ambientais, com a redução do conflito pelo uso da água e maior controle do consumo, a exemplo do estabelecimento de um mosaico de materiais genéticos, idades e colheita de madeira do povoamento na bacia hidrográfica, especialmente em regiões com recursos hídricos limitados (Gonçalves, 2017).

Conhecer as condições ideais de cultivo vai, portanto, muito além de simplesmente estimar a lâmina de irrigação. Para o sucesso do cultivo é preciso priorizar a utilização de mudas de qualidade, respeitar as características dos clones, observar as condições climáticas da região e determinar os melhores métodos de manejo do solo e da água. Dessa maneira, haverá a otimização da produção com o mínimo de impacto ao meio ambiente.

Balanço de água no solo

O manejo adequado de um sistema de produção florestal exige conhecimento aprofundado sobre uma série de fatores e da relação entre eles. Nesse contexto, para a adoção de um manejo racional da água, do solo e da cultura, é condição indispensável o conhecimento a respeito do componente água no solo, como fator principal de produção silvicultural.

Em sistemas irrigados, esse manejo da água no solo deve ter atenção especial, sendo fundamental estimar com precisão as necessidades hídricas da cultura em questão, evitando o déficit ou o excesso (perda) da água no sistema, bem como determinar o instante mais adequado para proceder com a irrigação, visando aumentar a eficiência da sua aplicação (Villa et al., 2022).

O ponto de partida para o planejamento e gerenciamento de um sistema de irrigação é a determinação dos componentes do balanço de água e, no âmbito da física do solo, a variação de armazenamento, a drenagem interna e a ascensão capilar são os mais importantes. Em um dado volume de solo, pode-se escrever a equação da variação de armazenamento de água, considerando um volume de solo (95 % do

sistema radicular) e um intervalo de tempo selecionado (Libardi, 2012, Libardi, 2010), da seguinte forma:

$$\Delta h = P + I \pm D - ET \pm R \quad (1)$$

sendo Δh a variação do armazenamento de água no solo no período, P e I a quantidade de água que entra no período pela precipitação pluvial e irrigação, respectivamente, D a quantidade de água que sai por drenagem interna (percolação profunda) ou que entra por ascensão capilar, ET a quantidade de água que sai por evapotranspiração e R a quantidade de água que entra ou sai do volume de controle do solo, pelo escoamento superficial ou subsuperficial, chamado de deflúvio.

Sabe-se que quanto mais rápido o crescimento de uma árvore, maior é o seu consumo de água (Sun et al., 2018). Estima-se que a faixa de ET de uma plantação de eucalipto seja equivalente a precipitações pluviométricas ao redor de 800 a 1.200 mm ano⁻¹. Resultados experimentais semelhantes a esses foram encontrados em plantações de *E. grandis* em região de cerrado, com ET ao redor de 920 mm ano⁻¹, estimados pelo método de avaliação do balanço hídrico no solo (Lima et al., 1990). Na China, em região com precipitação média em torno de 1300 mm, outro estudo apontou que a ET do híbrido *E. urophylla* x *E. grandis* variou de 779 a 931 mm anuais (Ren et al., 2019).

Neste aspecto, conforme já colocado anteriormente, o balanço de água no solo (BAS) realizado em um sistema agrícola é um estudo muito importante, pois engloba as fases solo, planta e condições atmosféricas, além das intervenções antrópicas relacionadas ao manejo do solo e da cultura. As especificidades de cada fase são preponderantes para o comportamento hídrico desse sistema, como, por exemplo, a qualidade física do solo relacionada principalmente à textura e estrutura, a qualidade química e biológica do solo e suas interações com o desenvolvimento vegetal, a morfologia vegetal e as condições atmosféricas relacionadas, principalmente, à distribuição temporal das precipitações pluviais e a radiação solar. Para um estudo detalhado desse sistema complexo é necessário que o balanço de água no solo integre todos os processos que ocorrem de forma significativa.

Diversos estudos recentes têm sido conduzidos com o objetivo de analisar o desenvolvimento de florestas de eucalipto sob condições de déficit hídrico (Silva et al., 2019b; Gonçalves et al., 2017b; Saadaoui, 2017), indicando melhorias no manejo da

silvicultura em todos os seus fatores aqui apresentados, com atenção especial ao manejo e conservação do solo e da água.

Apesar de todo o avanço científico da silvicultura brasileira, existe uma diversidade de fatores ambientais e bióticos que tem influência sobre o manejo florestal, impossibilitando a definição de um método generalizado. É por isso que a tarefa de planejar as práticas silviculturais continuará a ser bastante complexa e a demandar alto investimento em pesquisa e desenvolvimento e conhecimento técnico vasto por parte dos envolvidos (Gonçalves et al., 2008).

As recomendações de manejo devem utilizar como critério as peculiaridades de cada região e local, diferenciando-se conforme se entende melhor as relações genótipo e ambiente, por meio de estudos empíricos, dentre estes os que visam estimar a evapotranspiração do eucalipto para o manejo de sistemas de irrigação.

Manejo da irrigação via solo

O manejo de cultivos irrigados deve considerar diversos aspectos técnicos ou parâmetros que dependem das características do projeto de irrigação, tais como grau de automação, medição de vazão, custo e disponibilidade de água, energia e mão de obra, características da cultura irrigada, do clima, do solo e do tipo de sistema (Bernardo, 1995).

O termo manejo da irrigação é geralmente usado para descrever o procedimento mediante o qual se determina a frequência de irrigação, a lâmina (ou volume) de água a aplicar em cada evento de irrigação e a intensidade de aplicação de água, com a finalidade de proporcionar economia de água e energia, elevar a produtividade da cultura, a qualidade do produto e reduzir a lixiviação de nutrientes para as camadas inferiores à zona radicular de extração de água da cultura (Frizzone et al., 2012; Pavani et al., 2009). Em resumo, o seu objetivo é maximizar a eficiência de uso da água pelas culturas (Figura 4).

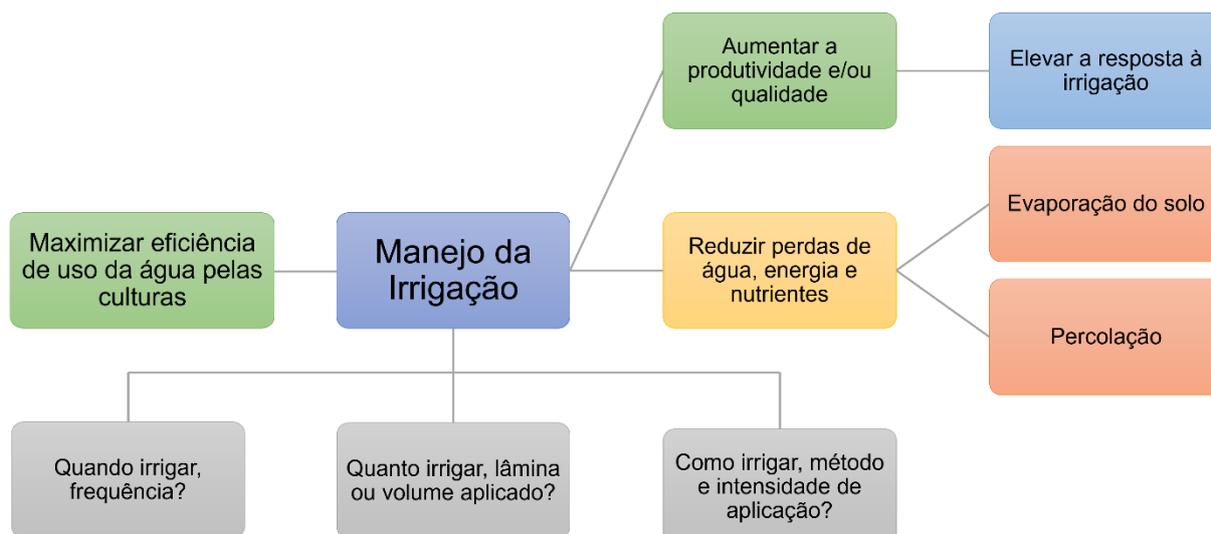


Figura 4. Fluxograma com os objetivos do manejo da irrigação e variáveis a serem determinadas.

Para determinar essas variáveis é necessário conhecer as necessidades de água da cultura e as características do solo quanto a sua capacidade de armazenar água, bem como considerar as características de infiltração de água no solo e a intensidade de aplicação de água dos emissores (Frizzone et al., 2012).

Os métodos de manejo da irrigação são classificados em: via solo; via clima ou condições atmosféricas; e via planta ou estado hídrico da cultura, pode-se ainda adotar o uso combinado dos métodos.

O manejo utilizando o monitoramento via solo é baseado na quantificação da variação do armazenamento de água no solo, a partir de instrumentos que medem direta ou indiretamente o conteúdo de água no solo (θ) ou potencial matricial da água no solo (ψ). Seu princípio pressupõe a determinação do conteúdo de água na zona de extração de água no solo pelas raízes da cultura para repor o volume necessário até atingir a capacidade de campo (CC), que corresponde a quantidade de água retida no solo após a drenagem do excesso da água gravitacional e o movimento da água tornar-se desprezível, condição em que se considera que há 100 % de disponibilidade de água às plantas (Dabach et al., 2016; Albuquerque, 2010) ou um limite crítico de θ , o qual deve considerar a cultura, a textura e o estado físico do solo.

É necessário conhecer a capacidade total de água disponível do solo (CAD), representada pela quantidade de água que o solo pode armazenar na profundidade efetiva do sistema radicular e que corresponde à faixa de armazenamento de água no solo entre a CC e o ponto de murcha permanente (PMP), sendo o PMP definido como

a condição em que a água não se encontra disponível para as plantas, a qual ocorre quando as plantas apresentam perda de turgescência das folhas e não se recuperam, mesmo quando colocadas em ambiente escuro com atmosfera saturada.

Para a determinação dos valores da CC e do PMP são estabelecidas relações entre o θ e o ψ , variando em função dos atributos físico-hídricos do solo e representadas pela curva de retenção da água no solo, que é utilizada como auxílio na determinação da CAD. De maneira geral, a CC é estabelecida quando o potencial matricial da água no solo se encontra entre - 6 e - 33 kPa e o PMP é determinado quando o potencial matricial atinge - 1500 kPa (Brito et al., 2011; Albuquerque, 2010).

O problema de quando irrigar pode ser resolvido com o estabelecimento dos limites críticos inferiores de θ ou ψ para a cultura, os quais, junto com os limites críticos superiores, definem o momento de ligar e desligar o sistema, respectivamente, o que é particularmente útil para sistemas de irrigação automatizados. Alternativamente, podem-se utilizar os fatores de depleção “ f ” junto a informações sobre a disponibilidade total de água no solo.

Para cada cultura existirá uma “faixa” de conteúdo de água no solo favorável ao seu máximo desenvolvimento. Quando o conteúdo de água no solo se torna inferior ao crítico, há maior dificuldade de extração de água pelas raízes, promovendo perdas econômicas e/ou de produtividade (Figura 5), havendo a necessidade de reposição de água nesse instante ou antes de atingir esse potencial referente ao conteúdo crítico de água no solo.

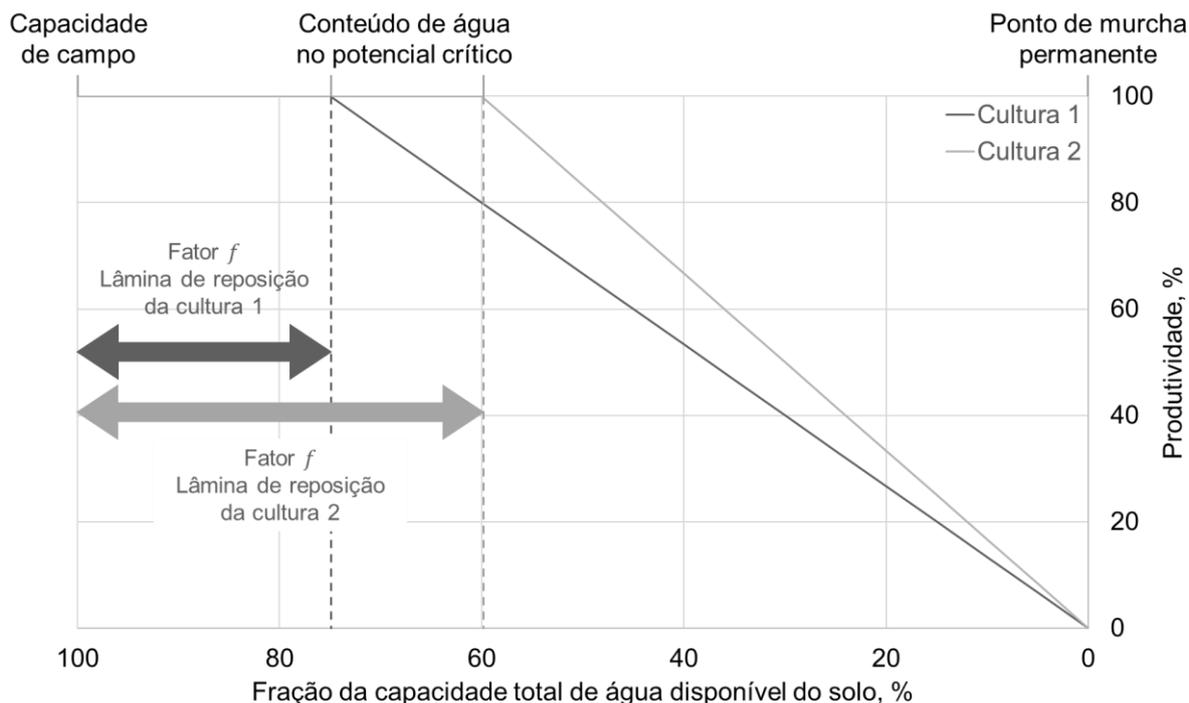


Figura 5. Fator “ f ” calculado para diferentes culturas.

Nesse sentido, estudos apontam que, para uma irrigação eficiente, as informações sobre o requerimento de água pelas culturas são as mais importantes. A literatura já apresenta informações sobre o fator de depleção de água no solo para diversas culturas e os valores críticos de potencial matricial da água no solo, possibilitando auxiliar nos cálculos para o manejo sustentável da irrigação (Frizzone et al., 2012).

Entretanto, a determinação da evapotranspiração da cultura (ET_c) por meio do BAS tem sido bastante utilizada a partir da medição direta de seus componentes aplicados ao longo de um período e dentro de um volume de controle de solo, com a finalidade de aumentar a eficiência de aplicação de água no manejo de áreas irrigadas (Silva et al., 2015).

Nestes estudos, para a medição do conteúdo de água no solo, dentre os sensores disponíveis, as sondas TDR são comumente utilizadas em pesquisas. Diversos trabalhos vêm estudando o balanço de água no solo e a extração de água pelas culturas por meio desses sensores, bem como as quantidades e o melhor posicionamento no solo, de forma a auxiliar o manejo da irrigação e elevar a eficiência de aplicação de água para as culturas (Nascimento et al., 2021; Silva et al., 2019a; Silva et al., 2018; Coelho & Simões, 2015; Silva et al., 2015; Silva & Coelho, 2013; Silva et al., 2013; Silva et al., 2009).

Por outro lado, há poucos trabalhos investigando o manejo e/ou os impactos da irrigação na silvicultura de eucalipto. Em 2001, foi lançado o Projeto de Produtividade Potencial do Eucalipto no Brasil (BEPP), que, dentre outros fatores, avaliou os efeitos da irrigação sobre a produtividade do eucalipto, e seus resultados começaram a ser publicados a partir de 2008 (Ryan et al., 2020; Soares, et al., 2016; White et al., 2014; Hubbard, et al., 2010; Ryan et al., 2010; Stape et al., 2010; Stape et al., 2008). Entretanto, não foram apresentadas sugestões relacionadas ao manejo da água de irrigação.

Referências

- Albuquerque, P. E. P. **Estratégias de manejo de irrigação: exemplos de cálculo**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. 24p. (Circular Técnica, 136).
- Benites, P. K. R. M.; Lopes, A. S.; Gouvêa, A. F. G.; Silva, F. C.; Souza, C. C. B. Caracterização tecnológica da madeira de híbridos de eucalipto irrigados e fertirrigados. **Ciênc. Florest.**, v. 28, n. 4, p. 1716-1728, dez. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509835320>.
- Bernardino, L. T.; Bonomo, R.; Souza, J. M. Desenvolvimento inicial de mudas de eucalipto sob diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.13, nº.1, p. 3169 - 3179, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.7127/RBAI.V13N100833>.
- Bernardo, S. **Manual de Irrigação**. 6ª ed. rev. e ampl. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 1995, 657p.
- Binkley, D.; Campoe, O. C.; Alvares, C. A.; Carneiro, R. L.; Stape, J. L. Variation in whole-rotation yield among Eucalyptus genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS project. **Forest Ecology and Management**, v. 462, p. 117953, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117953>.
- Brito, A. D. S.; Libardi, P. L.; Mota, J. C. A.; Moraes, S. O. Estimativa da capacidade de campo pela curva de retenção e pela densidade de fluxo da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1939-1948, 2011.
- Coelho, E. F.; Simões, W. L. **Onde posicionar sensores de umidade e de tensão de água do solo próximo da planta para um manejo mais eficiente da água de**

irrigação. Embrapa Mandioca e Fruticultura - Circular Técnica (INFOTECA-E), n. 109, 2015, 6p.

Costa, D. B.; Streck, N. A. Duração da fase de mudas em eucalipto simulada em cenários de aumento de temperatura. **Ciênc. Florest.**, v. 28, n. 3, p. 1263-1270, set. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509833378>.

Dabach, S.; Shania, U.; Lazarovitch, N. The influence of water uptake on matric head variability in a drip-irrigated root zone. **Soil & Tillage Research**, v. 155, p. 216-224, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.012>.

Dogramaci, P. A.; Riffat, S.; Gan, G.; Aydin, D. Experimental study of the potential of eucalyptus fibres for evaporative cooling. **Renewable Energy**, v. 131, p. 250-260, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.005>.

Frizzone, J. A.; Freitas, P. S. L.; Rezende, R.; Faria, M. A. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão.** Maringá: Eduem, 2012. 356 p.

Gonçalves, J. C.; Oliveira, A. D.; Carvalho, S. P. C. Gomide, L. R. Análise econômica da rotação florestal de povoamentos de eucalipto utilizando a simulação de Monte Carlo. **Ciênc. Florest.**, Santa Maria, v. 27, n. 4, p. 1339-1347, dez. 2017a. doi: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509830215>.

Gonçalves, J. L. M.; Alvares, C. A.; Rocha, J. H. T.; Brandani, C. B.; Hakamada, R. Eucalypt plantation management in regions with water stress. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 79, n. 3, p. 169-183, 2017b. doi: <http://dx.doi.org/10.2989/20702620.2016.1255415>.

Gonçalves, J. L. M.; Alvares, C. A.; Souza, A. H. B. N.; Arthur Junior, J. C. Caracterização edafoclimática e manejo de solos das áreas com plantações de eucalipto. In: Schumacher, Mauro Valdir; Viera, Márcio (Ed.). **Silvicultura do eucalipto no Brasil.** Santa Maria: Fundação de Apoio a Tecnologia e Ciência-Editora UFSM, 2016. Cap. 4, p. 111-151.

Gonçalves, J. L. M.; Stape, J. L.; Laclau, J. P. Bouillet, J. P.; Ranger, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the brazilian experience. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 70, n. 2, p. 105-118, 2008. doi: <http://dx.doi.org/10.2989/SOUTH.FOR.2008.70.2.6.534>.

González Perea, R.; Daccache, A.; Rodríguez Díaz, J. A.; Camacho Poyato, E.; Knox, J. W. Modelling impacts of precision irrigation on crop yield and in-field water management. **Precision Agriculture**, v. 19, p. 497-512, 2018. doi: <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9535-4>.

Hubbard, R. M.; Stape, J.; Ryan, M. G.; Almeida, A. C.; Roja, J. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1714-1721, 2010. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.10.028>.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Ibá 2022**. São Paulo: Instituto Brasileiro de Economia (IBRE), da Fundação Getúlio Vargas (FGV), 2022. 96p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Monitoramento da cobertura e uso da terra do Brasil: 2018:2020**. Coordenação de Meio Ambiente. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. 39p.

Laws, B. **50 plantas que mudaram o rumo da história**. Rio de Janeiro: Sextante, 2013. 224p.

Leslie, A. D.; Mencuccini, M.; Perks, M. The potential for *Eucalyptus* as a wood fuel in the UK. **Applied Energy**, v. 89, p. 176-182, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.037>.

Libardi, P. L. Água no solo. In: Van Lier, Q. D. J. **Física do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. Cap. III, p. 103-152.

Libardi, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2.ed. São Paulo, EDUSP, 2012. 352p.

Lima, W. D. P.; Zakia, M. B.; Libardi, P. L.; Souza Filho, A. P. Comparative evapotranspiration of *Eucalyptus*, *Pine* and natural "Cerrado" vegetation measure by the soil water balance method. **IPEF International**, v. 1, p. 5-11, 1990.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Brasília, DF). **Plano Nacional de Desenvolvimento de Florestas Plantadas**. Brasília: MAPA, 2018.

Mendes, R. G.; Gastl Filho, J.; Menezes, D. P.; Silva, A. P. S.; Braga, D. L. Jacob, M. A. M., Fialho, A. Efeito do stimulate® na qualidade fisiológica de sementes de eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*). **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 5, n. 3, p. 1877-1885, mar. 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.22533/at.ed.42519040416>.

Nascimento, F. A. L.; Silva, A. J. P.; Freitas, F. T. O.; Veimrober Junior, L. A. D. A. Sensor placement in 2D/3D wetting patterns from drip irrigation for quantification of evapotranspiration. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 188, p. 106356, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106356>.

Nóia Júnior, R. D. S.; Amaral, G. C.; Pezzopane, J. E. M.; Fonseca, M. D. S.; Câmara da Silva, A. P.; Xavier, T. M. T. Ecophysiological acclimatization to cyclic water stress in Eucalyptus. **Journal of Forestry Research**, v. 31, p. 797-806, 2020. doi: <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00926-9>.

Oliveira, Y. M. M. & Oliveira, E. B. **Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental**. Colombo: Embrapa Florestas. 2016.

Pavani, L. C.; Lopes, A. S.; Galbeiro, R. B. Manejo da irrigação na cultura do feijoeiro em sistemas plantio direto e convencional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 12-21, 2009. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162008000100002>.

Pereira, J. C. D.; Sturion, J. A.; Higa, A. R.; Higa, R. C. V.; Shimizu, J. Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).

Ren, S.; White, D. A.; Xiang, D.; Short, T. M.; Xiao, W.; Chen, J.; Deng, Z.; Yang, Z. Simple model of evapotranspiration by Eucalyptus plantations for data poor areas and tested using water balance data from a small catchment in Guangxi, China. **Australian Forestry**, v. 82, n. sup1, p. 66-79, 2019. doi: <https://doi.org/10.1080/00049158.2018.1555733>.

Revolti, P. M. **Caracterização morfológica de um mutante em *Eucalyptus***. 2015. 57 f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Biociências de Botucatu, Botucatu, 2015.

Ryan, M. G.; Stape, J. L.; Binkley, D.; Alvares, C. A. Cross-site patterns in the response of *Eucalyptus* plantations to irrigation, climate and intra-annual weather variation. **Forest Ecology and Management**, v. 475, p. 118444, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118444>.

Ryan, M. G.; Stape, J. L.; Binkley, D.; Fonseca, S.; Loos, R. A.; Takanashi, E. N.; Silva, C. R.; Silva, S. R.; Hakamada, R.; Ferreira, J. M.; Lima, A. M. N.; Gava, J. L.; Leite, F.

P.; Andrade, H. B.; Alves, J. M. Silva, G. G. C. Factors controlling *Eucalyptus* productivity: how water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1695-1703, 2010. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.013>.

Saadaoui, E., Ben Yahia, K., Dhahri, S., Ben Jamaa, M., Khouja, M. An overview of adaptative responses to drought stress in *Eucalyptus* spp., **Forestry Studies**, v. 67, n. 1, p. 86-96. 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1515/fsmu-2017-0014>.

Sabo, V. A.; Knezevic, P. Antimicrobial activity of *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. plant extracts and essential oils: A review. **Industrial Crops and Products**, v. 132, p. 413-429, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.051>.

Sachdev, S.; Ansari, S. A.; Ansari, M. I.; Fujita, M.; Hasanuzzaman, M. Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. **Antioxidants**, v. 10, n. 2, p. 277, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/antiox10020277>.

Saulle, C.C.; Raman, V.; Oliveira, A. V. G.; Maia, B. H. L. N. S.; Meneghetti, E. K.; Flores, T. B.; Farago, P. V.; Khan, I. A.; Budel, J. M. Anatomy and volatile oil chemistry of *Eucalyptus saligna* cultivated in South Brazil. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 28, n. 2, p. 125-134, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bjp.2018.03.001>.

Silva, A. J. P. & Coelho, E. F. Water percolation estimated with time domain reflectometry (TDR) in drainage lysimeters. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 920-927, 2013. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400009>.

Silva, A. J. P.; Coelho, E. F.; Coelho Filho, M. A. Water extraction variability in the banana root zone affects the reliability of water balance. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 1, p. 1-10, 2015. doi: <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0003>.

Silva, A. J. P.; Coelho, E. F.; Coelho Filho, M. A.; Souza, J. L. Water extraction and implications on soil moisture sensor placement in the root zone of banana. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 2, p. 95-101, 2018. doi: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0339>.

Silva, A. J. P.; Coelho, E. F.; Miranda, J. H. Efficiency of water application of irrigation systems based on microsprinkling in banana plantations. **Scientia Agricola**, v. 70, p. 139-146, 2013. doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000300001>.

Silva, A. J. P.; Coelho, E. F.; Miranda, J. H.; Workman, S. R. Estimating water application efficiency for drip irrigation emitter patterns on banana. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 730-737, 2009. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000700013>.

Silva, A. J. P.; Jong Van Lier, Q.; Coelho, E. F. Time Stable Representative Position determination as affected by the considered part of an irrigation cycle. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 157, p. 281-287, 2019a. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.002>.

Silva, P. H. M.; Marco, M.; Alvares, C. A.; Lee, D.; Moraes, M. L. T.; Paula, R. C. Selection of *Eucalyptus grandis* families across contrasting environmental conditions. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 19, n. 1, p. 47-54, 2019b. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1984-70332019v19n1a07>.

Smith, R.; Renton, M.; Reid, N. Growth and carbon sequestration by remnant *Eucalyptus camaldulensis* woodlands in semi-arid Australia during La Niña conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, p. 704-710, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.10.014>.

Soares, A. A. V.; Leite, H. G.; Souza, A. L.; Silva, S. R.; Lourenço, H. M.; Forrester, D. I. Increasing stand structural heterogeneity reduces productivity in Brazilian *Eucalyptus* monoclonal stands. **Forest Ecology and Management**, v. 373, p. 26-32, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.035>.

Stape, J. L.; Binkley, D.; Ryan, M. G. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 3-4, p. 920-930, 2008. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.085>.

Stape, J. L.; Binkley, D.; Ryan, M. G.; Fonseca, S.; Loos, R. A.; Takahashi, E. N.; Silva, C. R.; Silva, S. R.; Hakamada, R. E.; Ferreira, J. M. A.; Lima, A. M. N.; Gava, J. L.; Leite, F. P.; Andrade, H. B.; Alves, J. M.; Silva, G. G. C.; Azevedo, M. R. The Brazil *Eucalyptus* Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1684-1694, 2010. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.012>.

Sun, D.; Zhang, W.; Lin, Y.; Liu, Z.; Shen, W.; Zhou, L.; Rao, X.; Liu, S.; Cai, X.; He, D.; Fu, S. Soil erosion and water retention varies with plantation type and age. **Forest**

Ecology and Management, v. 422, p. 1-10, ago. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.048>.

Vilasboa, J.; Da Costa, C. T.; Fett-Neto, A. G. Rooting of eucalypt cuttings as a problem-solving oriented model in plant biology. **Progress in Biophysics and Molecular Biology**, In Press, Corrected Proof, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2018.12.007>.

Villa, B.; Petry, M. T.; Martins, J. D.; Tonetto, F.; Tokura, L. K.; Moura, M. B.; Silva, C. M.; Gonçalves, A. F.; Cerveira, M. P.; Slim, J. E.; Santos, M. S.; Bellé, M. G.; Jimenez, D. H. Balanço hídrico climatológico: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 6, p. e50211626669-e50211626669, 2022. doi: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i6.26669>.

White, D. A.; Mcgrath, J. F.; Ryan, M. G.; Battaglia, M.; Mendham, D. S.; Kinal, J.; Downes, G. M.; Crombie, D. S.; Hunt, M. E. Managing for water-use efficient wood production in *Eucalyptus globulus* plantations. **Forest ecology and management**, v. 331, p. 272-280, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.08.020>.

CAPÍTULO I

DESEMPENHO INICIAL DE CLONES DE EUCALIPTO SOB FAIXAS DE POTENCIAL MATRICIAL DA ÁGUA NO SOLO¹

¹ Artigo submetido para publicação no periódico científico *Forest Ecology and Management*.

Desempenho inicial de clones de eucalipto sob faixas de potencial matricial da água no solo

Resumo

A cadeia industrial que envolve a silvicultura do eucalipto no Brasil é uma das que mais cresceu nos últimos anos. O melhoramento genético tem avançado no desenvolvimento de clones mais produtivos, focando na maior adaptabilidade a ambientes estressantes (bióticos e abióticos) e na melhoria da qualidade da madeira para os diversos produtos florestais. Há, portanto, a necessidade de testar os clones comerciais para avaliar as suas produtividades potenciais e suas adaptabilidades, especialmente ao estresse hídrico. Objetivou-se avaliar o desempenho de clones de eucalipto na fase inicial de crescimento, submetidos a diferentes faixas de potencial matricial da água no solo (ψ). O experimento foi conduzido em casa de vegetação, utilizando o delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial: 4 clones, dois de *Eucalyptus urophylla* (UP1 e UP2) e dois híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* (GU3 e GU4); e 3 faixas de ψ : *baixa* (-86,7 a -33,9 kPa), *média* (-19,7 a -2,4 kPa) e *alta* (-1,9 a 0 kPa). O cultivo ocorreu em lisímetros de drenagem, com 1,2 m de lado e 0,6 m de altura, preenchidos com Latossolo Amarelo distrocoeso, por 227 dias após o transplante (DAT). Foram avaliados o crescimento, a produção de biomassa aérea compartimentalizada, área foliar, variáveis indicativas do status hídrico e a produtividade da água. O clone UP1 obteve os melhores resultados para a maioria das variáveis analisadas, como por exemplo para a biomassa seca do fuste, que apresentou as maiores médias, tanto em valores absolutos, como relativos desse compartimento. A produtividade da água para biomassa seca foi a melhor na faixa de ψ *alta*, sendo superior em quase duas vezes os resultados das outras duas faixas. Conclui-se que os clones de *E. urophylla* tiveram maior desempenho nas condições experimentais e, em relação às faixas de ψ , a condição de maior disponibilidade de água conduziu as árvores ao melhor desempenho em praticamente todas as variáveis analisadas, inclusive na eficiência para produção de biomassa seca do fuste, seja relacionada à área foliar, como ao uso da água.

Palavras-chave: *Eucalyptus* spp., crescimento vegetal, biomassa aérea compartimentalizada, água no solo, produtividade da água, estufa agrícola.

Early performance of eucalypt clones in response to soil water matrix potential

Abstract

The industrial chain of *Eucalyptus* forestry in Brazil has grown more than others in recent years. Advances in breeding have resulted in the development of higher-yielding clones, with better adaptability to (biotically and abiotically) stressful environments and an enhanced wood quality for a range of forestry products. New commercial clones must therefore be tested to evaluate the potential yield and adaptability, in particular to water stress. The objective of this study was to evaluate the performance of eucalypt clones in the early growth phase in response to different levels of soil water matrix potential (ψ). The experiment was carried out in a greenhouse, in a randomized block factorial design, represented by: four clones, two of *Eucalyptus urophylla* (UP1 and UP2) and two *E. grandis* x *E. urophylla* hybrids (GU3 and GU4); and three ψ ranges: *low* (-86.7 to -33.9 kPa), *medium* (-19.7 to -2.4 kPa) and *high* (-1.9 to 0 kPa). After transplanting, the plantlets were grown for 227 days in drainage lysimeters (sides 1.2 x 1.2 m, height 0.6 m), filled with Latossolo Amarelo distrocoeso. Growth, shoot biomass production partitioned in stem, branch and leaf, leaf area, variables related to water status and water productivity were evaluated. Clone UP1 performed best for most studied variables, e.g., for stem dry matter, with highest means for this section, both in absolute and relative values. Water productivity for dry matter was best in the high ψ range, i.e., almost twice as high as in the other two ranges. It was concluded that, under the experimental conditions, *E. urophylla* clones performed best of all studied clones and that, in relation to the ψ ranges, the performance for practically all studied variables improved at greater water availability, including production efficiency of stem dry matter, whether related to leaf area or water use.

Keywords: *Eucalyptus* spp., plant growth, partitioned shoot biomass, soil water, water productivity, agricultural greenhouse.

Introdução

A avaliação do desempenho de clones de eucalipto em resposta a diferentes regimes hídricos é fundamental, dada a crescente variabilidade climática e a necessidade de promover práticas de manejo sustentáveis em plantações florestais (Corrêa et al., 2023; Noleto-Dias., 2023; Binkley et al., 2020; Ryan et al., 2020; Stape et al., 2010; Whitehead e Beadle, 2004). As florestas plantadas continuarão a ser uma importante fonte de madeira e derivados florestais em todo o mundo, entretanto, as taxas de expansão dessas áreas estão reduzindo por conta das mudanças climáticas, com projeções que indicam precipitações mais variáveis ao longo do ano e a intensificação da seca em todo o mundo e da pressão populacional sobre as terras (Abreu et al., 2022; Payn et al.; 2015).

É, portanto, fundamental investir no desenvolvimento de estratégias para o manejo mais intensivo das áreas produtivas, agindo em diversas frentes, como no melhoramento genético e em técnicas de manejo do solo e da água nos sistemas florestais, não esquecendo da sustentabilidade ambiental e da manutenção adequada dos ciclos hidrológico e biogeoquímicos a nível de bacia hidrográfica (Ferraz et al., 2019).

Contudo, a produtividade florestal é impulsionada, principalmente, pela disponibilidade hídrica no solo e, em muitas regiões do Brasil, a seca constitui um fator limitante muito importante para o desenvolvimento do eucalipto, especialmente onde o déficit hídrico está associado a altas temperaturas durante períodos específicos do ano (Abreu et al., 2022; Queiroz et al., 2020).

Estudos da água em sistemas florestais exigem técnicas que associem os dados climáticos e ambientais, o material genético e o solo, sendo este último extremamente importante na análise e interpretação dos resultados, por meio de seus parâmetros físico-hídricos, que permitem determinar com maior controle e precisão o potencial matricial da água no solo (ψ).

Nesse sentido, é analisada a influência do ψ sobre variáveis da planta, como a turgidez ou o teor relativo de água na planta, o potencial hídrico foliar e os impactos sobre o desenvolvimento das árvores e da produtividade da madeira (Medeiros et al., 2023; Belchior et al., 2020).

O conteúdo de água (θ) e o respectivo potencial matricial da água no solo (ψ), associados por meio da curva de retenção da água no solo, variam em função das propriedades físico-hídricas do solo e são essenciais para estudar a demanda e relações hídricas de culturas agrícolas e florestais.

Tendo em vista que o processo de evapotranspiração é comandado fisicamente pelo processo de diferença de energia entre o solo, a planta e a atmosfera, torna-se ainda mais importante o uso do ψ como base para representar ou criar os diferentes cenários de regime hídrico na avaliação de variáveis de crescimento, fisiológicos e de produção das culturas (Veimrober Júnior et al., 2022; Nascimento et al., 2021; Silva et al., 2015).

Nestes estudos, o θ deve ser medido e sensores, como as sondas de reflectometria no domínio do tempo (TDR), são bastante utilizados, apresentando acurácia satisfatória, principalmente no auxílio do manejo da irrigação, com a definição de limites críticos de disponibilidade hídrica (inferior e superior) e no aumento da eficiência de aplicação de água para as culturas (Silva et al., 2019; Silva et al., 2018; Coelho & Simões, 2015).

Em eucalipto, alguns trabalhos têm indicado os valores de ψ na avaliação de clones de eucalipto submetidos a estresse hídrico ou lâminas de irrigação (García et al., 2023; Pita & Pardos, 2001). neste sentido, o objetivo deste trabalho foi determinar a influência de diferentes faixas de potencial matricial da água no solo sobre o desenvolvimento inicial de clones de eucalipto, por meio de indicadores de crescimento, da produção de biomassa, de status hídrico e da produtividade da água.

Material e Métodos

Configuração experimental

O experimento foi realizado em estufa agrícola (Figura 6) com 30 m de comprimento, 7 m de largura e 5 m de altura (pé direito), localizada na área experimental do Núcleo de Engenharia de Água e Solos (NEAS) da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), no município de Cruz das Almas, Bahia, sob as coordenadas geográficas latitude 12° 39' 19,72" O, longitude 39° 05' 18,78" S e altitude de 210 m. A classificação climática é do tipo Am (tropical de monção), de acordo com Köppen (Bahia, 1999, Alvarez et al., 2013).



Figura 6. Estufa agrícola utilizada no experimento.

As mudas dos clones comerciais, produzidas pelo processo de miniestaquia, fornecidas pela empresa Bracell, foram transplantadas quando apresentavam 144 dias da propagação e altura média de 0,35 m (Figura 7). As plantas foram espaçadas em 2 x 1,7 m e cultivadas em lisímetros de drenagem, com comprimento e largura de 1,2 m e 0,6 m de altura, 0,1 m da parte inferior foi utilizado para o sistema de drenagem, 0,1 m da parte superior ficou vazia e 0,4 m foi preenchido com o solo.



Figura 7. Mudas transplantadas.

O solo utilizado foi constituído do horizonte B do Latossolo Amarelo distrocoeso, desestruturado e peneirado em malha de 0,002 m, com o objetivo de remover restos vegetais, principalmente raízes. As análises químicas do solo foram realizadas com base no Manual de métodos de análise de solo (Teixeira et al., 2017) em duas camadas de 0,2 m, utilizando uma amostra composta constituída de todas as parcelas do experimento (Tabela 1).

Tabela 1. Resultado das análises químicas do solo do experimento.

Atributo	Profundidade da camada (m)	
	----- 0,0 a 0,2 -----	----- 0,2 a 0,4 -----
pH H ₂ O	4,86	5,26
pH CaCl ₂	4,22	4,38
P	304,01	413,84
K	335,9	353,2
S	9,76	9,04
Ca+Mg	5,31	4,78
Ca	2,94	2,39
Mg	2,37	2,01
Al	<0,1	<0,1
H+Al	5,61	4,54
Na	0,16	0,14
CTC	11,78	9,84
V	53,22	54,88
Matéria Orgânica	3,07	2,06
Carbono Orgânico Total	1,78	1,19
B	0,987	1,066
Cu	16,64	12,31
Fe	56,93	49,15
Mn	15,07	14,84
Zn	20,64	29,71

Dos atributos físicos, foram determinadas a granulometria, a porosidade e a densidade do solo. O solo apresentava 635 g kg⁻¹ de areia, 85 g kg⁻¹ de silte e 280 g kg⁻¹ de argila, sua classificação textural foi franco argilo arenosa. A porosidade total encontrada foi de 0,472 m³ m⁻³ e a densidade do solo foi de 1,44 g cm⁻³.

Foi realizada adubação nitrogenada com sulfato de amônio, para a qual foi utilizada a recomendação de 55 kg de N por hectare (Gonçalves et al., 2015), fracionada quinzenalmente, para 9 meses de cultivo (previsão inicial da duração do experimento), a primeira foi feita na cova de plantio e as demais iniciaram um mês após o transplante.

As plantas passaram por um processo de aclimação, recebendo água, igualmente, a cada dois dias, em média, por meio de regador. A aplicação das condições de ψ teve início aos 73 dias após o transplante (DAT) e o experimento foi conduzido até 227 DAT, quando a altura de algumas árvores já estava atingindo o teto da estufa (4,3 m), limitando o crescimento, conforme pode-se observar na Figura 8, que também apresenta o contraste entre os tratamentos.



Figura 8. Árvores do clone UP2 de *Eucalyptus urophylla* no dia do corte em cada uma das faixas de potencial matricial da água no solo (ψ).

Utilizaram-se 36 parcelas com as plantas dispostas no delineamento em blocos casualizados e em esquema fatorial duplo (4 x 3), contendo três repetições (Figura 9): quatro clones, sendo dois da espécie *Eucalyptus urophylla* (UP1 e UP2) e dois híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* (GU3 e GU4); e três faixas de ψ , consideradas como *baixa* (-86,7 a -33,9 kPa), *média* (-19,7 a -2,4 kPa) e *alta* (-1,9 a 0 kPa). O cultivo ocorreu entre os meses de maio e dezembro do ano de 2022.

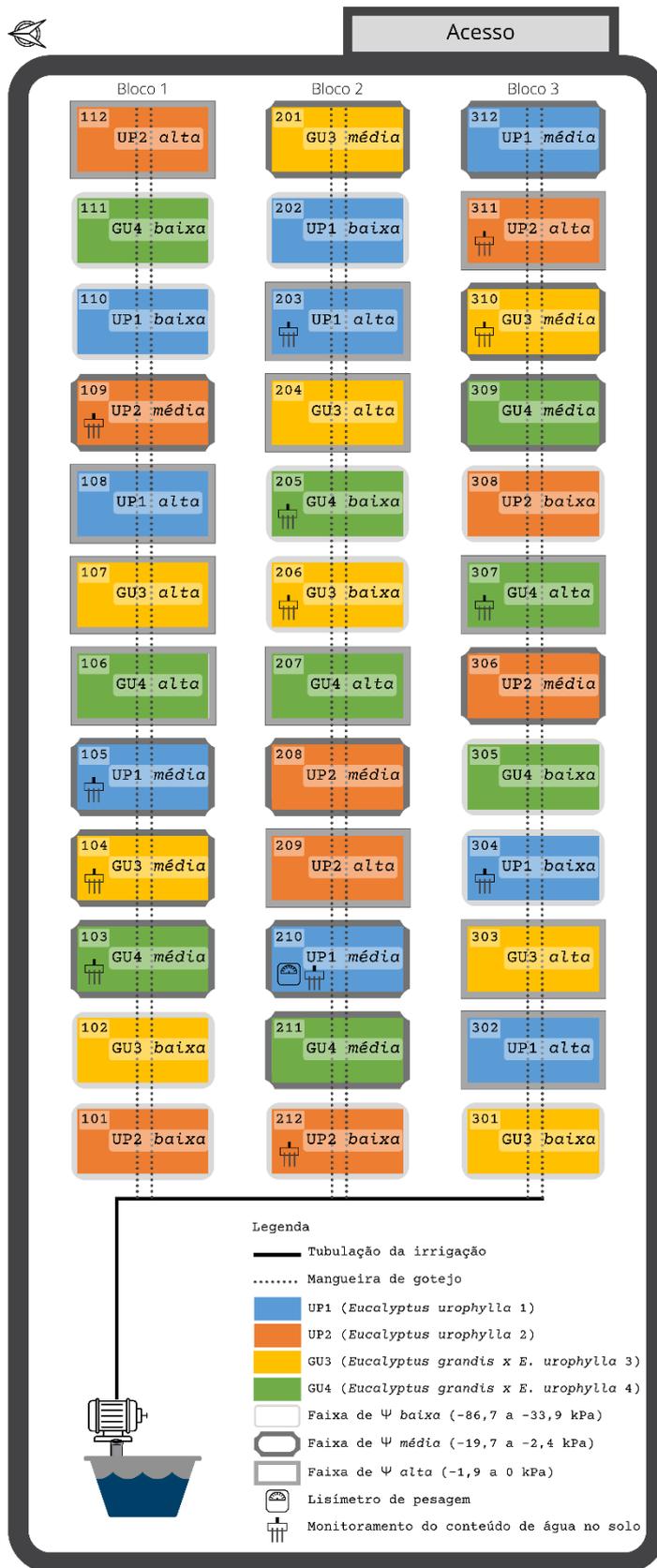


Figura 9. Croqui experimental.
 ψ : Potencial matricial da água no solo

As condições de *baixa* e *média* faixas de ψ foram obtidas pela média dos valores medidos com o uso de sondas TDR nas profundidades de 0,1 e 0,3 m para a distância 0 m do emissor/caule e foram mantidas utilizando a irrigação por gotejamento.

Na faixa *baixa*, buscou-se manter o ψ em níveis considerados de difícil absorção de água pelas raízes da planta, ou seja, em uma faixa inferior ao potencial crítico estabelecido neste experimento e considerado como o valor em que a cultura apresenta prejuízo à produtividade, caracterizando uma situação de estresse ou déficit hídrico.

A faixa *média* de ψ , utilizada nesse experimento, é considerada como ótima para absorção de água pelas raízes, com valores superiores ao crítico (Frizzone et al., 2012), o manejo da irrigação é descrito posteriormente em tópico específico.

A condição de *alta* faixa de ψ foi estabelecida com a elevação do lençol freático a 0,1 m da superfície do solo, por meio de lisímetros de lençol freático de carga constante, monitorados com um tubo de acesso inserido no solo (Figura 10), portanto, nessa primeira camada, o solo não ficou saturado e ocorreram potenciais matriciais inferiores a 0 kPa, mas sempre muito próximas a esse valor, como observado na Tabela 2, na qual verifica-se a média mensal dos valores de ψ medidos em três parcelas na profundidade de 0,1 m, durante o experimento.



Figura 10. Lisímetro de lençol freático de carga constante e tubo de acesso inserido no solo para monitoramento do nível da água.

Tabela 2. Potencial matricial da água no solo (ψ) medida a 0,1 m nas parcelas monitoradas do tratamento de lençol freático de carga constante (faixa de -1,9 a 0 kPa).

Parcela	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Média
----- Média mensal do ψ , kPa -----						
203	-1,6	-0,8	-0,4	-0,7	-0,9	-0,8
307	-1,6	-0,1	-1,2	-1,0	-1,7	-1,0
311	-0,1	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0
Média	-1,1	-0,3	-0,5	-0,6	-0,9	-0,6

Foram instaladas 60 sondas de TDR em 12 parcelas para monitoramento do conteúdo de água no solo (Figura 9), sendo três delas automatizadas em datalogger, a 103 (GU4, *média*), 206 (GU3, *baixa*) e 307 (GU4, *alta*), contemplando as diferentes faixas de ψ , contendo 5 sondas cada, distribuídas conforme a Figura 11.

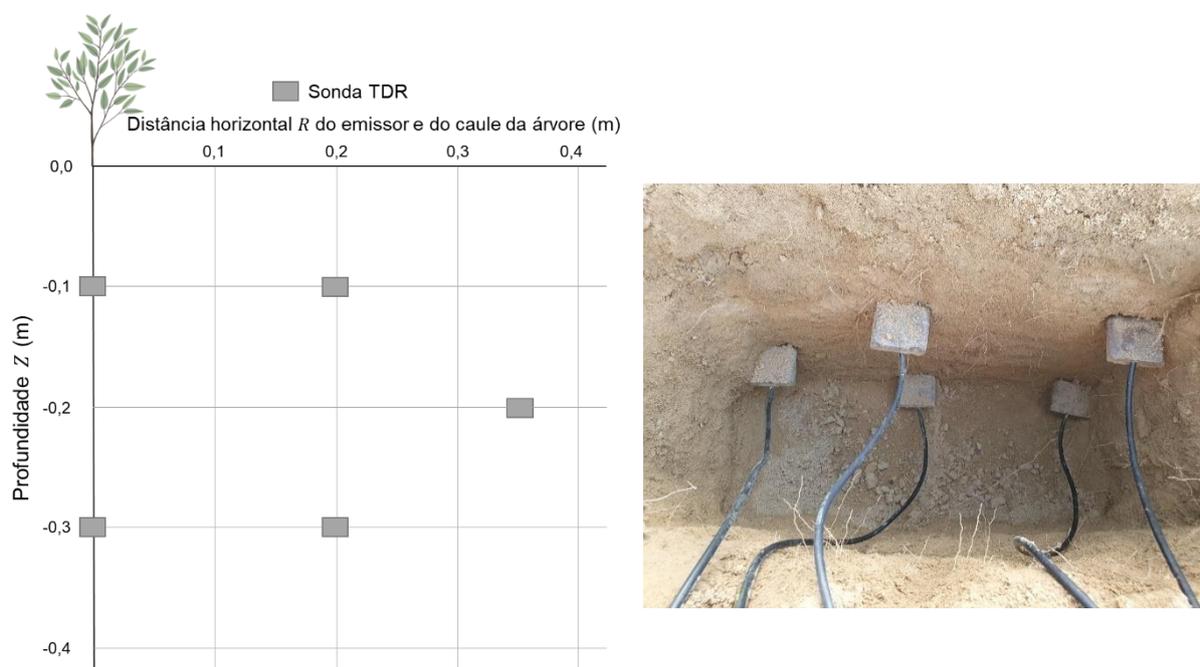


Figura 11. Esquema de distribuição das sondas TDR no perfil do solo com foto ilustrativa.

Os dados foram coletados ininterruptamente em intervalos de 20 minutos, utilizando um datalogger CR1000, um TDR100 e três multiplexadores SDMX50, fabricados pela Cambell Scientific, Inc., Logan, Utah, EUA. Aqueles que não tiveram automatização foram coletados em planilha eletrônica diariamente, no início da manhã e no final da tarde, utilizando diretamente a porta de outro reflectômetro TDR100.

Uma estação meteorológica foi instalada no interior da estufa para o monitoramento dos dados de temperatura, umidade relativa do ar e radiação solar global (Figura 12), os quais foram apresentados semanalmente em gráficos e resumidos pela estatística descritiva.



Figura 12. Piranômetro LP02 (Hukseflux) e termohigrômetro.

Determinação dos parâmetros hidráulicos do solo

A modelagem inversa em ensaio de evaporação foi utilizada para determinar os parâmetros hidráulicas do solo antes da implantação do experimento. Tal procedimento consistiu na aplicação de água no solo de um lisímetro de pesagem, instalado em uma das parcelas no centro da estufa, até a saturação, sendo monitorado continuamente, por meio de registro horário em datalogger, a variação do conteúdo de água no solo (utilizando sondas TDR) e da massa no lisímetro, que corresponde a perda por evaporação, tendo em vista que o sistema de drenagem foi fechado para evitar a percolação.

Ao final (26 dias) foi possível calcular concomitantemente a taxa de evaporação e de θ . Esses dados foram tratados no software Hydrus-1D (Šimůnek et al., 2016), simulando o fluxo de água para saturação variável em meio poroso de forma unidimensional, por meio da resolução numérica da equação de Richards (equação 2).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (2)$$

sendo h a pressão da água no solo (m), θ o conteúdo de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), t o tempo (d), z a coordenada vertical (m) e $K(h)$ a condutividade hidráulica não saturada (m dia^{-1}).

Para resolver a equação 2, o modelo ajusta os parâmetros das funções analíticas de Van Genuchten-Mualem (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980), Equações 3 e 4.

$$\theta = [1 + |\alpha h|^n]^{(\frac{1}{n})-1}, \quad (3)$$

$$K = K_s \theta^\lambda \left[1 - (1 - \theta^{n/(n-1)})^{1 - (\frac{1}{n})} \right]^2 \quad (4)$$

sendo $\theta = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$ a saturação efetiva, θ_r o conteúdo de água residual no solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), θ_s o conteúdo de água no solo saturado ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), K a condutividade hidráulica (m dia^{-1}), K_s a condutividade hidráulica do solo saturado (m dia^{-1}), e α (m^{-1}), n (-), e λ (-) os parâmetros empíricos.

O Hydrus-1D implementa o método de estimativa dos parâmetros de Marquardt-Levenberg para otimização inversa dos parâmetros hidráulicos do solo. A função objetiva (Φ) corresponde à soma dos quadrados dos desvios entre os valores medidos e simulados e é definida em termos do conteúdo de água no solo em função do tempo, $\theta_i(t_i)$ (equação 5).

$$\Phi(\theta, \beta) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^k [\theta_{TDR,j}(z_i t_i) - \theta_{PRED,j}(z_i, t_i, \beta)]^2 \quad (5)$$

sendo que o lado direito representa os resíduos entre o conteúdo de água medido pela TDR (θ_{TDR}) no tempo t_i para as diversas leituras j medidas no local z_i , e seu correspondente valor estimado (θ_{PRED}) utilizando os parâmetros hidráulicos do solo otimizados no parâmetro vetor β (por exemplo, θ_r , θ_s , α , n , K_s e λ), m o número de diferentes conjuntos de medições e k o número de medidas em um determinado conjunto de medições.

Calibração dos sensores

Foi realizada a calibração dos sensores de TDR, visando correlacionar os valores da constante dielétrica aparente (k_a) com o conteúdo de água no solo (θ), obtidos, por meio de pesagem manual, desde a saturação até a secagem total em estufa a 105 °C. Para os dados coletados, utilizando os multiplexadores, foram utilizadas 23 amostras indeformadas de solo, coletadas com tubos de PVC com diâmetro interno de 0,0975 m e altura de 0,15 m, gerando as curvas específicas para cada sonda, além disso, no processo foram obtidos 486 pares de pontos, utilizados na geração da equação polinomial cúbica (Figura 13), que tem o objetivo de estimar a umidade do solo com base nas leituras realizadas nas sondas TDR.

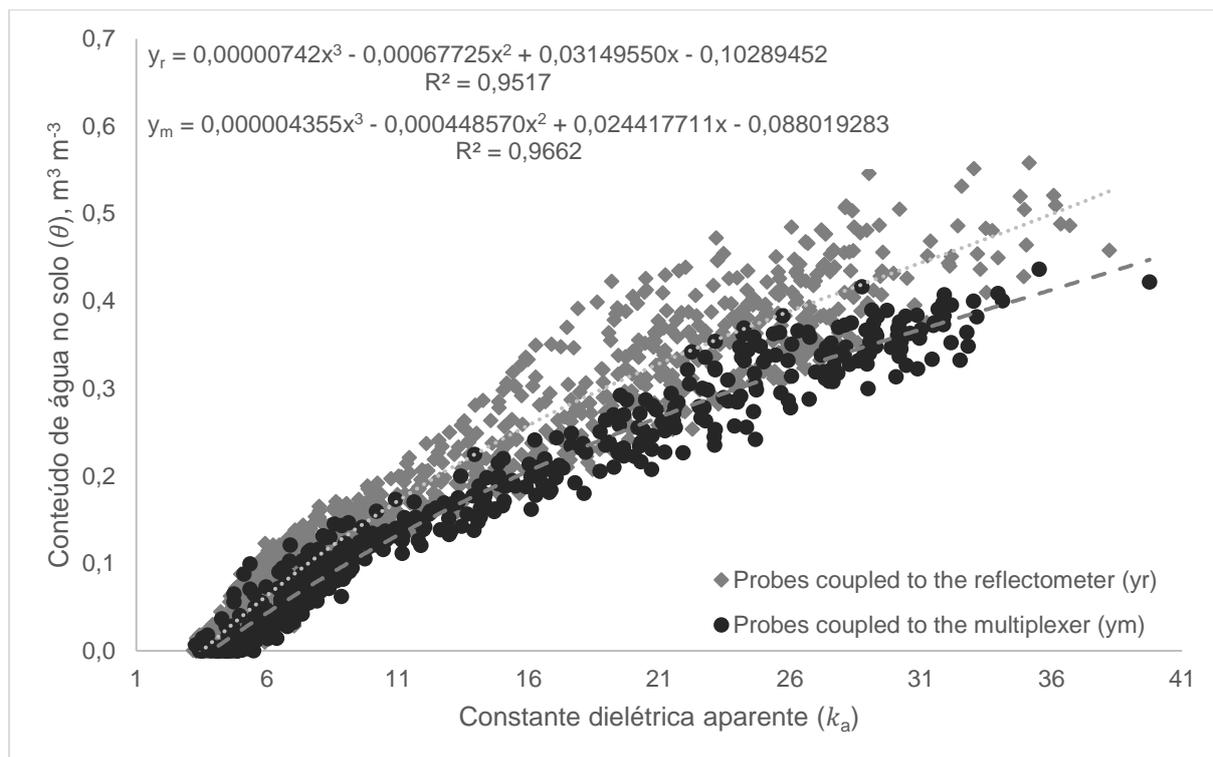


Figura 13. Curvas de calibração dos dados do conteúdo de água no solo obtidos a partir da constante dielétrica aparente das sondas TDR, conectadas ao reflectômetro (y_r) e aos multiplexadores (y_m).

O processo foi repetido, utilizando a porta direta de conexão do reflectômetro, dessa vez, obtendo dados de 39 amostras indeformadas, contendo 1184 pares de pontos para gerar a outra equação polinomial cúbica (Figura 13).

Manejo da irrigação

O sistema de irrigação foi composto por tubos contendo um emissor de gotejamento, localizado a 0,05 m do caule para cada árvore, apresentando vazão nominal de $4,2 \text{ L h}^{-1}$ e pressão de serviço de 10 mca. O teste de uniformidade de distribuição de água foi realizado em dois momentos, imediatamente após a instalação do sistema de irrigação e próximo ao final do experimento, obtendo os valores de 95 % e 97,5 %, respectivamente, para o coeficiente de uniformidade de Christiansen (Frizzone et al., 2012).

O manejo da irrigação foi realizado diariamente após a obtenção dos valores médios de conteúdo de água no solo fornecidos pelas sondas de TDR localizadas na distância R de 0 m do gotejador e nas profundidades Z de 0,1 e 0,3 m, a definição de quanto irrigar (lâmina de água a ser aplicada) levou em consideração os parâmetros hidráulicos do solo (Tabela 3).

Tabela 3. Parâmetros hidráulicos do solo utilizado no experimento.

Sigla	Parâmetro	Unidade	Valor
θ_s	Conteúdo de água no solo na saturação	$m^3 m^{-3}$	0,472
θ_r	Conteúdo de água no solo residual	$m^3 m^{-3}$	0,022
α	Parâmetro empírico	-	5,5
n	Parâmetro empírico	-	1,52
Λ	Parâmetro empírico	-	0,008
ψ_{cc}	Potencial matricial na capacidade de campo	kPa	-10,1974
θ_{cc}	Conteúdo de água no solo na capacidade de campo	$m^3 m^{-3}$	0,2012
ψ_{pmp}	Potencial matricial no ponto de murcha permanente	kPa	-1529,610
θ_{pmp}	Conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente	$m^3 m^{-3}$	0,0356
A_w	Área molhada	m^2	0,5
Z	Profundidade do perfil do solo	m	0,4
V_{cc}	Volume de água na capacidade de campo	L	35,84
Ef	Eficiência de aplicação de água	-	0,95
Q_e	Vazão do emissor	$L h^{-1}$	4,2
CAD	Capacidade total de água disponível do solo	$m^3 m^{-3}$	0,1657

Para o manejo da irrigação da faixa *média* (ψ monitorado entre -19,7 e -2,4 kPa), adotou-se como limite inferior de disponibilidade de água no solo o valor de 76 % (momento de ligar a moto-bomba), o que corresponde ao θ de $0,1615 m^3 m^{-3}$ e um potencial matricial de -16,6 kPa, calculada pela curva de retenção da água no solo, conforme modelo de Van Genuchten-Mualem (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980), apresentada na equação 6. O volume de água foi calculado para retornar o solo ao potencial matricial de -10 kPa, quando o θ corresponde a $0,2012 m^3 m^{-3}$. Considerando os demais parâmetros, a irrigação total necessária (ITN), caso fossem encontradas as condições apresentadas, resultava em 8,4 L (equação 7) e no tempo de irrigação (TI) de 120 minutos (equação 8).

$$\theta_{\psi} = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{(1 + |\alpha\psi|^n)} \right]^{(1 - \frac{1}{n})} \quad (6)$$

$$ITN = \left[\frac{(\theta_{\psi_{ls}} - \theta_a) A_w Z}{Ef} \right] 1000 \quad (7)$$

$$TI = \frac{ITN}{Q_e} \quad (8)$$

sendo θ_{ψ} o conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$) em função de ψ , θ_r o conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$) residual, θ_s o conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$) saturado, ψ o potencial matricial da água no solo (mca), α e n os parâmetros empíricos da equação, ITN a irrigação total necessária (L), $\theta_{\psi_{ls}}$ o conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$) no perfil

para o potencial matricial considerado como limite superior de disponibilidade de água do tratamento, $\bar{\theta}_a$ a média do conteúdo de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) atual no perfil medido no momento da irrigação, A_w a área molhada (m^2), Z a profundidade do perfil do solo (m), E_f a eficiência de aplicação de água, TI o tempo de irrigação (h) e φ_e a vazão do emissor (L h^{-1}).

Para a faixa *baixa* (ψ monitorado entre -86,7 e -33,9 kPa), adotou-se o limite inferior de disponibilidade de água de 33,6 % (momento de ligar a moto-bomba), o que corresponde a um conteúdo de água no solo de $0,0913 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ e um potencial matricial de -65 kPa, o volume de água foi calculado para retornar o ψ ao valor de -50 kPa, correspondendo a 40 % de disponibilidade de água e um conteúdo de água no solo de $0,1013 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, gerando a necessidade de reposição de água, ou ITN , de 2,1 L, fornecida durante o tempo de irrigação de 30 minutos.

O gráfico com a curva de retenção (Figura 14) mostra as faixas de ψ utilizadas como parâmetro para o manejo de cada um dos dois tratamentos irrigados. Os dados de θ foram coletados diariamente em pelo menos dois momentos, no início da manhã e no final da tarde, para decisão da irrigação. Após inserção dos valores obtidos em planilha eletrônica, era efetuado o cálculo do tempo de irrigação, caso fosse necessário, para as condições pré-estabelecidas. O acionamento do sistema ocorreu de forma manual, entretanto, foi utilizado o mini controlador K-Rain RPS46 6 setores para programar os tempos de irrigação (Figura 15).

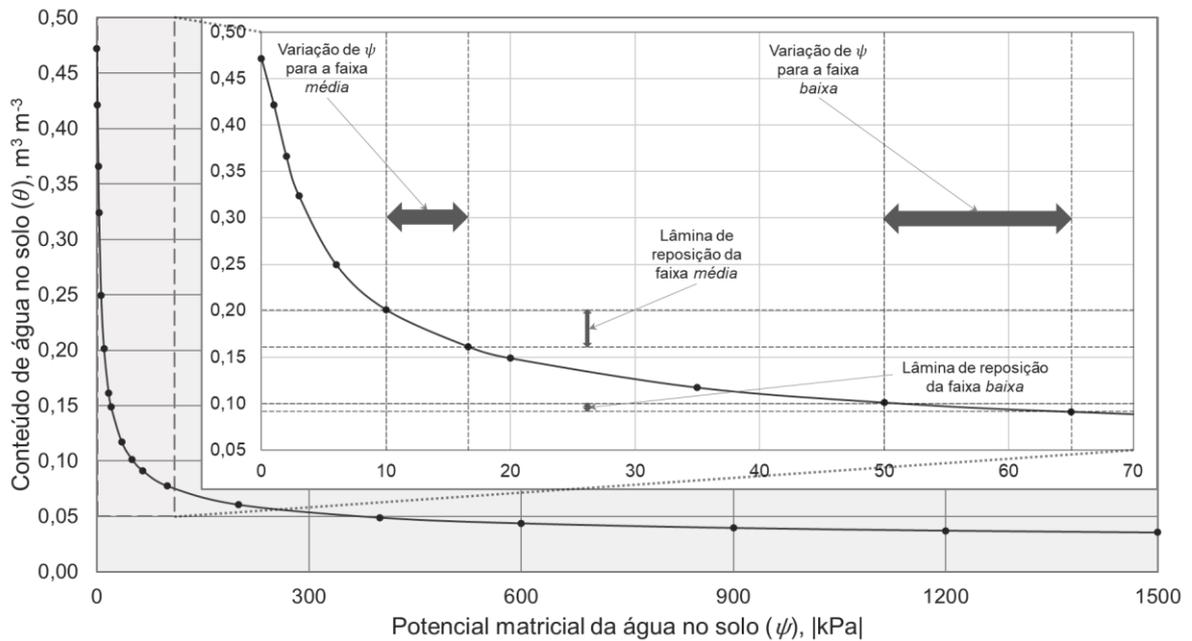


Figura 14. Curva de retenção da água no solo e destaque demonstrando as faixas de variação do potencial matricial da água no solo dos tratamentos irrigados e as respectivas lâminas de reposição.

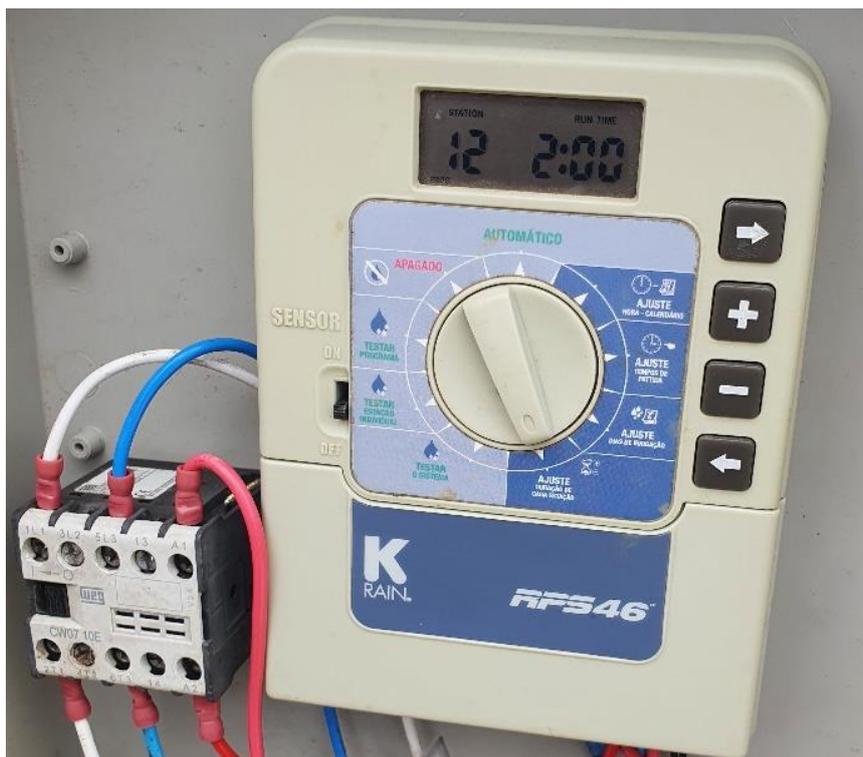


Figura 15. Mini controlador de irrigação utilizado no experimento.

Para efeitos didáticos, um exemplo de como ocorreu a decisão de irrigar é apresentado na Tabela 4, demonstrando o acionamento do sistema para um ciclo de irrigação em ambas as condições determinadas para os tratamentos irrigados. A obtenção do valor de ψ na curva de retenção levou em consideração as médias das

duas medidas de θ obtidas por meio das sondas TDR, localizadas nas profundidades Z de 0,1 e 0,3 m para a distância R de 0 m. Na faixa *baixa*, utilizou-se a parcela 206 e na faixa *média*, a parcela 103. Observa-se que a planilha foi elaborada para retornar tempos de irrigação mesmo quando não havia indicação da irrigação, o operador poderia decidir por acionar o sistema antes mesmo de atingir os limites críticos de potencial matricial pré-estabelecidos, levando em consideração que quando o ψ crítico fosse atingido, poderia não ter condições de acionar de imediato o sistema.

Tabela 4. Planilha utilizada no manejo da irrigação do experimento.

Faixa de ψ pré-determinada	Data e hora	ψ , kPa	θ_a , m ³ m ⁻³	ITN (L)	TI (h:mm)	Irigar
<i>Baixa</i> : -65 a -50 kPa	03/12/22 08:00	-66,4	0,0905	2,3	0:32	Sim
	03/12/22 16:20	-51,3	0,1003	0,0	0:00	Não
	04/12/22 06:40	-61,3	0,0934	0,0	0:00	Não
	04/12/22 10:20	-62,3	0,0928	1,8	0:25	Não
	04/12/22 17:40	-62,5	0,0927	1,8	0:26	Não
<i>Média</i> : -16,6 a -10 kPa	03/12/22 08:00	-19,1	0,1518	10,4	2:28	Sim
	03/12/22 16:20	-12,8	0,1809	0,0	0:00	Não
	04/12/22 06:40	-15,4	0,1667	7,3	1:43	Não
	04/12/22 10:20	-9,9	0,2018	0,0	0:00	Não
	04/12/22 17:40	-16,9	0,1601	8,7	2:03	Sim

ψ : potencial matricial da água no solo; θ_a : conteúdo atual de água no solo; ITN: irrigação total necessária; TI: tempo de irrigação.

A evapotranspiração (ET) foi quantificada nas condições irrigadas (faixas *baixa* e *média* de ψ) pela diferença entre a quantidade aplicada via irrigação e a quantidade drenada, obtidas diariamente. Na condição da faixa *alta* de ψ , a ET foi contabilizada pelo consumo diário medido no reservatório de reposição da bombona (Figura 16), calculado de acordo com a equação 9.

$$ET_{CLF} = \pi r^2 l \times 1000 \quad (9)$$

sendo ET_{CLF} a evapotranspiração medida no lisímetro de lençol freático (L planta⁻¹), r o raio do reservatório de reposição de água da bombona (m), l a leitura da lâmina consumida no reservatório de reposição de água da bombona (m).

Z_{dren} = Profundidade do sistema de drenagem (0,1 m)

Z_{sat} = Profundidade do solo saturado (0,3 m)

Z_{ns} = Profundidade do solo não saturado ou altura do lençol freático (0,1 m)

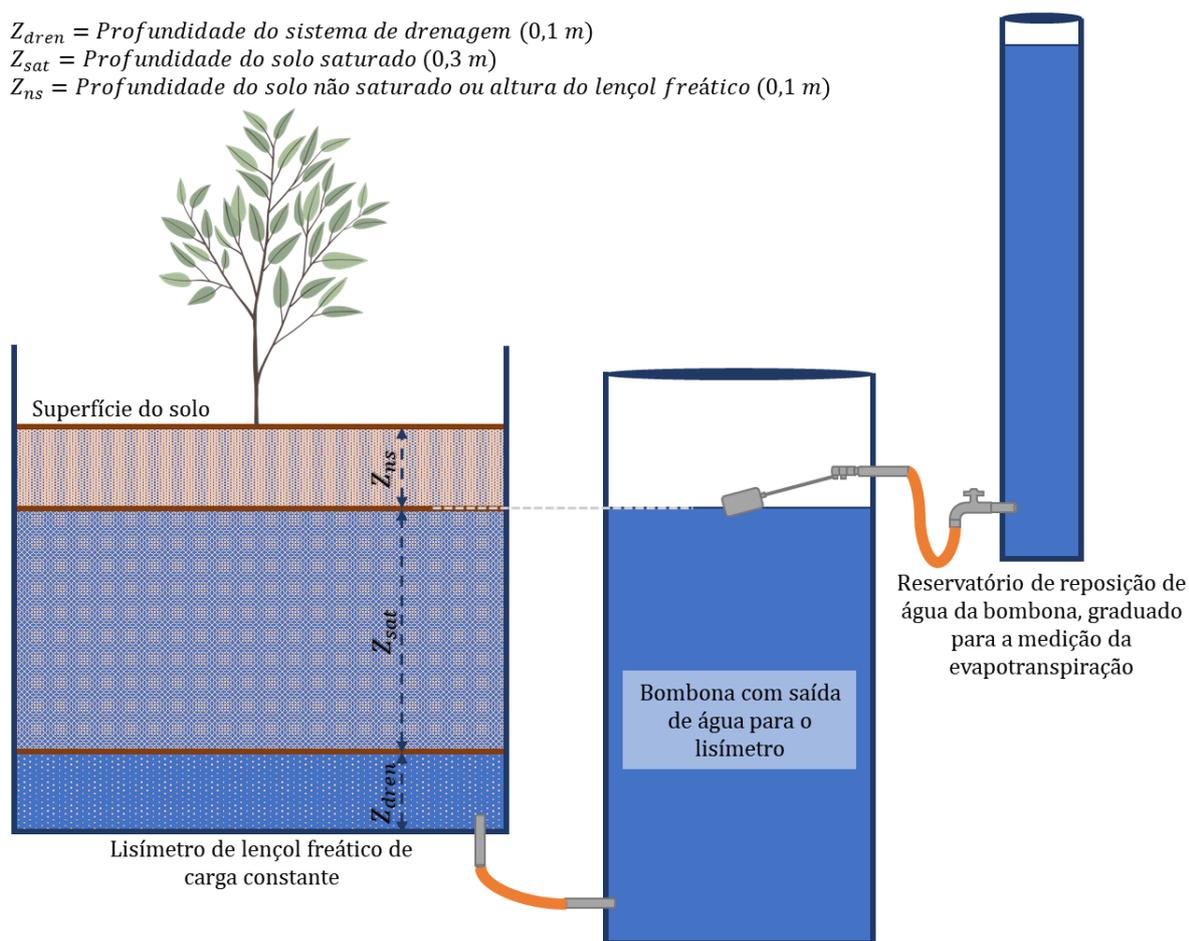


Figura 16. Esquema de funcionamento do lisímetro de lençol freático de carga constante, figura meramente ilustrativa não representada em escala.

Variáveis analisadas e estatística

O crescimento de cada clone foi avaliado por meio das variáveis: altura total (cm) e diâmetro do caule (mm) a 0,1 m de altura do nível do solo, medidas, em média, a cada 15 DAT, com o auxílio de uma fita métrica e um paquímetro digital, marca MTX, resolução de 0,01 mm e margem de erro de 0,02 mm. Além disso, foi avaliada a biomassa fresca e seca da parte aérea compartimentalizada (fuste, galho e folha), medidas no dia do corte das árvores do experimento.

Para os dados de biomassa, a árvore foi cortada aos 227 DAT e os compartimentos folha, galho e fuste foram separados com cuidado e armazenados em sacos plásticos. O fuste foi pesado imediatamente após esse procedimento, utilizando balança com precisão de 0,01 kg, determinando a biomassa fresca do fuste ($BFFu$), em seguida, foi cortado em três partes iguais e obtida uma amostra representativa de cada terço, correspondendo a um total de aproximadamente 30 % da massa total ($BFFu_p$), que foi levada para estufa de circulação forçada de ar a 70

°C para secagem, permanecendo até atingir massa constante ($BSFu_p$). A biomassa seca do fuste ($BSFu$) foi determinada por regra de três simples (equação 10). O mesmo procedimento foi feito para biomassa fresca e seca de galhos e de folhas, entretanto, para as folhas o procedimento foi realizado em triplicata.

$$BSFu = BFFu \frac{BSFu_p}{BFFu_p} \quad (10)$$

sendo $BSFu$ a biomassa seca do fuste (g), $BFFu$ a biomassa fresca do fuste (g), $BSFu_p$ a biomassa seca parcial do fuste (g) e $BFFu_p$ a biomassa fresca parcial do fuste (g).

As análises foram complementadas com a avaliação das seguintes variáveis: área foliar total (AF), teor relativo de água na folha (TRA) e potencial hídrico foliar (ψ_f).

Para determinação da AF utilizou-se cortador para extrair discos circulares de 0,005 m de raio. Do conjunto das folhas foram retirados 100 discos de forma aleatória e acondicionados em pesa-filtro de peso conhecido, posteriormente, foi determinado o peso da biomassa fresca dos discos em balança analítica, precisão de 0,0005 g, indo a estufa de circulação forçada de ar a 70 °C até massa constante, obtendo a biomassa seca dos discos (BSD). AF foi determinada por regra de três tendo por base a biomassa seca das folhas ($BSFo$) de acordo com a equação 11, conforme apresentado por Diao et al. (2010), que relacionaram a área foliar com a massa de folhas jovens e maduras de árvores sadias de *E. grandis* x *E. urophylla* em diferentes idades e encontraram modelos lineares significativos.

$$AF = \pi r_d^2 n_d \frac{BSFo}{BSD} \quad (11)$$

sendo AF a área foliar total ($m^2 \text{ planta}^{-1}$), r_d o raio do disco (m), n_d o número de discos extraídos, $BSFo$ a biomassa seca das folhas (g) e BSD a biomassa seca dos discos (g).

O processo de determinação do TRA foi realizado para avaliar o estado de hidratação da planta, sendo mais um indicador importante neste trabalho. Foram realizadas 4 repetições, todas no Bloco 3, abrangendo 1 ciclo de irrigação (dois dias) para cada repetição. As medições ocorreram às 7 h do primeiro dia ou imediatamente antes da irrigação e às 15 h. No outro dia foram realizadas nos mesmos horários, totalizando 4 medições ao longo do ciclo de irrigação.

A metodologia utilizada para a determinação das variáveis utilizadas no cálculo está apresentada no fluxograma da Figura 17. Aplicou-se, posteriormente, a fórmula da equação 12 (Barrs & Wheaterley, 1962).

$$TRA = \frac{MF-MS}{MT-MS} 100 \quad (12)$$

sendo *TRA* o Teor Relativo de Água na folha (%), *MF* a massa fresca, *MS* a massa seca e *MT* a massa túrgida.

O *TRA* é expresso em porcentagem, quanto maior o valor, mais hidratada está a planta, e valores menores indicam possível estresse hídrico.

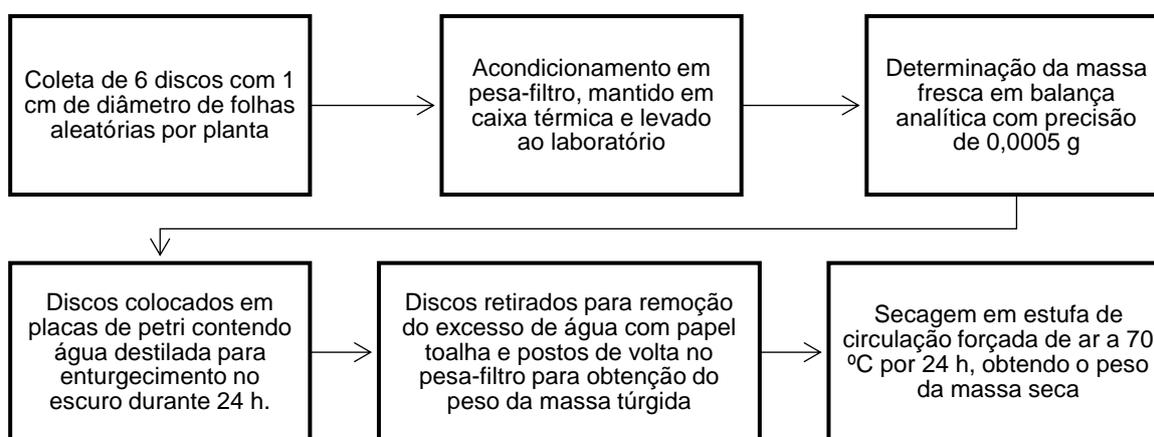


Figura 17. Fluxograma metodológico para determinação das variáveis utilizadas no cálculo do teor relativo de água na folha.

Para contribuir com a análise do estado hídrico da planta, foi avaliado o potencial hídrico foliar (ψ_f), conforme Scholander et al. (1965) e Soilmoisture (2017), para tal procedimento foi utilizada uma folha totalmente expandida e sadia (Figura 18), extraída do terço médio de todas as plantas, em três momentos do dia: às 8 h 30 min, por ser imediatamente antes da irrigação, quando a planta está submetida ao maior ψ da faixa, às 11 h 30 min, momento em que a planta está submetida ao menor ψ da faixa e às 17 h 30 min, quando o ψ encontra-se numa faixa intermediária. A medição ocorreu durante dois dias, aos 218 e 219 DAT, contemplando dois ciclos de irrigação para o tratamento da faixa média de ψ e um ciclo de irrigação no tratamento da faixa baixa de ψ .



Figura 18. Medição do potencial hídrico foliar com a câmara de Scholander.

A produtividade da água (PA) foi determinada por meio da relação entre a produção de biomassa seca do fuste e a evapotranspiração ocorrida em cada tratamento, quantificada conforme descrito no item de manejo da irrigação, aplicando-se a equação 13, adaptada de Frizzone et al. (2012).

$$PA = \frac{BSFu}{ET_c} \quad (13)$$

sendo PA a produtividade da água ($g L^{-1}$), $BSFu$ a biomassa seca do fuste (g) e ET_c a água consumida por evapotranspiração da cultura (L).

Considerou-se o termo PA como sinônimo de produtividade biofísica da água da cultura com o objetivo de contribuir com a abordagem utilizada por Fernández et al. (2020), os quais apresentam os conceitos e equações envolvidas de indicadores úteis para a análise do uso da água em culturas lenhosas.

Foram realizadas análises de variância com teste F, conjuntamente ao teste de médias de Scott-Knott ao nível de 5 % de significância, bem como análises de regressão linear, propostos para avaliar o comportamento dos indicadores de

crescimento, produção em biomassa, variáveis do status hídrico e produtividade das plantas de eucalipto em função dos tratamentos aplicados.

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5 % de significância foi utilizado antes do agrupamento das médias e indicou que a função de distribuição para todos os dados apresentou normalidade estatística.

As análises estatísticas foram realizadas no software R, versão 4.3.1 (R Core Team, 2023) e foi utilizado o pacote ExpDes.pt nas análises de variância e testes de média (Ferreira et al., 2021).

Resultados e Discussão

Condições climáticas e caracterização das faixas de potencial matricial da água no solo

Com relação à radiação solar global, a média geral foi de $12,6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e desvio padrão de $3,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, a mínima ficou em $4,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e a máxima em $18,9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (Figura 19).

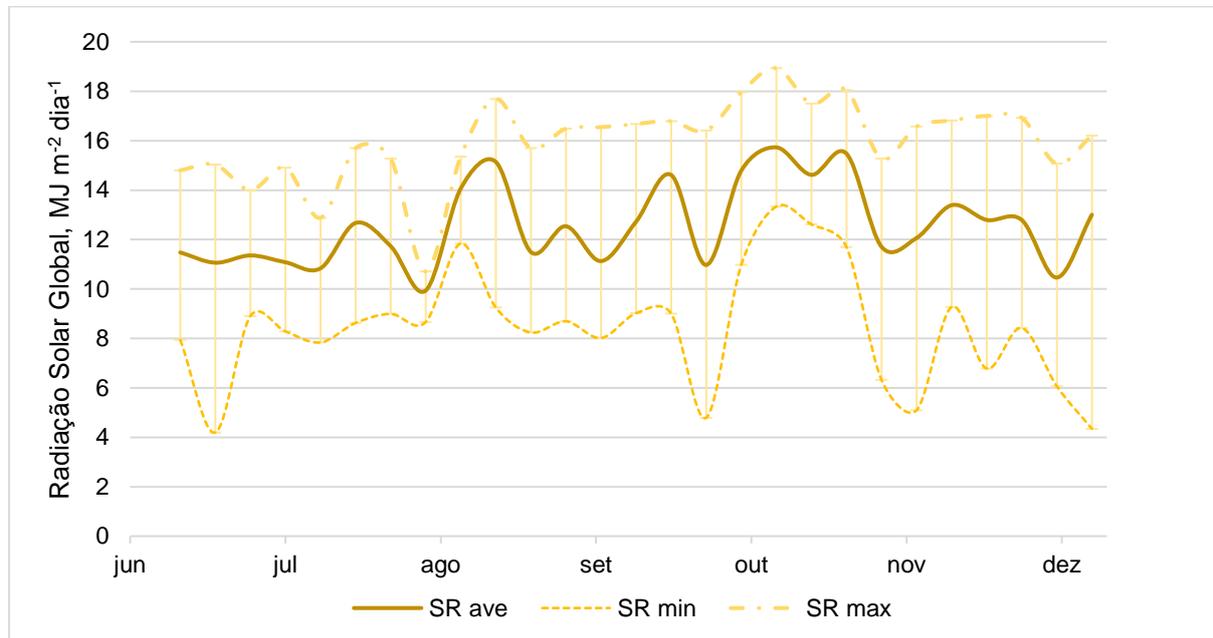


Figura 19. Radiação Solar Global (RS) em valores semanais mínimos (min), médios (med) e máximos (max) medidos diariamente na estufa agrícola.

A temperatura apresentou um incremento médio mensal de $0,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, subindo de $22,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, no início do experimento, para $25,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ no último mês. A média geral ficou em $23,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e o desvio padrão em $1,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 20). Analisando os resultados de outros

estudos com eucalipto, como, por exemplo, os do Projeto Brazil Eucalyptus Potential Productivity (BEPP), essa faixa de temperatura (22 a 26 °C) é bem comum na maioria dos projetos e experimentos florestais localizados no Brasil, especificamente nos Estados da Bahia, Minas Gerais, São Paulo, Espírito Santo (Stape et al., 2010) e Mato Grosso do Sul (Oliveira et al., 2013).

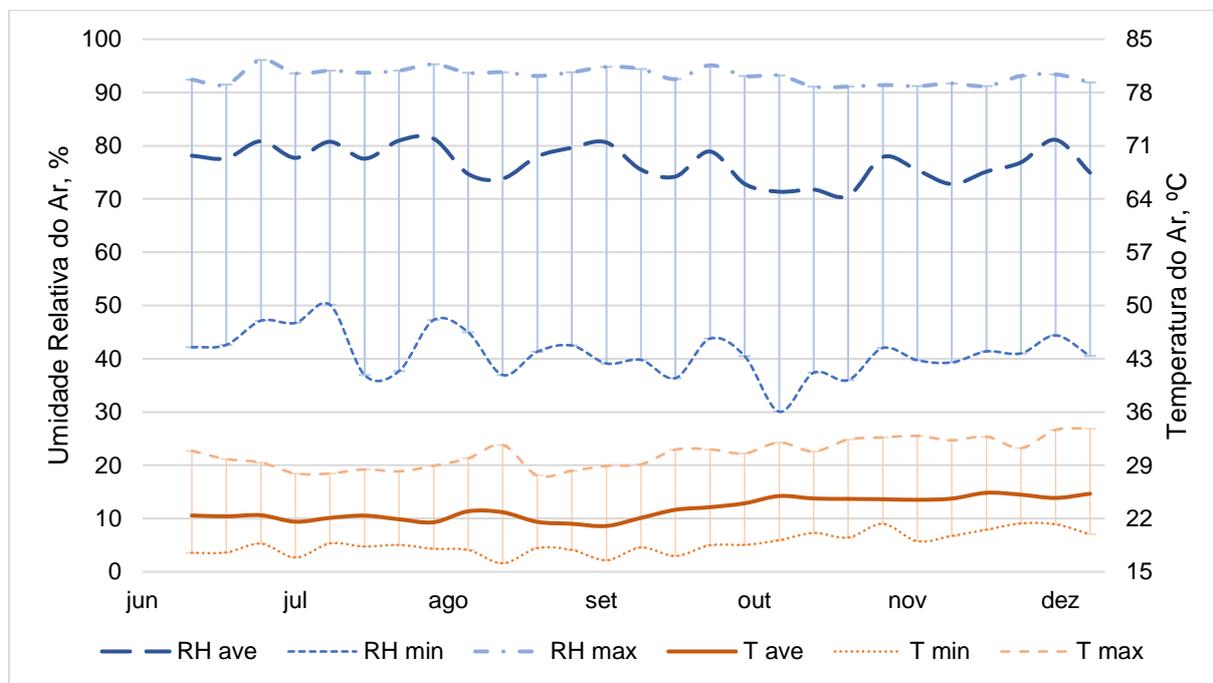


Figura 20. Umidade Relativa do Ar (UR, eixo primário) e Temperatura (T, eixo secundário) em valores semanais mínimos (min), médios (med) e máximos (max) medidos diariamente na estufa agrícola.

As mínimas e máximas tiveram o mesmo comportamento, com aumento considerável até o final do experimento, no início apresentavam 17,5 °C e 30,9 °C e no último mês atingiram os valores de 19,9 °C e 33,8 °C, respectivamente.

As médias mensais de umidade relativa do ar tiveram comportamento semelhante, entretanto, os valores mais baixos ocorreram no quinto mês após o transplante, tanto para mínima, 30,1 %, como para a média, 70,6 %, com desvio padrão de 5 %. Para os valores máximos de umidade relativa diária, houve um decréscimo gradual, do início do experimento, quando apresentava o valor de 96,1 %, até o final, quando atingiu 91,9 % (Figura 20).

A variação de potencial matricial da água no solo, ao longo de uma semana, para as três faixas de ψ pré-estabelecidas, os dados foram obtidos calculando a média dos valores medidos com as sondas TDR instaladas nas profundidades de 0,1 e 0,3 m para a distância 0 m do emissor/caule da planta nos lisímetros de drenagem.

No lisímetro de lençol freático de carga constante, essa média foi obtida apenas das duas sondas instaladas no limite da zona saturada, pela elevação do lençol freático a 0,1 m da superfície.

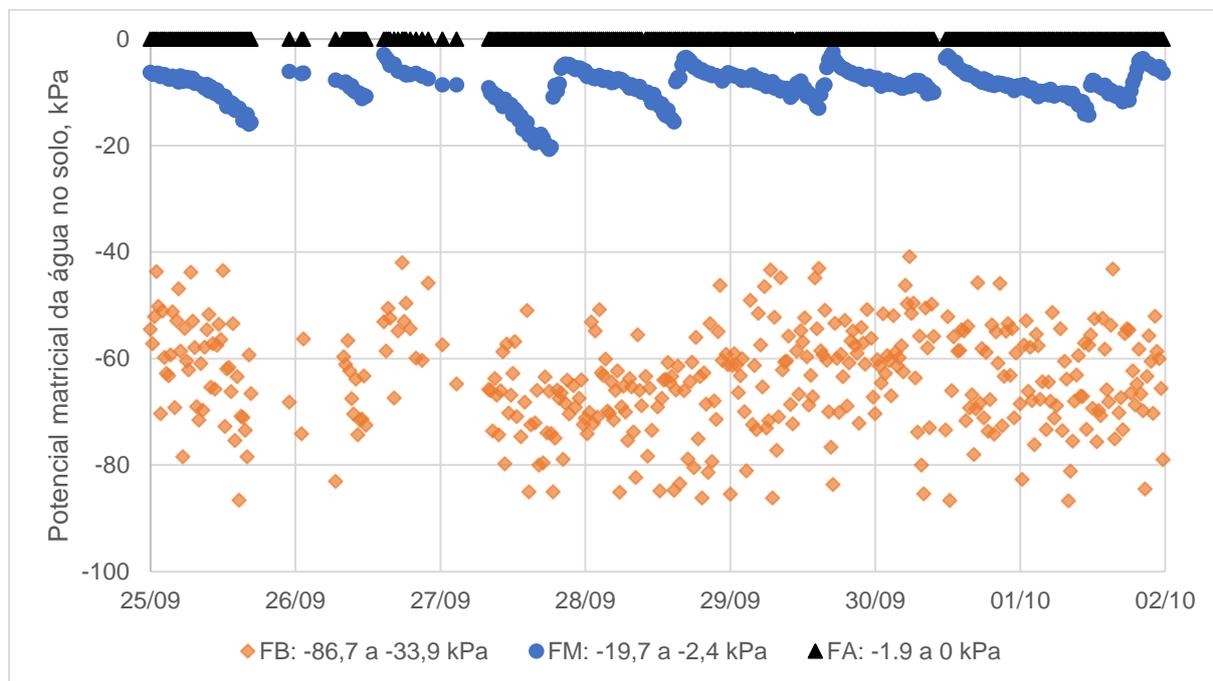


Figura 21. Potencial matricial da água no solo (ψ) medida ao longo de uma semana nas condições estabelecidas para o experimento.

FB: faixa *baixa* de ψ ; FM: faixa *média* de ψ ; FA: faixa *alta* de ψ .

A análise descritiva dos dados de variação do ψ (Tabela 5) permitiu afirmar que o tratamento na faixa *baixa* apresentou a média de -60,4 kPa, um coeficiente de variação de 16,0 %, valor mínimo de -86,7 kPa e máximo de -33,9 kPa. Já os dados do tratamento na faixa *média*, resultaram em uma média de -10,2 kPa de ψ , apresentando o coeficiente de variação de 32,6 %, valor mínimo de -19,7 kPa e máximo de -2,4 kPa. Para as condições do tratamento na faixa *alta*, a média foi de -0,2 kPa, com desvio padrão de 0,3 kPa, mínima de -1,9 e máxima de 0 kPa.

O objetivo com as diferentes faixas de ψ foi de criar cenários de baixo, médio e alto conteúdo de água armazenado no solo (Tabela 5), monitorados durante todo o experimento, bem como apresentar uma lâmina média armazenada no perfil de 0,4 m de profundidade do solo explorado pelas raízes do eucalipto.

Tabela 5. Resumo estatístico dos dados do monitoramento do potencial matricial da água no solo (ψ), do conteúdo de água no solo (θ) e do armazenamento no perfil, caracterizando os tratamentos.

Faixa de ψ	Estatística	ψ , kPa	θ (ψ), $m^3 m^{-3}$	Lâmina de água armazenada no perfil, mm
<i>Baixa</i>	Mínimo	-86,7	0,0817	32,7
	Máximo	-33,9	0,1189	47,6
	Média	-60,4	0,0939	37,6
<i>Média</i>	Mínimo	-19,7	0,1499	60,0
	Máximo	-2,4	0,3478	139,1
	Média	-10,2	0,1995	79,8
<i>Alta*</i>	Mínimo	-1,9	0,3710	148,4
	Máximo	-0,0	0,4720	188,8
	Média	-0,2	0,4666	188,6

* Para o cálculo nesse tratamento, foi utilizado o θ armazenado na camada de 0,1 m da zona não saturada, somado ao armazenamento dos outros 0,3 m da zona saturada do lisímetro.

Altura da planta e diâmetro do caule

A análise de variância demonstrou que não houve interação significativa entre os fatores clone e potencial matricial da água no solo, em nenhum dos dias após o transplante para a altura da planta.

Observou-se que aos 98 DAT havia uma superioridade para o clone GU3, entretanto, após essa idade, não foram observadas diferenças significativas entre os clones até o final do experimento (Tabela 6).

Tabela 6. Altura da planta (cm) dos clones de eucalipto submetidos às faixas de potencial matricial da água no solo (ψ) para todas as medições do experimento.

DAT	Faixa de ψ	UP1	UP2	GU3	GU4	Média
----- Altura total, cm -----						
6	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	32,6	37,4	37,1	39,2	36,6 ^{ns}
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	34,7	36,2	36,5	37,6	36,2 ^{ns}
	Alta: -1,9 a 0 kPa	33,4	38,2	38,0	38,5	37,0 ^{ns}
	Média *	33,6 b	37,3 a	37,2 a	38,4 a	36,6
20	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	42,1	48,8	47,1	48,4	46,6 ^{ns}
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	45,6	47,0	43,7	46,9	45,8 ^{ns}
	Alta: -1,9 a 0 kPa	40,9	50,5	47,5	48,2	46,8 ^{ns}
	Média *	42,9 b	48,7 a	46,1 a	47,8 a	46,4
32	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	55,7	70,2	61,7	60,6	62,0 ^{ns}
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	56,6	65,4	60,4	58,4	60,2 ^{ns}
	Alta: -1,9 a 0 kPa	54,0	66,5	61,3	60,4	60,6 ^{ns}
	Média *	55,4 c	67,4 a	61,1 b	59,8 b	60,9
47	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	74,0	100,3	88,9	80,6	85,9 ^{ns}
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	77,4	96,9	83,0	78,3	83,9 ^{ns}
	Alta: -1,9 a 0 kPa	76,6	93,0	87,0	78,6	83,8 ^{ns}
	Média *	76,0 c	96,7 a	86,3 b	79,1 c	84,5
67	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	114,0	146,5	140,6	107,7	127,2 ^{ns}
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	125,1	140,0	129,9	117,6	128,1 ^{ns}
	Alta: -1,9 a 0 kPa	126,0	133,4	144,8	117,5	130,5 ^{ns}
	Média *	121,7 b	140,0 a	138,4 a	114,3 b	128,6
84	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	135,4	159,7	169,1	127,0	147,8 ^{ns}
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	161,7	159,0	169,3	158,0	162,0 ^{ns}
	Alta: -1,9 a 0 kPa	161,0	145,0	176,3	153,7	159,0 ^{ns}
	Média *	152,7 b	154,6 b	171,6 a	146,2 b	156,3
98	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	138,2	167,6	170,9	128,9	151,4 B
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	191,8	178,0	199,0	177,4	186,6 A
	Alta: -1,9 a 0 kPa	198,6	167,7	206,7	191,6	191,2 A
	Média *	176,2 b	171,1 b	192,2 a	166,0 b	176,4
116	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	139,7	172,9	171,7	129,2	153,3 C
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	225,0	209,6	232,7	200,1	216,8 B
	Alta: -1,9 a 0 kPa	247,3	222,9	246,7	237,4	238,6 A
	Média ^{ns}	204,0	201,8	217,0	188,9	202,9
137	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	140,1	175,2	171,9	130,4	154,4 C
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	259,9	239,1	267,2	230,0	249,0 B
	Alta: -1,9 a 0 kPa	289,2	278,0	291,0	281,4	284,9 A
	Média ^{ns}	229,7	230,8	243,4	213,9	229,5
151	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	141,3	176,7	172,9	131,5	155,6 C
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	276,1	264,5	289,4	251,6	270,4 B
	Alta: -1,9 a 0 kPa	315,8	313,6	319,8	310,7	315,0 A
	Média ^{ns}	244,4	251,6	260,7	231,3	247,0
166	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	142,8	177,4	174,3	132,6	156,8 C
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	299,4	292,0	314,4	273,7	294,9 B
	Alta: -1,9 a 0 kPa	346,2	355,6	344,9	334,8	345,4 A
	Média ^{ns}	262,8	275,0	277,8	247,0	265,7
187	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	143,3	178,0	174,5	133,2	157,3 C
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	333,6	324,4	338,2	305,1	325,3 B
	Alta: -1,9 a 0 kPa	393,0	392,6	389,0	385,6	390,1 A
	Média ^{ns}	290,0	298,3	300,6	274,6	290,9
203	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	144,0	178,6	174,9	133,5	157,8 C
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	356,9	346,2	364,8	328,7	349,1 B
	Alta: -1,9 a 0 kPa	419,5	428,3	406,9	411,5	416,6 A
	Média ^{ns}	306,8	317,7	315,5	291,2	307,8
227	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	148,8	180,8	176,7	135,7	160,5 C
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	379,0	370,0	376,7	346,3	368,0 B
	Alta: -1,9 a 0 kPa	440,7	447,0	425,7	423,4	434,2 A
	Média ^{ns}	322,8	332,6	326,4	301,8	320,9

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5 % de significância, maiúscula para coluna (faixa de ψ) e minúscula para linha (clone). ^{ns} Não significativo. DAT: Dias após transplante.

Considerando o ψ , a diferenciação dos tratamentos iniciou-se nessa mesma idade, lembrando que o início da aplicação dos tratamentos para esse fator ocorreu pouco antes dos 98 DAT. Em todas as avaliações subsequentes as plantas foram maiores na faixa *alta* (-1,9 a 0 kPa), seguidas da *média* (-19,7 a -2,4 kPa) e *baixa* (-86,7 a -33,9 kPa) faixas de ψ .

Ao final do experimento (227 DAT), a média da altura total das árvores cultivadas em lisímetro de lençol freático (faixa *alta*: -1,9 a 0 kPa) foi maior em 270 % em relação às cultivadas com o manejo na faixa de ψ *baixa* (-86,7 a -33,9 kPa), e em 118 % com as plantas manejadas na faixa *média* de potencial matricial (-19,7 a -2,4 kPa). Entre as árvores dos tratamentos irrigados, essa diferença foi de 229 % (Tabela 6).

Em experimento conduzido em campo no Mato Grosso do Sul, Oliveira et al. (2013) encontraram uma diferença máxima de 127 % na altura de clones híbridos de eucalipto quando compararam tratamentos irrigados com sequeiro aos 150 DAT, nesse mesmo experimento, os autores demonstraram que as árvores dos tratamentos irrigados obtiveram alturas maiores em até 159 % em relação às de sequeiro aos 510 DAT (Jung et al., 2017). Esses resultados demonstraram que o elevado conteúdo de água no solo promove rápido crescimento em altura do eucalipto.

Analisando-se a hipótese de haver distinção entre os valores de diâmetro do caule (mm) dos clones avaliados (Tabela 7), verificou-se que o GU4 apresentou os menores valores. Essa distinção foi mais evidente após os 98 DAT, quando o GU4 se diferenciou dos demais clones que formaram outro agrupamento no teste de comparação. No dia do corte (227 DAT), as árvores do clone GU4 tiveram um diâmetro do caule médio de 39,58 mm, 17 % inferior à média do UP1, que teve o maior crescimento, com 47,62 mm, esses resultados demonstraram o baixo potencial produtivo para o clone GU4 em todas as condições estabelecidas nesse experimento.

Tabela 7. Diâmetro do caule (mm) dos clones de eucalipto submetidos às faixas de potencial matricial da água no solo (ψ) para todas as medições do experimento.

DAT	Faixa de ψ	UP1	UP2	GU3	GU4	Média
----- Diâmetro do caule, mm -----						
6	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	3,39	3,59	3,64	3,06	3,42 ^{ns}
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	3,53	3,85	3,25	3,15	3,45 ^{ns}
	Alta: -1,9 a 0 kPa	3,32	3,68	3,50	2,95	3,36 ^{ns}
	Média *	3,41 a	3,71 a	3,46 a	3,05 b	3,41
20	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	4,51	5,34	4,88	4,36	4,77 ^{ns}
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	4,52	5,41	4,47	4,28	4,67 ^{ns}
	Alta: -1,9 a 0 kPa	4,51	5,35	5,03	4,44	4,83 ^{ns}
	Média *	4,51 c	5,36 a	4,79 b	4,36 c	4,76
32	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	5,88	7,28	6,36	5,77	6,32 ^{ns}
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	6,17	7,45	5,81	6,08	6,38 ^{ns}
	Alta: -1,9 a 0 kPa	6,12	6,77	6,25	6,04	6,29 ^{ns}
	Média *	6,06 b	7,17 a	6,14 b	5,96 b	6,33
47	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	9,93	11,93	10,35	10,04	10,56 ^{ns}
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	10,19	11,99	8,94	9,99	10,28 ^{ns}
	Alta: -1,9 a 0 kPa	10,50	10,75	9,03	9,86	10,03 ^{ns}
	Média *	10,20 b	11,56 a	9,44 b	9,97 b	10,29
67	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	14,50	17,25	16,40	14,67	15,71 ^{ns}
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	16,49	16,97	14,96	15,15	15,89 ^{ns}
	Alta: -1,9 a 0 kPa	18,11	15,49	14,90	15,31	15,95 ^{ns}
	Média ^{ns}	16,37	16,57	15,42	15,04	15,85
84	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	18,72	19,83	20,53	16,90	18,99 ^{ns}
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	21,91	20,99	21,14	19,89	20,98 ^{ns}
	Alta: -1,9 a 0 kPa	22,20	17,81	19,96	19,13	19,78 ^{ns}
	Média ^{ns}	20,94	19,54	20,54	18,64	19,92
98	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	20,03	22,28	20,95	17,77	20,26 B
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	26,61	24,07	25,68	22,84	24,80 A
	Alta: -1,9 a 0 kPa	28,24	22,83	26,03	24,69	25,45 A
	Média *	24,96 a	23,06 b	24,22 a	21,77 b	23,50
116	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	20,78	23,62	22,41	18,54	21,34 C
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	31,41	29,40	31,41	27,34	29,89 B
	Alta: -1,9 a 0 kPa	35,37	30,47	33,43	31,00	32,57 A
	Média *	29,19 a	27,83 a	29,09 a	25,63 b	27,93
137	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	22,01	24,20	24,57	19,80	22,64 C
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	36,01	33,45	36,15	31,50	34,28 B
	Alta: -1,9 a 0 kPa	42,74	37,33	40,56	37,54	39,54 A
	Média *	33,59 a	31,66 b	33,76 a	29,61 b	32,15
151	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	23,07	24,91	25,20	20,56	23,44 C
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	38,25	35,80	38,84	33,34	36,56 B
	Alta: -1,9 a 0 kPa	48,04	42,04	44,85	41,17	44,03 A
	Média *	36,46 a	34,25 a	36,30 a	31,69 b	34,67
166	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	23,61	25,84	25,47	20,65	23,89 C
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	39,34	38,08	41,05	34,82	38,32 B
	Alta: -1,9 a 0 kPa	52,60	46,31	48,77	44,31	48,00 A
	Média *	38,52 a	36,75 a	38,43 a	33,26 b	36,74
187	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	24,73	26,49	26,70	21,80	24,93 C
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	43,00	41,18	43,99	37,64	41,45 B
	Alta: -1,9 a 0 kPa	58,59	53,15	54,18	47,92	53,46 A
	Média *	42,11 a	40,27 a	41,62 a	35,79 b	39,95
203	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	25,25	26,65	27,05	22,39	25,34 C
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	45,61	43,44	46,15	39,37	43,64 B
	Alta: -1,9 a 0 kPa	62,03	56,64	56,49	49,93	56,27 A
	Média *	44,30 a	42,24 a	43,23 a	37,23 b	41,75
227	Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	26,59	27,90	28,66	22,94	26,52 C
	Média: -19,7 a -2,4 kPa	49,20	45,57	48,91	41,44	46,28 B
	Alta: -1,9 a 0 kPa	67,06	61,46	61,50	54,36	61,09 A
	Média *	47,62 a	44,98 a	46,35 a	39,58 b	44,63

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5 % de significância, maiúscula para coluna (faixa de ψ) e minúscula para linha (clone).^{ns} Não significativo. DAT: Dias após transplante.

Considerando especificamente os efeitos do fator ψ , a comparação das médias do diâmetro do caule demonstrou resultado semelhante ao encontrado para a altura da planta, a condição em que o solo foi mantido com o lençol freático elevado a 0,1 m da superfície (faixa *alta*: -1,9 a 0 kPa) propiciou às plantas se tornarem 230 % maiores que as cultivadas em solo mantido em média no potencial matricial mais baixo (-60,2 kPa) e 132 % maiores que aquelas cultivadas em solo mantido no potencial médio intermediário (-10,4 kPa). Entre os dois últimos tratamentos citados o de maior ψ foi superior em 175 % para o diâmetro do caule.

Portanto, a faixa de potencial matricial da água no solo, a ser utilizada como critério no manejo da irrigação, irá influenciar no crescimento do eucalipto. Observou-se que o tratamento de lençol freático de carga constante, que manteve o potencial mais alto, sempre próximo a 0 kPa na profundidade de 0,1 m, conduziu o maior desenvolvimento das árvores para as variáveis analisadas, demonstrando que a irrigação por gotejamento, visando manter o potencial próximo a -10 kPa (faixa *média* de ψ : -19,7 a -2,4 kPa), não foi suficiente para extrair o máximo potencial de crescimento da cultura.

A condição de baixo potencial matricial de água no solo (faixa de -86,7 a -33,9 kPa) pode ser caracterizada neste experimento como uma condição de estresse hídrico, por conta de manter o conteúdo de água no solo sempre muito abaixo daquele que seria facilmente disponível à absorção pelas raízes do eucalipto. Nessa faixa houve considerável redução do crescimento em altura total e diâmetro do caule, com perdas superiores a 43 % em relação ao tratamento que manteve o solo na condição de maior conteúdo de água no solo.

Diversos autores relatam o incremento de variáveis de crescimento do eucalipto em sistemas irrigados, em diferentes momentos do ciclo produtivo (Pereira et al., 2019; Stape et al., 2010; Minhas et al., 2015). No experimento do Mato Grosso do Sul, foram encontrados 127 % e 147 % de superioridade do tratamento irrigado em relação ao de sequeiro, para 150 e 510 DAT, respectivamente (Oliveira et al., 2013; Jung et al., 2017).

A fase inicial de crescimento é a mais importante para o estabelecimento da cultura do eucalipto no campo, havendo maior dependência da água, principalmente nas camadas mais superficiais do solo, sendo o desenvolvimento afetado

negativamente pela baixa disponibilidade de água no solo (Bernardino et al., 2019), conforme demonstrado nesse experimento.

De acordo com as curvas de crescimento das plantas cultivadas em solo mantido com diferentes faixas de ψ (Figura 22) ficou claro o impacto da aplicação da faixa *baixa* de ψ (-86,7 a -33,9 kPa) na redução do crescimento, demonstrada pela mudança brusca da inclinação da curva após os 84 DAT, bem como a superioridade da condição de água no solo estabelecida pelo lençol freático de carga constante (faixa *alta* de ψ : -1,9 a 0 kPa) em relação aos tratamentos irrigados, com maior inclinação das curvas, diferenciando-se logo após o início da aplicação das faixas de ψ , tanto para a altura total, como para o diâmetro do caule das árvores.

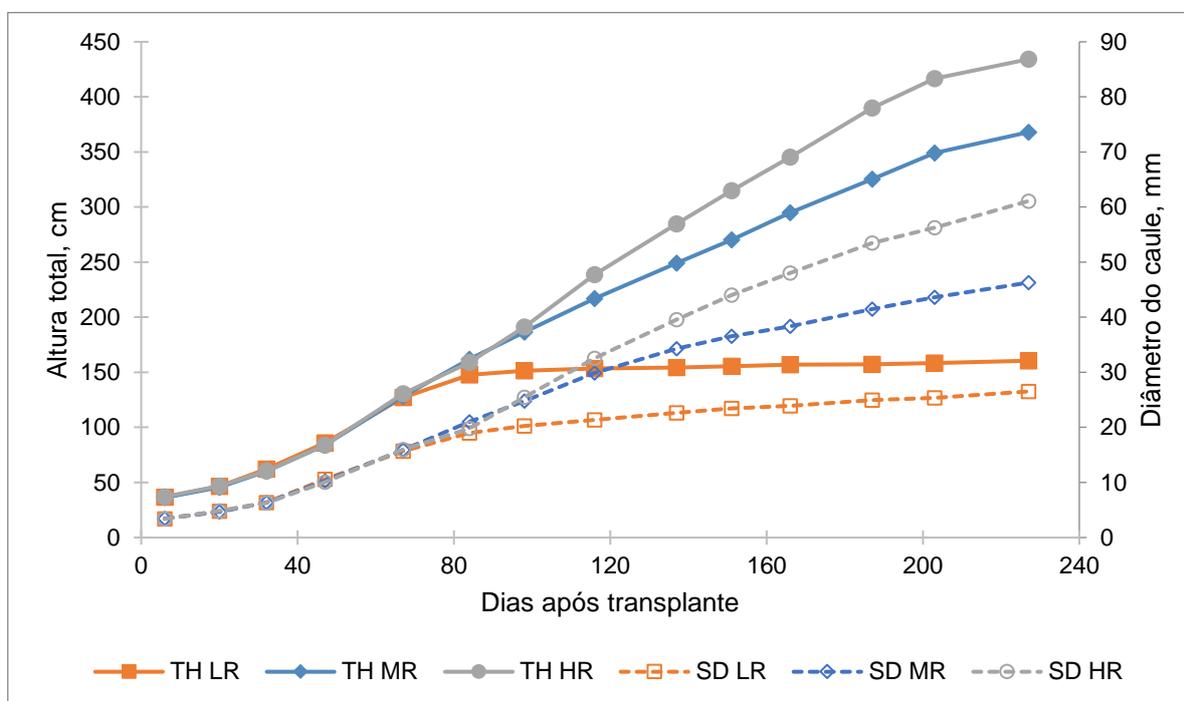


Figura 22. Curvas de crescimento da altura total (AT, eixo primário) e diâmetro do caule (DC, eixo secundário) das árvores submetidas às faixas de potencial matricial da água no solo (ψ). FB: Faixa *baixa* de ψ (-86,7 a -33,9 kPa); FM: faixa *média* de ψ (-19,7 a -2,4 kPa); FA: faixa *alta* de ψ (-1,9 a 0 kPa).

Nas plantas submetidas à faixa *baixa* de ψ (-86,7 a -33,9 kPa), observou-se que o crescimento em altura total praticamente estagnou, no entanto, obtiveram um crescimento linear em diâmetro do caule, conforme demonstrada pela inclinação das curvas, a partir dos 84 DAT (Figura 22).

Biomassa compartimentalizada da parte aérea

Na análise de biomassa fresca e seca do fuste não houve interação significativa entre os fatores clone e faixa de ψ (Tabela 8). Os clones UP1 e UP2 foram superiores aos demais, considerando a média de todas as árvores submetidas às diferentes faixas de ψ , tanto para biomassa fresca do fuste, quanto para a seca, demonstrando superioridade dos clones de *E. urophylla* em relação aos híbridos *E. grandis* x *E. urophylla* testados, corroborando com o relatado por Assis et al. (2015) e Gonçalves et al. (2013), os quais afirmam que algumas procedências de *E. urophylla* podem apresentar tolerância intermediária à seca.

Tabela 8. Biomassa fresca e seca (g) da parte aérea compartimentalizada dos clones de eucalipto submetidos às faixas de potencial matricial da água no solo (ψ).

Faixa de Ψ	UP1	UP2	GU3	GU4	Média
----- Biomassa fresca do fuste, g planta ⁻¹ -----					
Baixa: -86,7 a -33,9 kPa ^{ns}	435	443	438	273	398 C
Média: -19,7 a -2,4 kPa ^{ns}	2587	2105	2147	1930	2192 B
Alta: -1,9 a 0 kPa ^{ns}	4867	4342	3723	3140	4018 A
Média *	2629 a	2297 a	2103 b	1781 b	2203
----- Biomassa seca do fuste, g planta ⁻¹ -----					
Baixa: -86,7 a -33,9 kPa ^{ns}	185	198	191	120	173 C
Média: -19,7 a -2,4 kPa ^{ns}	932	811	749	747	810 B
Alta: -1,9 a 0 kPa ^{ns}	1761	1596	1219	1246	1456 A
Média *	959 a	868 a	720 b	704 b	813
----- Biomassa fresca de galhos, g planta ⁻¹ -----					
Baixa: -86,7 a -33,9 kPa ^{ns}	323 C	558 C	385 C	297 C	391
Média: -19,7 a -2,4 kPa ^{ns}	1053 B	1212 B	1125 B	1438 B	1207
Alta: -1,9 a 0 kPa *	1598 Ab	1905 Ab	1600 Ab	2340 Aa	1861
Média ^{ns}	992	1225	1037	1358	1153
----- Biomassa seca de galhos, g planta ⁻¹ -----					
Baixa: -86,7 a -33,9 kPa ^{ns}	146 C	263 C	179 C	136 C	181
Média: -19,7 a -2,4 kPa ^{ns}	474 B	556 B	516 B	673 B	555
Alta: -1,9 a 0 kPa *	737 Ab	847 Ab	690 Ab	1051 Aa	831
Média ^{ns}	452	555	462	620	522
----- Biomassa fresca de folhas, g planta ⁻¹ -----					
Baixa: -86,7 a -33,9 kPa ^{ns}	918	488	737	492	659 C
Média: -19,7 a -2,4 kPa ^{ns}	2557	2878	2830	2932	2799 B
Alta: -1,9 a 0 kPa ^{ns}	3150	4192	3677	2958	3494 A
Média ^{ns}	2208	2519	2414	2127	2317
----- Biomassa seca de folhas, g planta ⁻¹ -----					
Baixa: -86,7 a -33,9 kPa ^{ns}	401	223	322	208	289 C
Média: -19,7 a -2,4 kPa ^{ns}	1094	1257	1393	1172	1229 B
Alta: -1,9 a 0 kPa ^{ns}	1362	1876	1578	1203	1505 A
Média ^{ns}	952	1119	1098	861	1007

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5 % de significância, maiúscula para coluna (faixa de ψ) e minúscula para linha (clone).^{ns} Não significativo.

Assim como para as variáveis de crescimento, observou-se a inferioridade do clone GU4, que apresentou o menor desempenho, dessa vez, em conjunto com o GU3. Os resultados do clone GU4 foram inferiores em 32 % e 26 % em relação ao UP1 para biomassa fresca e seca do fuste, respectivamente.

Avaliando as faixas de potencial matricial da água no solo, o mesmo comportamento observado para os dados de crescimento se repetiu, com resultados mais expressivos, a faixa *alta* (-1,9 a 0 kPa) promoveu um aumento nos valores encontrados de biomassa do fuste em mais de 75 % em relação a faixa *média* de ψ (-19,7 a -2,4 kPa). Quando relacionado com a faixa *baixa* (-86,7 a -33,9 kPa), a condição estabelecida pelo lençol freático de carga constante resultou em valores de biomassa do fuste superiores em cerca de 10 vezes para a fresca e de 8,4 vezes para a seca.

Ressalta-se aqui essa grande diferença na produção encontrada na condição de lençol freático estabelecida em relação à condição irrigada na faixa *média* de ψ , que tinha o objetivo de manter a disponibilidade de água em uma faixa facilmente disponível à planta. Como o aumento da produção foi significativo, isso demonstra, mais uma vez, que somente a irrigação por gotejamento foi insuficiente para os clones expressarem o máximo potencial para a produção de biomassa do fuste, nas condições do experimento e durante a fase de crescimento do eucalipto estudada.

Os resultados resumidos dos três componentes da biomassa da parte aérea dos clones de eucalipto medidos ao final do experimento em valores absolutos (Tabela 8) e relativos, demonstraram maior produção de biomassa seca do fuste ($BSFu$) do clone UP1, em relação aos demais (Figura 23).

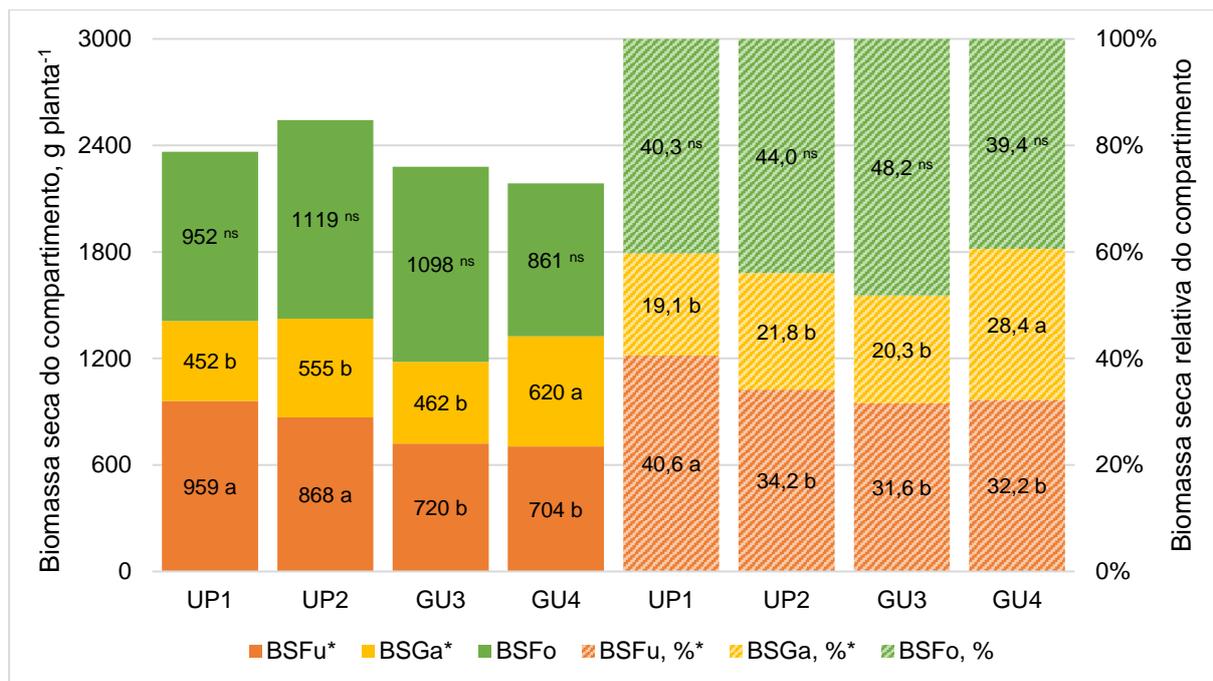


Figura 23. Biomassa seca dos compartimentos da parte aérea dos clones de eucalipto, em valores absolutos (eixo primário) e relativos (eixo secundário).

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5 % de significância. ns Não significativo. *BSFu*: biomassa seca do fuste; *BSGa*: biomassa seca de galhos; *BSFo*: biomassa seca de folhas.

Foram observados maiores valores proporcionais de biomassa seca de galhos (*BSGa*) no clone GU4, demonstrando que a alocação de matéria seca foi deslocada para esse compartimento, na Tabela 8 é apresentado que, na condição da faixa *alta* de ψ foi observada diferença significativa para *BSGa*, e as árvores do clone GU4 foram as que tiveram maior produção desse compartimento, chegando a mais de 1000 g planta⁻¹, enquanto a média dos demais clones corresponde a aproximadamente 760 g planta⁻¹.

Já o clone GU3 produziu mais biomassa seca de folhas proporcionalmente aos demais compartimentos, entretanto, não diferiu estatisticamente. Oliveira Neto et al. (2003) relataram que a proporção de biomassa acumulada na madeira (fuste) aumentou em razão da redução do acúmulo nos outros componentes, como nas folhas, outros estudos demonstraram resultados semelhantes (Saravanan, 2019; Mello & Gonçalves, 2008; Hunter, 2001).

Os resultados encontrados nesse experimento corroboram com o relatado pelos autores acima citados, tendo em vista que os coeficientes angulares da reta das regressões da *BSFu* em função de *BSGa* e *BSFo* são inferiores a 1, sendo que essa

teoria torna-se ainda mais consolidada para o compartimento dos galhos, em que a inclinação da curva foi de 0,4534 (Figura 24).

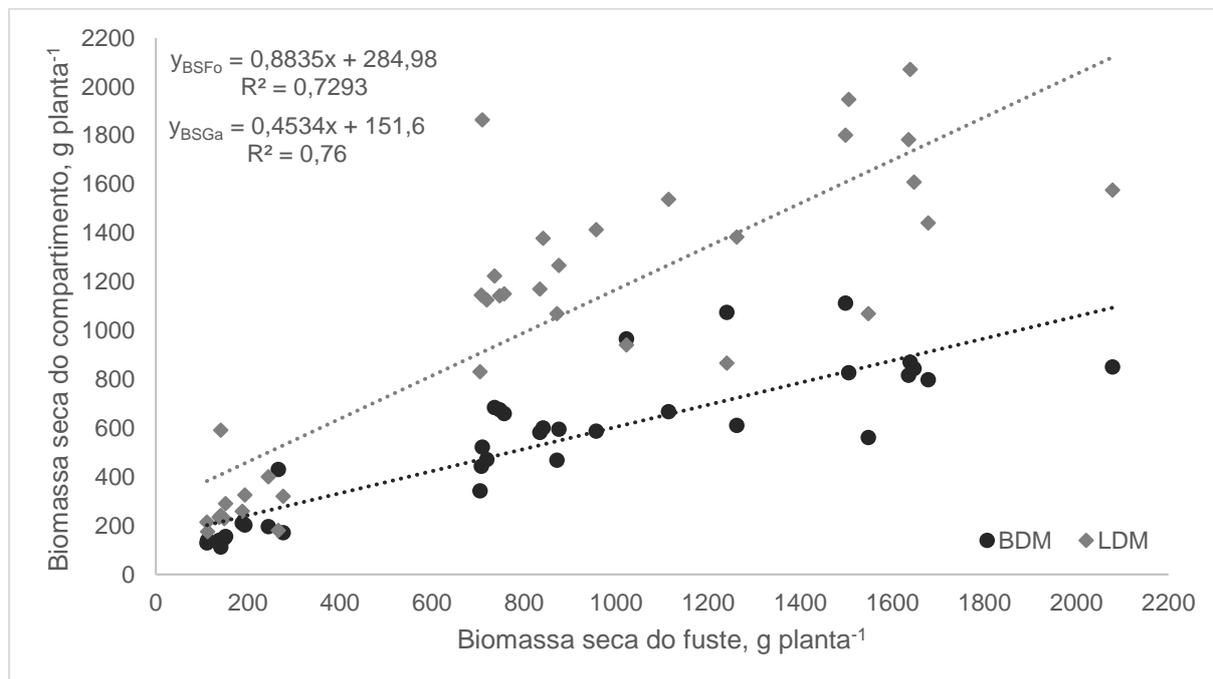


Figura 24. Correlação entre os compartimentos de biomassa seca das árvores do experimento. *BSGa*: biomassa seca de galhos; *BSFo*: biomassa seca de folhas.

Quando avaliamos as árvores em função das faixas de ψ em que foram submetidas, fica ainda mais evidente a proporcionalidade encontrada para a produção de *BSFu* em relação aos compartimentos de *BSGa* e *BSFo*. Houve diferença significativa entre as médias das condições estabelecidas, tanto para valores absolutos (Tabela 8), como para os relativos (Figura 25). Em todos os compartimentos da parte aérea do eucalipto, em valores absolutos, houve ganhos significativos da faixa *baixa* até a *alta* de ψ . Quanto aos dados relativos, na faixa *alta* a *BSFu* chegou a representar quase 40 % da biomassa aérea total, enquanto na faixa *baixa* de ψ não chegou a 28 %, nessa mesma condição observou-se maior proporção de *BSGa*, superando em pelo menos 6 % os demais.

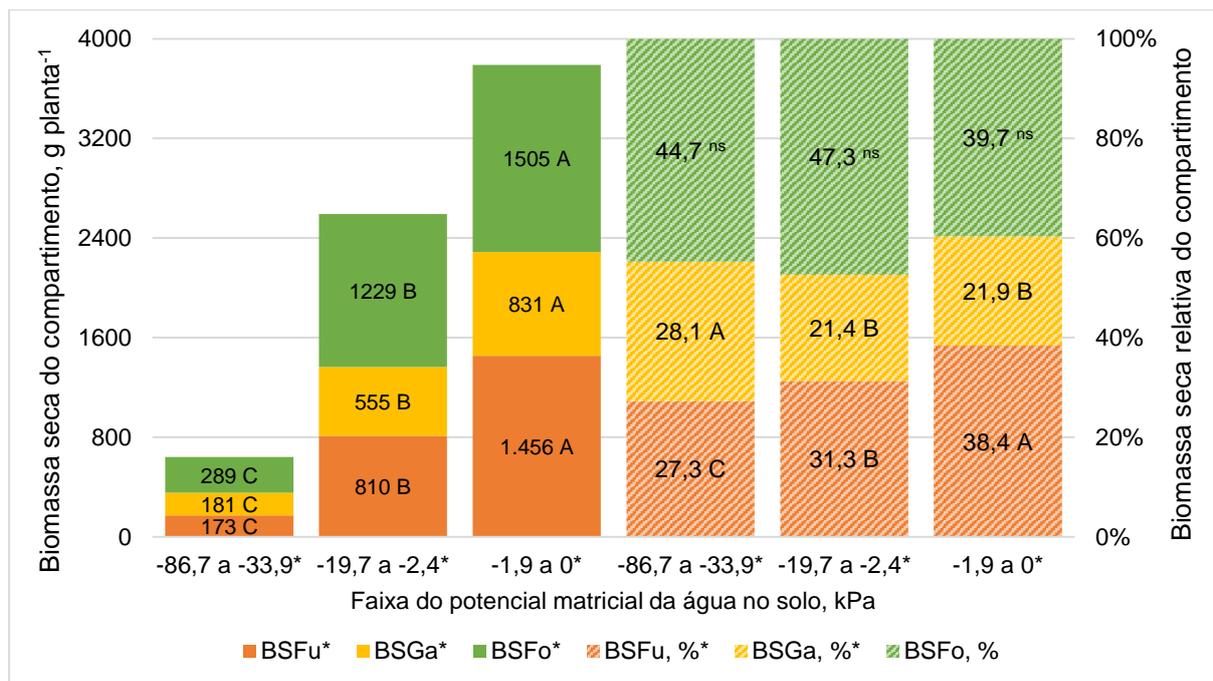


Figura 25. Biomassa seca da parte aérea compartimentalizada do eucalipto em função das faixas de potencial matricial da água no solo, em valores absolutos (eixo primário) e relativos (eixo secundário). * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5 % de significância. ^{ns} Não significativo. *BSFu*: biomassa seca do fuste; *BSGa*: biomassa seca dos galhos; *BSFo*: biomassa seca das folhas.

Diversos autores estudaram o eucalipto em condições irrigadas e todos eles demonstraram haver aumentos significativos de biomassa da parte aérea nessas condições, e, em alguns casos, uma resposta linear de acréscimo da produtividade em função da disponibilidade hídrica ou de lâminas de irrigação aplicadas (Lopes et al., 2022; Belchior et al., 2020; Alves et al., 2018; Queiroz et al., 2017; Minhas, 2015; Stape et al., 2010; Hunter, 2001).

Foi realizada uma análise de regressão linear dos dados de biomassa seca total em função dos valores médios encontrados de θ de cada uma das faixas de ψ estabelecidas no experimento (Tabela 5). O resultado foi significativo para os coeficientes do ajuste do modelo linear e indicaram correlação positiva do conteúdo de água no solo na produção total de biomassa do eucalipto (Figura 26).

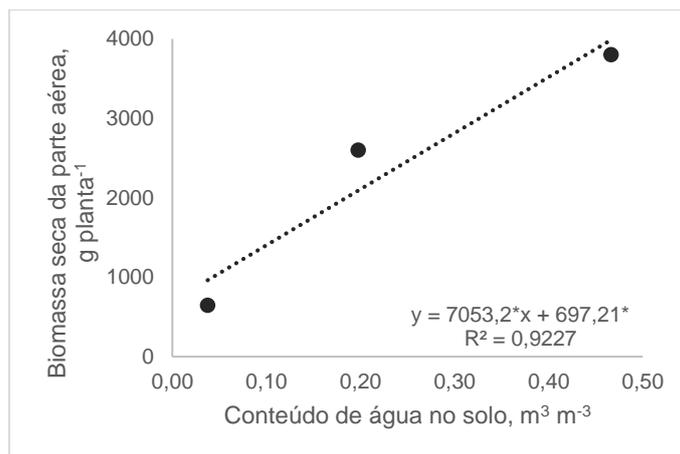


Figura 26. Regressão linear da biomassa seca da parte aérea do eucalipto em função do conteúdo de água no solo para o potencial matricial da água no solo *médio* das faixas monitoradas.

* Significativo ao nível de 5 %.

Área foliar e variáveis indicativas do status hídrico da planta

O resultado da análise estatística demonstrou que não houve diferença entre os clones para a área foliar total (AF), apesar de haver tendência de menores valores para o clone GU1, já o clone UP1 destacou-se na faixa *baixa* de ψ , apresentando valor médio de área foliar superior a 1 m² planta⁻¹ em relação aos demais, fato que indica superioridade e maior tolerância à condição de estresse hídrico estabelecida nessa faixa de ψ (Tabela 9).

Tabela 9. Área foliar total, relação biomassa seca do fuste e área foliar total, teor relativo de água na folha e potencial hídrico foliar dos clones submetidos às faixas de potencial matricial da água no solo (ψ).

Faixa de ψ	UP1	UP2	GU3	GU4	Média*
----- Área foliar total, m ² planta ⁻¹ -----					
Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	3,5106	2,0969	2,5589	2,1818	2,5871 B
Média: -19,7 a -2,4 kPa	9,4375	11,0603	11,7554	9,7847	10,5095 A
Alta: -1,9 a 0 kPa	10,1765	13,4807	11,9151	9,4846	11,2642 A
Média ^{ns}	7,7082	8,8793	8,7431	7,1504	8,1203
---- Relação biomassa seca do fuste x área foliar total, g m ⁻² ----					
Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	65,00	103,01	77,20	56,57	75,45 B
Média: -19,7 a -2,4 kPa	105,38	73,37	65,95	76,79	80,37 B
Alta: -1,9 a 0 kPa	175,72	120,59	103,39	134,91	133,65 A
Média ^{ns}	115,36	98,99	82,18	89,42	96,49
----- Teor relativo de água na folha, % -----					
Baixa: -86,7 a -33,9 kPa	82,05	77,37	80,02	75,75	78,76 B
Média: -19,7 a -2,4 kPa	82,79	80,49	79,61	79,37	80,98 A
Alta: -1,9 a 0 kPa	80,30	81,01	80,02	78,30	79,90 A
Média*	82,00 a	79,69 b	79,88 b	77,81 c	79,99
----- Potencial hídrico foliar, MPa -----					
Baixa: -86,7 a -33,9 kPa*	-1,14 aB	-1,39 bC	-1,30 bC	-1,40 bB	-1,31
Média: -19,7 a -2,4 kPa*	-0,54 aA	-0,79 bB	-0,71 bB	-0,75 bA	-0,70
Alta: -1,9 a 0 kPa ^{ns}	-0,60 A	-0,55 A	-0,60 A	-0,64 A	-0,60
Média*	-0,76	-0,91	-0,87	-0,93	-0,87

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5 % de significância, maiúscula para coluna (faixa de ψ) e minúscula para linha (clone). ^{ns} Não significativo.

O teste de agrupamento de médias considerando as faixas de ψ indicou redução significativa da *AF* na condição *baixa* em relação às demais. A análise de regressão para os dados, considerando o potencial matricial da água no solo médio de cada faixa (Tabela 5) obteve um modelo linear significativo (Figura 27).

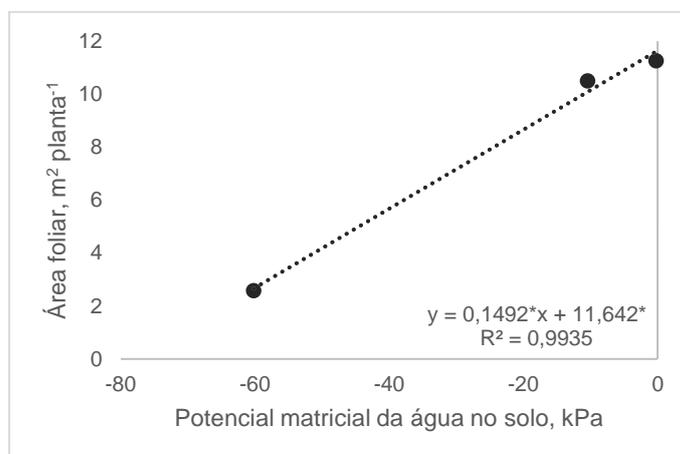


Figura 27. Regressão linear da área foliar em função do potencial matricial da água no solo médio das faixas monitoradas.

* Significativo ao nível de 5 %.

Resultado semelhante foi encontrado por Ngugi et al. (2003), houve redução significativa da área foliar aos 96 dias de cultivo em três clones, considerando os regimes hídricos de 100, 70 e 50% da capacidade de campo. Os resultados de Pita & Pardos (2001) corroboraram com o demonstrado neste experimento quando avaliaram a área foliar considerando três condições de conteúdo de água no solo, observaram aos 60 e aos 90 dias redução significativa quando as plantas foram submetidas a dois níveis de estresse hídrico, com conteúdo de água no solo inferior a $0,095 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, comparadas com as que foram mantidas em solo com conteúdo médio de água em torno de $0,3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Em experimento testando clones de *E. urophylla* e de *E. cloeziana* utilizando déficit hídrico progressivo em estufa agrícola, a área foliar foi significativamente inferior quando comparada com a do tratamento controle (Abreu et al., 2022).

Quando relacionada a biomassa seca do fuste com a *AF* (Tabela 9), não houve diferença significativa entre os clones, entretanto, o UP1 obteve o maior valor na média, indicando maior eficiência produtiva em função da área foliar. Comparando as faixas de ψ , a faixa alta indicou a maior conversão de *BSFu* em função da *AF*, o valor chegou a superar em 60 % na média os valores das outras faixas. Os resultados demonstraram que o θ elevado (faixa alta de ψ), mesmo em condições em que a área foliar foi semelhante (faixa média e alta de ψ), permitiu aos clones avaliados serem mais eficientes em produzir *BSFu*.

Para o *TRA*, o clone UP1 se destacou, apresentado maiores valores, corroborando com os resultados já apresentados anteriormente, da mesma forma que o clone GU4 foi inferior e apresentou a menor média do *TRA*, indicando mais uma limitação desse clone nas condições estabelecidas neste experimento.

A redução do ψ para a faixa baixa (-86,7 a -33,9 kPa) reduziu significativamente a média do *TRA*, entretanto, entre as outras duas faixas os resultados foram semelhantes (Tabela 9), indicando que as plantas se encontravam em estresse hídrico, corroborando com diversos trabalhos que avaliaram clones em condições semelhantes de déficit, quando comparados com os mantidos em irrigação “ideal” (Reis et al., 2021; Nóia Júnior et al., 2020; Santos et al., 2019).

Na análise do ψ_f , novamente, o clone UP1 foi superior, outra variável que analisa o status hídrico da planta, nas faixas de ψ irrigadas (baixa e média) o maior

potencial hídrico na folha foi observado nesse clone (Tabela 9), entretanto, no tratamento de lençol freático (faixa alta de ψ) não houve diferença estatística entre os clones.

Na faixa de ψ mais baixa (-86,7 a -33,9 kPa), as árvores de todos os clones apresentaram o menor ψ_f , indicando mais uma vez a influência negativa do déficit hídrico sobre o status hídrico do eucalipto. Em análise semelhante, com três condições de água no solo, Santos et al. (2020) observaram redução no potencial hídrico foliar em função do aumento do déficit hídrico em dois clones, cultivados durante 120 dias para aclimação e avaliados após 50 dias de estresse hídrico. Em outro estudo, os autores Nóia Júnior et al. (2020) relataram que houve decréscimo no potencial osmótico no estado de turgor de um clone de *E. argophloia* e dois de *E. cloeziana* em resposta ao estresse hídrico severo, com valores inferiores a -1,5 MPa. Em 10 clones testados, Reis et al. (2021) demonstraram haver queda significativa no potencial hídrico antes do amanhecer, quando submetidos ao déficit hídrico.

Produtividade da água

A evapotranspiração em litros por planta em cada tratamento foi quantificada, conforme descrito na metodologia, na faixa *baixa* de ψ (-86,7 a -33,9 kPa) a evapotranspiração foi de 321,55 litros, na faixa *média* (-19,7 a -2,4 kPa) foi de 1385,86 litros, já na faixa *alta* (-1,9 a 0 kPa) foram evapotranspirados 1318,52 litros por planta. Com base nesses valores, foram obtidos os dados de produtividade da água (PA) para a biomassa seca do fuste (Tabela 10).

Tabela 10. Produtividade da água para a biomassa seca do fuste dos clones submetidos às faixas de potencial matricial da água no solo (ψ).

Faixa de ψ	UP1	UP2	GU3	GU4	Média*
-- Produtividade da água para biomassa seca do fuste, g L⁻¹ --					
<i>Baixa</i> : -86,7 a -33,9 kPa	0,59	0,63	0,60	0,37	0,55 B
<i>Média</i> : -19,7 a -2,4 kPa	0,68	0,59	0,54	0,54	0,59 B
<i>Alta</i> : -1,9 a 0 kPa	1,34	1,21	0,94	0,95	1,11 A
Média*	0,87 a	0,81 a	0,69 b	0,62 b	0,75

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5 % de significância, maiúscula para coluna (faixa de ψ) e minúscula para linha (clone). ^{ns} Não significativo.

Os clones UP1 e UP2 obtiveram valores significativamente maiores que os demais, com aumento da PA acima de 0,11 g L⁻¹. Portanto, a procedência dos clones nesse experimento, tem demonstrado ser um importante fator na avaliação, indicando que o *E. urophylla* superou o híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* em quase todas as

variáveis analisadas. O trabalho de Hubbard et al. (2020) indicou haver superioridade do clone de *E. urophylla* quando comparado com o híbrido *E. grandis* x *E. camaldulensis*, principalmente em locais de déficit hídrico, para variáveis relacionadas ao uso da água, como por exemplo, a transpiração e a eficiência do uso da água.

Levando em consideração as faixas de potencial matricial da água no solo, houve um ganho de produtividade da água altamente significativo na condição da elevação do lençol freático a 0,1 m, apresentando um aumento da PA em cerca de duas vezes em relação às outras faixas de ψ (*baixa* e *média*).

Cabe destacar que não houve diferença significativa entre os tratamentos irrigados (faixas *baixa* e *média* de ψ), provavelmente, isso se deu pelo fato do tempo em que as plantas ficaram em aclimação, recebendo a mesma quantidade de água. O volume acumulado de água aplicado já era significativo quando os tratamentos tiveram início (72 DAT) e não foi possível separar o acúmulo de biomassa após essa idade. Ainda assim, observa-se uma PA ligeiramente superior na faixa *média* de ψ (-19,7 a -2,4 kPa). Quando realizada a análise de regressão da PA com base na média da lâmina de água armazenada no perfil (Tabela 5), obteve-se um modelo linear significativo (Figura 28).

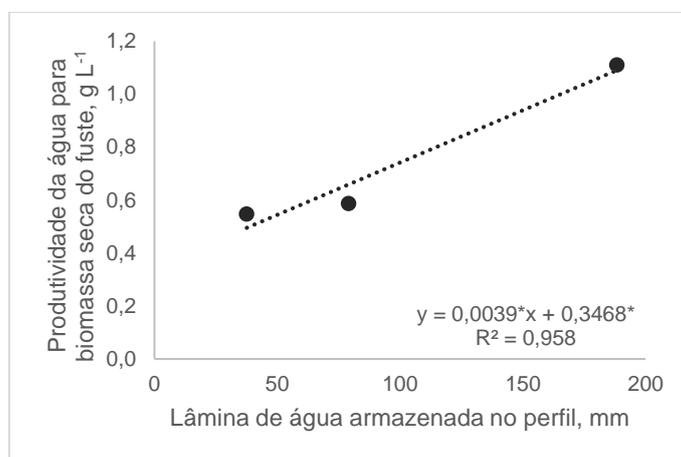


Figura 28. Regressão linear da produtividade da água para biomassa seca do fuste em função da lâmina de água armazenada no perfil para o potencial matricial da água no solo médio das faixas monitoradas.

* Significativo ao nível de 5 %.

Conclusões

Os clones procedentes da espécie *E. urophylla* apresentaram maior tolerância à condição de baixa disponibilidade hídrica, apresentando desempenho superior aos do híbrido *E. grandis x E. urophylla*.

O Clone UP1 obteve o melhor desempenho em praticamente todas as variáveis analisadas, seguido do UP2, GU3 e, por último, o GU4.

As árvores submetidas à faixa *alta* (ψ de -1,9 a 0 kPa) tiveram melhores resultados, seguidas das submetidas à faixa *média* (ψ de -19,7 a -2,4 kPa) e *baixa* (ψ de -86,7 a -33,9 kPa).

A proporção de biomassa acumulada no fuste aumentou em razão da redução do acúmulo percentual nos outros componentes, especialmente nos galhos.

Os clones avaliados foram muito mais eficientes na produção de biomassa seca do fuste na condição de maior conteúdo de água no solo (faixa *alta* de potencial matricial da água no solo), seja quando relacionada com área foliar ou com o volume de água evapotranspirado.

Referências

Abreu, M. C.; Soares, A. A. V.; Freitas, C. H.; Martins, F. B. Transpiration and growth responses by Eucalyptus species to progressive soil drying. **Journal of Forestry Research**, v. 33, n. 5, p. 1529-1543, 2022. doi: <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01448-z>.

Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. D. M.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

Alves, M. E. B.; Mantovani, E. C.; Neves, J. C. L.; Sedyama, G. C.; Lourenço, H. M. Simulação da produtividade do eucalipto sob diferentes condições de disponibilidade hídrica na região Centro-Leste de Minas Gerais. **Agrometeoros**, v. 26, n. 2, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v26i2.26416>.

Assis, T. F.; Abad, J. I. M.; Aguiar, A. M. Melhoramento Genético do Eucalipto. In: Schumacher, Mauro Valdir; Viera, Márcio (Ed.). **Silvicultura do Eucalipto no Brasil**.

Santa Maria: Fundação de Apoio a Tecnologia e Ciência-Editora UFSM, 2015. Cap. 7, p. 217-244.

Bahia, Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais. **Balanço hídrico do Estado da Bahia**. Salvador: SEI. Série Estudos e Pesquisas, v. 45, 1999. 250p.

Barrs, H. D.; Weatherley, P. E. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. **Australian journal of biological sciences**, v. 15, n. 3, p. 413-428, 1962. doi: <https://doi.org/10.1071/BI9620413>.

Belchior, I. B.; Lopes, A. D. S.; Couto, A. M.; Pereira, V. G. M. D. F.; Val, C. D. D. O. C. D.; Carvalho, L. M. T. D. Effect of Localized Irrigation on Dendrometric Attributes of Eucalyptus Hybrids. **Floresta e Ambiente**, v. 27, 2020. doi: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.066317>

Bernardino, L. T.; Bonomo, R.; Souza, J. M. Desenvolvimento inicial de mudas de eucalipto sob diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.13, nº.1, p. 3169 - 3179, 2019. doi: <http://doi.org/10.7127/RBAI.V13N100833>.

Binkley, D.; Campoe, O. C.; Alvares, C. A.; Carneiro, R. L.; Stape, J. L. Variation in whole-rotation yield among Eucalyptus genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS project. **Forest Ecology and Management**, v. 462, p. 117953, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117953>.

Coelho, E. F.; Simões, W. L. **Onde posicionar sensores de umidade e de tensão de água do solo próximo da planta para um manejo mais eficiente da água de irrigação**. Embrapa Mandioca e Fruticultura - Circular Técnica (INFOTECA-E), n. 109, 2015, 6p.

Corrêa, T. R.; Picoli, E. A. D. T.; Pereira, W. L.; Condé, S. A.; Resende, R. T.; Resende, M. D. V.; Costa, W. G.; Cruz, C. D.; Zauza, E. A. V. Very Early Biomarkers Screening for Water Deficit Tolerance in Commercial *Eucalyptus* Clones. **Agronomy**, v. 13, n. 3, p. 937, 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy13030937>.

Diao, J.; Lei, X. D.; Hong, L. X.; Rong, J. T.; Shi, Q. Single leaf area estimation models based on leaf weight of eucalyptus in southern China. **Journal of Forestry Research**, v. 21, p. 73-76, 2010. doi: <https://doi.org/10.1007/s11676-010-0012-4>.

Fernández, J. E.; Alcon, F.; Diaz-Espejo, A.; Hernandez-Santana, V.; Cuevas, M. V. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. **Agricultural water management**, v. 237, p. 106074, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106074>.

Ferraz, S. D. B.; Rodrigues, C. B.; Garcia, L. G.; Alvares, C. A.; Lima, W. P. Effects of *Eucalyptus* plantations on streamflow in Brazil: moving beyond the water use debate. **Forest Ecology and Management**, v. 453, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117571>.

Ferreira, E. B.; Cavalcanti, P. P.; Nogueira, D. A. **ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs (Portugues)**. R package version 1.2.2. 2021.

Frizzone, J. A.; Freitas, P. S. L.; Rezende, R.; Faria, M. A. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. Maringá: Eduem, 2012. 356 p.

García, L. Y.; Rubilar, R.; Valverde, J. C.; Emhart, V.; Bascuñán, L.; Medina, A.; Bozo, D. Morphological, physiological and carbon balance response of *Eucalyptus* genotypes under water stress. **New Forests**, p. 1-17, 2023. doi: <https://doi.org/10.1007/s11056-023-09985-7>.

Gonçalves, J. L. M.; Alvares, C. A.; Souza, A. H. B. N.; Arthur Junior, J. C. Caracterização Edafoclimática e Manejo de Solos das Áreas com Plantações de Eucalipto. In: Schumacher, Mauro Valdir; Viera, Márcio (Ed.). **Silvicultura do Eucalipto no Brasil**. Santa Maria: Fundação de Apoio a Tecnologia e Ciência-Editora UFSM, 2015. Cap. 4, p. 113-156.

Hubbard, R. M.; Carneiro, R. L.; Campoe, O.; Alvares, C. A.; Figura, M. A.; Moreira, G. G. Contrasting water use of two *Eucalyptus* clones across a precipitation and temperature gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 475, p. 118407, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118407>.

Hunter, I. Above ground biomass and nutrient uptake of three tree species (*Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus grandis* and *Dalbergia sissoo*) as affected by irrigation and fertiliser, at 3 years of age, in southern India. **Forest Ecology and Management**, v. 144, n. 1-3, p. 189-200, 2001.

Jung, L. H.; Lopes, A. S.; Oliveira, G. Q.; Oliveira, J. C. L.; Fanaya Júnior, E. D.; Brito, K. R. M. Irrigação no desenvolvimento inicial de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus*

grandis e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*. **Ciência Florestal**, v. 27, p. 655-667, 2017. doi: <https://doi.org/10.5902/1980509827750>.

Lopes, A. D. S.; Folegatti, M. V.; Fanaya Júnior, E. D.; Oliveira, G. Q. D.; Oliveira, J. C. L. D.; Brito, K. M. R.; Rego, N. H. Volume, biomass, carbon stock and efficiency of water use in irrigated eucalyptus. **Ciência Florestal**, v. 32, p. 1047-1060, 2022.

Medeiros, R. L. S.; de Souza, J. V. O.; Fernandes, J. P. P.; Oliveira, R., Gratao; P. L.; Paula, R. C. How does water stress affect *Corymbia citriodora* (Hook.) KD Hill and LAS Johnson throughout the initial growth phase?. **Australian Journal of Crop Science**, v. 17, n. 5, p. 414-422, 2023. doi: <http://doi.org/10.21475/ajcs.23.17.05.p3726>.

Minhas, P. S.; Yadav, R. K.; Chaturvedi, R. K. Effect of long-term irrigation with wastewater on growth, biomass production and water use by Eucalyptus (*Eucalyptus tereticornis* Sm.) planted at variable stocking density. **Agricultural Water Management**, v. 152, p. 151-160, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.009>.

Mualem, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, **Water Resources Research**, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976. doi: <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>.

Ngugi, M. R., Doley, D., Hunt, M. A., Dart, P., & Ryan, P. Leaf water relations of *Eucalyptus cloeziana* and *Eucalyptus argophloia* in response to water deficit. **Tree Physiology**, v. 23, n. 5, p. 335-343, 2003. doi: <https://doi.org/10.1093/treephys/23.5.335>.

Nascimento, F. A. L.; Silva, A. J. P.; Freitas, F. T. O.; Veimrober Junior, L. A. D. A. Sensor placement in 2D/3D wetting patterns from drip irrigation for quantification of evapotranspiration. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 188, p. 106356, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106356>.

Nóia Júnior, R. D. S.; Amaral, G. C.; Pezzopane, J. E. M.; Fonseca, M. D. S.; Câmara da Silva, A. P.; Xavier, T. M. T. Ecophysiological acclimatization to cyclic water stress in Eucalyptus. **Journal of Forestry Research**, v. 31, p. 797-806, 2020. doi: <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00926-9>.

Noletto-Dias, C.; Picoli, E. A. D. T.; Porzel, A.; Wessjohann, L. A.; Tavares, J. F.; Farag, M. A. Metabolomics characterizes early metabolic changes and markers of tolerant

Eucalyptus ssp. clones against drought stress. **Phytochemistry**, v. 212, p. 113715, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2023.113715>.

Oliveira Neto, S. N. D.; Reis, G. G. D.; Reis, M. D. G. F.; Neves, J. C. L. Produção e distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. em resposta à adubação e ao espaçamento. **Revista Árvore**, v. 27, p. 15-23, 2003. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000100003>.

Oliveira, G. Q. D.; Lopes, A. S.; Jung, L. H.; Rego, N. H.; Oliveira, J. C. Initial development of two eucalyptus hybrid submitted to irrigation. **Engenharia Agrícola**, v. 33, p. 1099-1109, 2013. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162013000600003>.

Payn, T.; Carnus, J. M.; Freer-Smith, P.; Kimberley, M.; Kollert, W.; Liu, S.; Orazio, C. Rodriguez, L; Silva, L. N.; Wingfield, M. J. Changes in planted forests and future global implications. **Forest Ecology and Management**, v. 352, p. 57-67, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.021>

Pereira, V. G. M. F.; Lopes, A. S.; Belchior, I. B.; Fanaya Júnior, E. D.; Pacheco, A. Brito, K. R. M. Irrigação e fertirrigação no desenvolvimento de eucalipto. **Ciência Florestal**, v. 29, p. 1100-1114, 2019. doi: <https://doi.org/10.5902/1980509823362>.

Queiroz, T. B., Rocha, S. M. G., da Fonseca, F. S. A., Martins, E. R., & Alvarenga, I. C. A. Efeitos do déficit hídrico no cultivo de mudas de Eucalipto. **Irriga**, v. 22, n. 4, p. 659–674, 2017. doi: <https://doi.org/10.15809/irriga.2017v22n4p659-674>.

Queiroz, T. B.; Campoe, O. C.; Montes, C. R.; Alvares, C. A.; Cuartas, M. Z.; Guerrini, I. A. Temperature thresholds for *Eucalyptus* genotypes growth across tropical and subtropical ranges in South America. **Forest ecology and management**, v. 472, p. 118248, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118248>.

R Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2023.

Reis, L. A. C., de Oliveira, J. A., dos Santos Farnese, F., Rosado, A. M., & Reis, L. A. C. Chlorophyll fluorescence and water content parameters are good biomarkers for selecting drought tolerant eucalyptus clones. **Forest Ecology and Management**, v. 481, p. 118682, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118682>.

Ryan, M. G.; Stape, J. L.; Binkley, D.; Alvares, C. A. Cross-site patterns in the response of *Eucalyptus* plantations to irrigation, climate and intra-annual weather variation.

Forest Ecology and Management, v. 475, p. 118444, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118444>.

Santos, E. F.; Mateus, N. S.; Rosario, M. O.; Garcez, T. B.; Mazzafera, P.; Lavres, J. Enhancing potassium content in leaves and stems improves drought tolerance of eucalyptus clones. **Physiologia Plantarum**, v. 172, n. 2, p. 552-563, 2021. doi: <https://doi.org/10.1111/ppl.13228>.

Santos, R. K. A.; Cairo, P. A. R.; Barbosa, R. P.; Lacerda, J. D. J.; Mafra Neto, C. D. S.; Macedo, T. H. D. J. Physiological responses of *Eucalyptus urophylla* young plants treated with biostimulant under water deficit. **Ciência Florestal**, v. 29, p. 1072-1081, 2019. doi: <https://doi.org/10.5902/1980509826206>.

Saravanan, S. Dry matter production in Eucalyptus clones. **International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology**, v. 12, n. 4, p. 381-387, 2019. doi: <http://doi.org/10.30954/0974-1712.12.2019.13>.

Scholander, P. F.; Bradstreet, E. D.; Hemmingsen, E. A.; Hammel, H. T. Sap Pressure in Vascular Plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. **Science**, v. 148, n. 3668, p. 339-346, 1965. doi: <https://doi.org/10.1126/science.148.3668.339>.

Silva, A. J. P.; Coelho, E. F.; Coelho Filho, M. A. Water extraction variability in the banana root zone affects the reliability of water balance. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 1, p. 1-10, 2015. doi: <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0003>.

Silva, A. J. P.; De Jong Van Lier, Q.; Coelho, E. F. Time Stable Representative Position determination as affected by the considered part of an irrigation cycle. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 157, p. 281-287, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.002>.

Silva, A. J.P.; Coelho, E. F.; Coelho Filho, M. A.; Souza, J. L. Water extraction and implications on soil moisture sensor placement in the root zone of banana. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 2, p. 95-101, 2018. doi: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0339>.

Šimůnek, J.; Van Genuchten, M.; Sejna, M. Recent developments and applications of the Hydrus computer software packages. **Vadose Zone Journal**, v. 15 n. 7, p. 1-25, 2016. doi: <https://doi.org/10.2136/vzj2016.04.0033>.

Soilmoisture Equipment Corp. **Portable Water Status Console. Model 3115. Operating Instructions.** Santa Barbara, CA: Soilmoisture, 2017. 28 p.

Stape, J. L.; Binkley, D.; Ryan, M. G.; Fonseca, S.; Loos, R. A.; Takahashi, E. N.; Silva, C. R.; Silva, S. R.; Hakamada, R. E.; Ferreira, J. M. A.; Lima, A. M. N.; Gava, J. L.; Leite, F. P.; Andrade, H. B.; Alves, J. M.; Silva, G. G. C.; Azevedo, M. R. The Brazil *Eucalyptus* Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1684-1694, 2010. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.012>.

Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. **Manual de métodos de análise de solo.** 3. ed. rev ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

Van Genuchten, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.

Whitehead, D; Beadle, C. L. Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. **Forest ecology and management**, v. 193, n. 1-2, p. 113-140, 2004. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.026>.

CAPÍTULO II

ABORDAGEM MULTIDIMENSIONAL DO BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO EM EUCALIPTO IRRIGADO POR GOTEJAMENTO

Abordagem multidimensional do balanço de água no solo em eucalipto irrigado por gotejamento

Resumo

O balanço de água no solo (BAS) é um método comumente utilizado para estimar a evapotranspiração de cultivos (ET_c) irrigados. Na realização do BAS a suposição unidimensional (1D) é bastante apropriada e faz sentido para irrigação por aspersão (se for relativamente uniforme). No entanto, na irrigação localizada, tal como no gotejamento de uma fonte pontual ou de uma fonte linear os processos da água no solo são fenômenos multidimensionais (2D/3D) o que torna desafiadora a determinação da ET via BAS. O presente trabalho objetivou demonstrar como a variabilidade espaço-temporal da água no solo em eucalipto irrigado por gotejamento afeta a determinação da ET_c por BAS, considerando abordagens uni (1D) e multidimensionais (2D/3D). Cultivou-se o clone comercial de *Eucalyptus urophylla* em lisímetro de pesagem (LP) com 1,2 m de lado e 0,6 m de altura. A irrigação foi manejada mantendo o potencial matricial da água no solo entre -19,7 e -2,4 kPa. O conteúdo de água no solo (θ) foi monitorado de forma contínua e automática em intervalos de 20 min com 26 sondas que utilizam o princípio da reflectometria no domínio do tempo (TDR). As sondas foram instaladas na zona radicular do eucalipto em 18 configurações 1D/2D/3D. Os valores de ET_c estimados pelas configurações do BAS foram comparados aos valores obtidos por LP, utilizando de estatísticas aplicadas às regressões: teste F de nulidade conjunta dos parâmetros estimados da curva de regressão; coeficiente de determinação da regressão, erro médio absoluto, raiz do erro médio quadrado, coeficiente de determinação do modelo e erro médio quadrado da predição. A variabilidade espaço-temporal de θ durante os ciclos de irrigação por gotejamento em eucalipto indicou alto grau de heterogeneidade com tendência de fluxo predominantemente vertical a partir do emissor. Visando estimar a ET_c com maior precisão e exatidão, os dados das configurações de sensores de θ instalados em 3D no solo relacionados com os dados da ET_c obtida por LP obtiveram melhores resultados estatísticos em eucalipto irrigado por gotejamento.

Palavras-chave: *Eucalyptus urophylla*, evapotranspiração da cultura, lisimetria, reflectometria no domínio do tempo, variabilidade espaço-temporal.

Multidimensional approach to soil water balance in drip-irrigated eucalyptus

Abstract

Soil water balance (SWB) is a commonly used method to estimate crop evapotranspiration (ET_c) in irrigated systems. In traditional applications, the one-dimensional (1D) assumption fits well, especially for uniform overhead irrigation like sprinklers. However, in localized irrigation, such as drip systems with point or line sources, soil water processes are multidimensional (2D/3D), making ET estimation through SWB challenging. This study aimed to demonstrate how spatiotemporal variability of soil water in drip-irrigated eucalyptus affects ET_c determination via both one-dimensional (1D) and multidimensional (2D/3D) SWB approaches. A commercial clone of *Eucalyptus urophylla* was cultivated in weighing lysimeters (WL) measuring 1.2 m on each side and 0.6 m in height. Irrigation was managed to maintain soil water matric potential between -19.7 and -2.4 kPa. Soil water content (θ) was continuously and automatically monitored at 20-minute intervals using 26 probes based on time domain reflectometry (TDR) principles. Probes were arranged in 18 1D/2D/3D configurations within the eucalyptus root zone. ET_c values estimated by SWB configurations were compared to those obtained by WL, employing statistics applied to regressions: the joint null hypothesis F-test of estimated regression curve parameters, regression coefficient of determination, mean absolute error, root mean square error, coefficient of model determination, and mean square error of prediction. The spatiotemporal variability of θ during drip irrigation cycles in eucalyptus indicated a high degree of heterogeneity with a predominantly vertical flow tendency from the emitter. To achieve more precise and accurate ET_c estimation, data from 3D-installed θ sensors in the soil correlated with ET_c data obtained by LP yielded superior statistical results in drip-irrigated eucalyptus.

Keywords: *Eucalyptus urophylla*, crop evapotranspiration, lysimetry, time domain reflectometry, spatiotemporal variability.

Introdução

No ano de 2020, o Brasil despontava como o sétimo país em área de florestas plantadas, principalmente com eucalipto e pinus. Considerando o estoque de madeira das florestas plantadas, o Brasil ocupava o terceiro lugar com 3,1 bilhões de metros cúbicos, ficando atrás apenas da China e dos Estados Unidos, que apresentavam 4,0 bilhões e 3,6 bilhões de m³, respectivamente, nesse mesmo ano (FAO, 2020).

Os cultivos florestais encontram-se em expansão no Brasil e já ocupavam 9,93 milhões de hectares no ano de 2021, sendo 75,8 % constituídos por espécies de eucalipto (IBÁ, 2022). A Bahia é o principal produtor no Nordeste e o quarto no ranking brasileiro, sendo o litoral norte um dos principais polos de produção e tornando-se uma atividade de grande importância para a economia local, regional e nacional. Todo esse crescimento e as elevadas produtividades nas regiões do Brasil ocorrem por conta da ação combinada dos agentes da cadeia produtiva do eucalipto, em especial dos envolvidos na pesquisa científica nas mais diversas áreas.

Nesse contexto, a evapotranspiração (*ET*), que consiste em um processo biofísico no qual ocorre a perda da água em forma de vapor de superfícies vegetadas para a atmosfera, como ocorre no cultivo do eucalipto, é um dos principais fenômenos estudados com impacto direto na produtividade, no planejamento dos cultivos e na gestão sustentável dos recursos hídricos.

Há muitos anos, o estudo da *ET* encontra-se presente na pauta científica, por exemplo, Lima & Freire (1976) indicaram que em meio aos vários métodos existentes para a medição da evapotranspiração no caso de áreas florestadas, devido à alta limitação no uso de lisimetria de pesagem (LP), o método do balanço de água no solo (BAS) parece ser a mais realística tentativa de estimativa da *ET*.

O BAS visa quantificar as entradas e saídas de água em um determinado volume de solo, da superfície até uma profundidade *z* considerada, possibilitando estimar a exigência hídrica das culturas para desempenhar seus processos metabólicos e se desenvolver (Jardim et al., 2019). Sua equação simplificada, adaptada de Libardi (2012), corresponde a:

$$ET_c = P + I \pm \Delta h - D \quad (14)$$

sendo ET_c a evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}), P a precipitação (mm dia^{-1}) I a irrigação (mm dia^{-1}), Δh a variação do armazenamento de água no solo (mm dia^{-1}) e D a drenagem interna (mm dia^{-1}). Entretanto, em determinados locais, podem ser considerados ainda o escoamento superficial e subsuperficial de entrada e/ou saída e a ascensão capilar.

Em florestas de eucalipto, a ET_c é limitada pela disponibilidade de água no solo, que pode variar em função da zona climatológica (características edafoclimáticas) e da posição na paisagem. Outros fatores que influenciam a ET_c são o material genético, a uniformidade do talhão, a densidade de plantio, a modificação da idade de colheita e, até mesmo, o manejo silvicultural do talhão (Hakamada et al., 2020; Reichert et al., 2021; White et al., 2014; Whitehead & Beadle, 2004; Minhas et al., 2015; Ryan et al., 2020; Stape et al., 2004; Stape et al., 2010).

Em função dessa diversidade de fatores e visando promover práticas de manejo da água sustentáveis em cultivos florestais, associadas à necessidade de se antecipar às tendências observadas em relação às mudanças climáticas, com secas mais prolongadas e má distribuição das chuvas ao longo do ano, em áreas de plantio consolidado de eucalipto, torna-se fundamental entender o BAS nas plantações florestais e buscar estratégias que visem a produtividade do eucalipto, aliada à manutenção de serviços ecossistêmicos e a provisão de água nas bacias hidrográficas (Ferraz et al., 2019), a exemplo do uso dos sistemas irrigados.

Entretanto, nas condições normais de cultivo ainda é difícil determinar a ET_c pelo método do BAS, tendo em vista a necessidade de um aparato relativamente alto de sensores utilizados na estimativa e no monitoramento do conteúdo de água no solo na profundidade efetiva do sistema radicular do eucalipto, tendo em vista a variabilidade espaço-temporal da água no solo provocada, em parte, pela extração de água pelas raízes (Ochoa-Hueso et al., 2020; Coelho et al., 2007).

Sob irrigação localizada por gotejamento é ainda mais complexo, pois a dinâmica espaço-temporal da água no solo ocorre de forma multidimensional em função das características hidráulicas do solo, condições iniciais, vazão do emissor, frequência de aplicação, evaporação, transpiração e até mesmo da qualidade da

água, exigindo um monitoramento bi ou tridimensional (Al-Ogaidi et al., 2017; Silva et al., 2015; Subbaiah, 2013).

O presente trabalho visa calcular a evapotranspiração de um importante clone comercial de eucalipto, pelo método do BAS realizado uni (1D) e multidimensionalmente (2D/3D) e compará-la com o método da LP, em ambiente controlado na fase inicial de crescimento sob irrigação por gotejamento, buscando fornecer parâmetros para o manejo da água de irrigação nessa fase da cultura, como a determinação do coeficiente de cultivo e da eficiência de uso da água, bem como ampliar as possibilidades de extrapolar esse método para estudo em condições naturais de cultivo durante todo o seu ciclo rotacional.

Material e Métodos

Configuração experimental

O trabalho foi conduzido em uma estufa agrícola (30 x 7 m) com 5 m de pé direito, instalada no Núcleo de Engenharia de Água e Solos (NEAS) da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), em Cruz das Almas, Bahia. As coordenadas geográficas da área correspondem a latitude 12° 39' 19,72" O, longitude 39° 05' 18,78" S e sua altitude é de 210 m. A classificação climática é do tipo Am, de acordo com Köppen (Bahia, 1999).

A área de cultivo consistiu em 36 parcelas de árvores cultivadas em lisímetros de drenagem com espaçamento de 2 x 1,7 m. Utilizou-se um clone da espécie *Eucalyptus urophylla* fornecido pela empresa Bracell, amplamente cultivado no Litoral Norte do Estado da Bahia.

O transplante das mudas ocorreu quando apresentavam 144 dias da propagação (miniestaquia) e altura de 0,35 m. Durante o período de aclimação de 73 dias, as plantas foram regadas a cada dois dias e, a partir desse momento, teve início a irrigação por gotejamento de fonte pontual, sendo conduzida até os 227 dias após o transplante.

Uma parcela, localizada no centro da estufa, continha o lisímetro de pesagem (LP) constituído de duas plataformas em paralelo, com 4 células de carga e capacidade para 1000 kg cada, com dimensões de 1,2 m de lado e altura de 0,6 m. A

parte inferior (0,1 m) foi utilizada para o sistema de drenagem, a parte superior (aproximadamente 0,05 m) ficou vazia e a parte mediana (0,45 m) ficou com o solo.

O solo utilizado foi constituído do horizonte B do Latossolo Amarelo distrocoeso, desestruturado e peneirado em malha de 0,002 m, com o objetivo de remover restos vegetais, principalmente raízes. As análises químicas do solo foram realizadas com base no Manual de métodos de análise de solo (Teixeira et al., 2017) em duas camadas de 0,2 m, utilizando uma amostra composta constituída de todas as parcelas do experimento (Tabela 11).

Tabela 11. Resultado das análises químicas do solo do experimento.

Atributo	Profundidade da camada (m)	
	----- 0,0 a 0,2 -----	----- 0,2 a 0,4 -----
pH H ₂ O	4,86	5,26
pH CaCl ₂	4,22	4,38
P	304,01	413,84
K	335,9	353,2
S	9,76	9,04
Ca+Mg	5,31	4,78
Ca	2,94	2,39
Mg	2,37	2,01
Al	<0,1	<0,1
H+Al	5,61	4,54
Na	0,16	0,14
CTC	11,78	9,84
V	53,22	54,88
Matéria Orgânica	3,07	2,06
Carbono Orgânico Total	1,78	1,19
B	0,987	1,066
Cu	16,64	12,31
Fe	56,93	49,15
Mn	15,07	14,84
Zn	20,64	29,71
Areia	630	640
Silte	90	80
Argila	280	280
Classificação textural	Franco argilo arenoso	Franco argilo arenoso

Dos atributos físicos, foram determinadas a granulometria, a porosidade e a densidade do solo. O solo apresentava 635 g kg⁻¹ de areia, 85 g kg⁻¹ de silte e 280 g kg⁻¹ de argila, sua classificação textural foi franco argilo arenosa. A porosidade total encontrada foi de 0,472 m³ m⁻³ e a densidade do solo foi de 1,44 g cm⁻³.

Foi realizada adubação nitrogenada com sulfato de amônio, para a qual foi utilizada a recomendação de 55 kg de N por hectare (Gonçalves et al., 2015), fracionada quinzenalmente, para 9 meses de cultivo (previsão inicial da duração do experimento), a primeira foi feita na cova de plantio e as demais iniciaram um mês após o transplante.

Um total de 26 sondas de TDR (reflectometria no domínio do tempo) foram instaladas no LP, com monitoramento contínuo automático, distribuídos no perfil do solo em esquema tridimensional, conforme a Figura 29. A forma de construção das sondas encontra-se descrita em Silva et al. (2015).

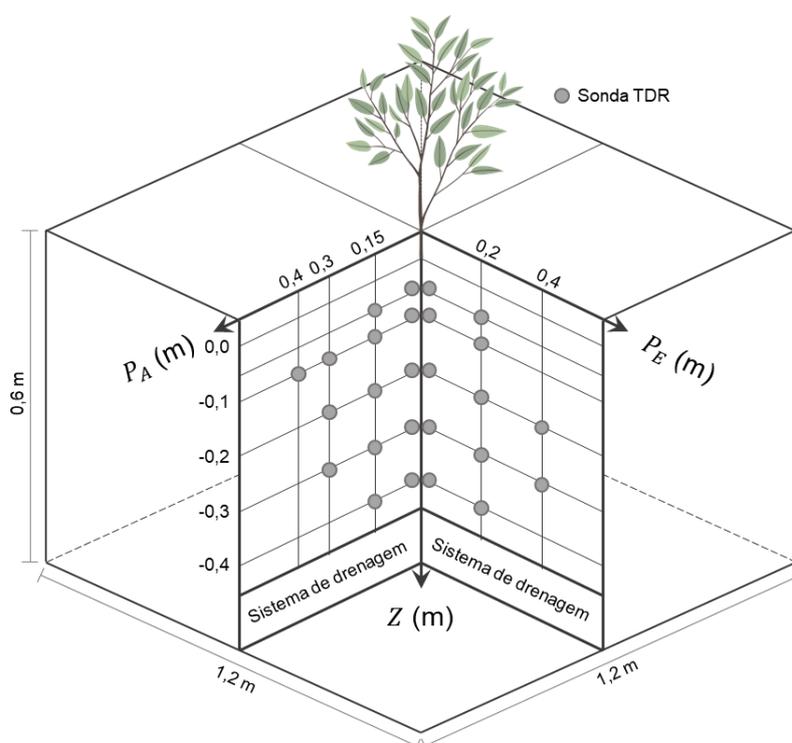


Figura 29. Esquema de distribuição das sondas TDR no lisímetro. P_A : Plano paralelo à linha de gotejamento; P_E : Plano perpendicular à linha de gotejamento.

A coleta de dados foi automatizada em intervalos de 20 minutos, sendo armazenados em um datalogger CR1000, que utilizou um conjunto com um reflectômetro TDR100 e quatro multiplexadores SDMX50, todos da marca Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, EUA (Figura 30).



Figura 30. Lisímetro de pesagem do experimento com os instrumentos de coleta de dados.

Uma estação meteorológica foi instalada no interior da estufa para o monitoramento dos dados de temperatura, umidade relativa do ar e radiação solar global (Figura 31), os quais foram utilizados nos cálculos da evapotranspiração de referência, conforme metodologia FAO-56 Penman-Monteith (Monteith, 1965; Penman, 1956), o resultado é apresentado semanalmente em gráfico e estatísticas descritivas.



Figura 31. Piranômetro LP02 (Hukseflux) e termo-higrômetro.

Determinação dos parâmetros hidráulicos do solo

Na casa de vegetação, o lisímetro de pesagem foi submetido à saturação, quando atingiu o equilíbrio entre volume de água aplicado e drenado, o sistema de

drenagem foi fechado e o abastecimento de água interrompido, considerando o solo totalmente saturado.

Foram monitorados os dados de variação do conteúdo de água no solo, oriundos das sondas de TDR e da massa do lisímetro ao longo de 26 dias, por meio de registro horário em datalogger. Foi possível calcular concomitantemente a taxa de evaporação e do conteúdo de água no solo e esses dados foram levados ao software Hydrus-1D (Šimůnek et al., 2016) que simulou o fluxo de água para saturação variável em meio poroso, de forma unidimensional, por meio da resolução numérica da equação de Richards (equação 15).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (15)$$

sendo h a pressão da água no solo (m), θ o conteúdo de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), t o tempo (d), z a coordenada vertical (m) e $K(h)$ a condutividade hidráulica não saturada (m dia^{-1}).

Para resolver a equação 16, o modelo ajustou os parâmetros das funções analíticas de Van Genuchten-Mualem (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980), Equações 16 e 17.

$$\theta = [1 + |\alpha h|^n]^{(1/n)-1}, \quad (16)$$

$$K = K_s \theta^\lambda \left[1 - (1 - \theta^{n/(n-1)})^{1-(1/n)} \right]^2 \quad (17)$$

sendo $\theta = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$ a saturação efetiva, θ_r o conteúdo de água residual no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), θ_s o conteúdo de água no solo saturado ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), K a condutividade hidráulica (m dia^{-1}), K_s a condutividade hidráulica do solo saturado (m dia^{-1}), e α (m^{-1}), n (-), e λ (-) os parâmetros empíricos.

O Hydrus-1D implementa o método de estimativa dos parâmetros de Marquardt-Levenberg para otimização inversa dos parâmetros hidráulicos do solo. A função objetiva (Φ) corresponde à soma dos quadrados dos desvios entre os valores medidos e simulados e é definida em termos do conteúdo de água no solo, em função do tempo, $\theta_i(t_i)$, conforme a equação 18.

$$\Phi(\theta, \beta) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{k_j} [\theta_{TDR,j}(z_i t_i) - \theta_{PRED,j}(z_i, t_i, \beta)]^2 \quad (18)$$

sendo que o lado direito representa os resíduos entre o conteúdo de água medido pela TDR (θ_{TDR}) no tempo t_i para as diversas leituras j medidas no local z_i , e seu correspondente valor estimado (θ_{PRED}), utilizando os parâmetros hidráulicos do solo otimizados no parâmetro vetor β (por exemplo, θ_r , θ_s , α , n , K_s e λ), m o número de diferentes conjuntos de medições e k o número de medidas em um determinado conjunto de medições.

Calibração do lisímetro de pesagem e dos sensores TDR

As plataformas de pesagem do lisímetro, juntas, apresentavam capacidade de 2000 kg e aproximação de 0,1 kg, foram calibradas com objetos de massas conhecidas, variando de 0 a 12 kg (24 variações), usando a relação linear entre massa (W , kg) e sinal elétrico (S , mV), emitido pelas células de carga, obtendo os coeficientes linear, angular e de ajuste (R^2) da reta (Tabela 12). A massa do lisímetro foi calculada com base na média dos resultados encontrados para as duas plataformas de pesagem.

Tabela 12. Coeficientes linear, angular e de ajuste das equações de calibração do lisímetro.

Equação	Coefficiente linear	Coefficiente angular	Coefficiente de ajuste (R^2)
Plataforma de pesagem 1	-2090,822	2411,971	0,988
Plataforma de pesagem 2	-1449,343	2143,721	0,995

Foi realizada a calibração dos sensores de TDR, visando correlacionar os valores da constante dielétrica aparente (k_a) com o conteúdo de água no solo (θ), obtidos, por meio de pesagem, desde a saturação até a secagem total em estufa a 105 °C. Para os dados coletados, utilizando os multiplexadores, foram utilizadas 21 amostras indeformadas de solo, coletadas com tubos de PVC com diâmetro interno de 0,0975 m e altura de 0,15 m, gerando as curvas específicas para cada sonda. Além disso, no processo foram obtidos 346 pares de pontos, utilizados na geração da equação polinomial cúbica (Figura 32), que tem o objetivo de estimar a umidade do solo com base nas leituras realizadas nas sondas TDR.

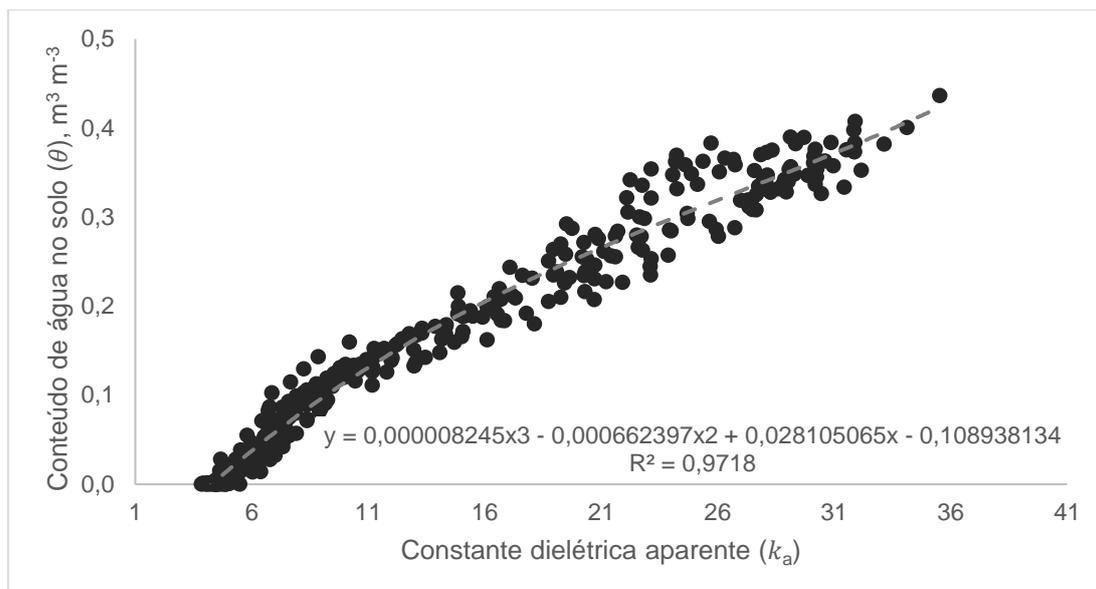


Figura 32. Curva de calibração para os dados do conteúdo relativo de água no solo obtidos a partir da constante dielétrica aparente das sondas TDR, conectadas nos multiplexadores.

Manejo da irrigação

O sistema de irrigação foi composto por tubos contendo emissores de gotejamento localizados a 0,05 m do caule da planta, apresentando vazão nominal de $4,2 \text{ L h}^{-1}$ e pressão de serviço de 10 mca. O teste de uniformidade de distribuição de água foi realizado em dois momentos, imediatamente após a instalação do sistema de irrigação e próximo ao final do experimento, obtendo os valores de 95 % e 97,5 %, respectivamente, para o coeficiente de uniformidade de Christiansen (Frizzone et al., 2012).

O manejo da irrigação foi realizado diariamente após a obtenção dos valores médios de θ , fornecidos pelas sondas de TDR localizadas na distância R de 0 m do gotejador e nas profundidades Z de 0,1 e 0,3 m. A definição de quanto irrigar (lâmina de água a ser aplicada) levou em consideração os parâmetros hidráulicos do solo (Tabela 13).

Tabela 13. Parâmetros hidráulicos do solo utilizado no experimento.

Sigla	Parâmetro	Unidade	Valor
θ_s	conteúdo de água no solo na saturação	$m^3 m^{-3}$	0,472
θ_r	conteúdo de água no solo residual	$m^3 m^{-3}$	0,022
α	parâmetro empírico	-	5,5
n	parâmetro empírico	-	1,52
Λ	parâmetro empírico	-	0,008
ψ_{cc}	potencial matricial na capacidade de campo	kPa	-10,1974
θ_{cc}	conteúdo de água no solo na capacidade de campo	$m^3 m^{-3}$	0,2012
ψ_{pmp}	potencial matricial no ponto de murcha permanente	kPa	-1529,610
θ_{pmp}	conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente	$m^3 m^{-3}$	0,0356
A_w	área molhada	m^2	0,5
Z	profundidade da camada	m	0,2
n_z	número de camadas	-	2
V_{cc}	volume de água na capacidade de campo	L	35,84
Ef	eficiência de aplicação de água	-	0,95
Q_e	vazão do emissor	$L h^{-1}$	4,2
CAD	Capacidade total de água disponível do solo	$m^3 m^{-3}$	0,1657

O solo foi mantido numa faixa de potencial matricial da água no solo (ψ) que variou de -19,7 a -2,4 kPa e média de -10,2 kPa por meio de irrigação por gotejamento. Para o manejo da irrigação adotou-se como limite inferior de disponibilidade de água no solo o valor de 76 % (momento de ligar a moto-bomba), o que corresponde a um θ de $0,1615 m^3 m^{-3}$ e um ψ de -16,6 kPa, calculada pela curva de retenção de água no solo, conforme modelo de Van Genuchten-Mualem (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980), apresentada na equação 19. O volume de água foi calculado para retornar o solo ao potencial matricial de -10 kPa, considerado como 100 % de disponibilidade de água no solo, quando o conteúdo de água no solo corresponde a $0,2012 m^3 m^{-3}$. Considerando os demais parâmetros, a irrigação total necessária (ITN) resultou em 8,4 L (equação 20) e no tempo de irrigação (TI) de 120 minutos (equação 21).

$$\theta_{\psi} = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{(1 + |\alpha\psi|^n)} \right]^{(1 - \frac{1}{n})} \quad (19)$$

$$ITN = \left[\frac{(\theta_{\psi_{ls}} - \theta_r) A_w Z}{Ef} \right] 1000 \quad (20)$$

$$TI = \frac{ITN}{\varphi_e} \quad (21)$$

sendo θ_{ψ} o conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$) em função de ψ , θ_r o conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$) residual, θ_s o conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$) saturado, ψ o potencial matricial da água no solo (mca), α e n os parâmetros empíricos da equação,

ITN a irrigação total necessária (L), $\theta_{\psi ls}$ o conteúdo de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) no perfil para o potencial matricial considerado como limite superior de disponibilidade de água, $\bar{\theta}_a$ a média do conteúdo de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) atual no perfil medido no momento da irrigação, A_w a área molhada (m^2), Z a profundidade do perfil do solo (m), E_f a eficiência de aplicação de água, TI o tempo de irrigação (h) e φ_e a vazão do emissor (L h^{-1}).

A faixa de potencial matricial da água no solo e do conteúdo de água no solo utilizada como parâmetro para o manejo da irrigação foi calculada pela curva de retenção (Figura 33).

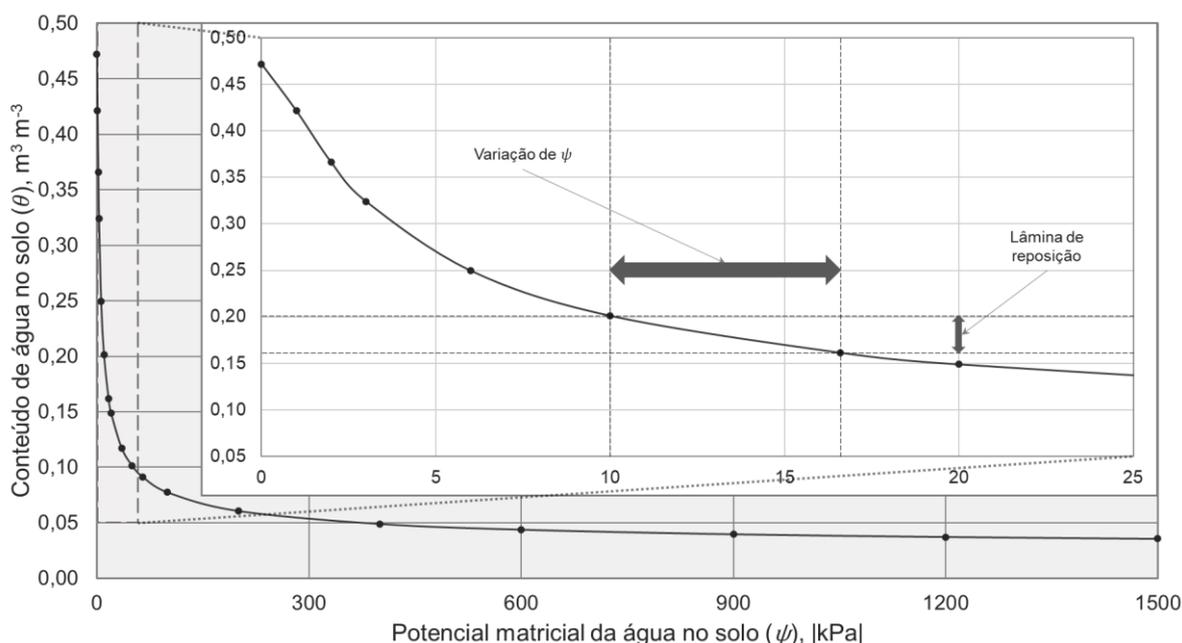


Figura 33. Curva de retenção da água no solo demonstrando a faixa de variação de potencial matricial da água no solo e sua respectiva lâmina de reposição para manejo da irrigação.

Os dados de conteúdo de água no solo foram coletados diariamente em pelo menos dois momentos, no início da manhã e no final da tarde, para decisão da irrigação. Após inserção dos valores obtidos em planilha eletrônica era efetuado o cálculo do tempo de irrigação caso fosse necessário. O acionamento do sistema de irrigação ocorreu de forma manual, entretanto, foi utilizado o mini controlador K-Rain RPS46 6 setores para programar o tempo de irrigação.

Para efeitos didáticos, fez-se uma tabela (Tabela 14) como exemplo de como ocorreu o manejo da irrigação, demonstrando o acionamento do sistema para um ciclo de irrigação na condição adotada do experimento. A determinação do valor do

potencial matricial levou em consideração as médias das duas medidas de conteúdo de água no solo obtidas por meio das sondas TDR localizadas nas profundidades Z de 0,1 e 0,3 m para a distância R de 0 m do gotejador.

Tabela 14. Planilha utilizada no manejo da irrigação do experimento.

Data e hora	ψ , (kPa)	θ_a , $m^3 m^{-3}$	ITN (L)	TI (h:mm)	Irrigar
03/12/22 08:00	19,1	0,1518	10,4	2:28	Sim
03/12/22 16:20	12,8	0,1809	0,0	0:00	Não
04/12/22 06:40	15,4	0,1667	7,3	1:43	Sim
04/12/22 10:20	9,9	0,2018	0,0	0:00	Não
04/12/22 17:40	16,9	0,1601	8,7	2:03	Sim

ψ : potencial matricial da água no solo; θ_a : Conteúdo de água no solo atual; ITN: Irrigação total necessária; TI: Tempo de irrigação.

Variabilidade espaço-temporal da água no solo

Visando obter a variabilidade espaço-temporal dos padrões de distribuição do conteúdo de água na zona radicular, durante os ciclos de irrigação, foram realizadas interpolações pelo método ponderado do inverso da distância (IDW) para os dados coletados pelas sondas TDR, distribuídas no lisímetro em um plano bidimensional, ou seja, os planos paralelo e perpendicular (Figura 29) foram considerados como apenas um plano para o posicionamento horizontal da sonda, neste tópico chamado de distância R .

A interpolação ocorreu pela média de θ obtida em 6 ciclos de irrigação iniciados sempre no início da manhã (entre 9 e 10 h) e com aplicação de 8,4 litros de água durante 2 h. Os cálculos foram feitos para os seguintes momentos: imediatamente antes da irrigação (0 min); durante a irrigação (20, 40 e 120 min); e após a irrigação (240, 360, 840 e 1320 min).

Outra análise espaço-temporal considerou a variação do θ ocorrida durante os processos de infiltração, como função da interação do solo e do sistema de irrigação, e extração como função do solo, planta/raiz e condição atmosférica (Silva et al., 2013; Silva et al., 2009; Coelho et al., 2007). Além disso, foi realizado um estudo sobre a amplitude média de variação total do conteúdo de água no solo durante os ciclos, em relação ao posicionamento do sensor.

Os cálculos foram baseados em dados do conteúdo de água no solo nos seguintes momentos: (i) imediatamente antes do evento de irrigação (k);

(ii) imediatamente após o fim da irrigação ($k + 1$); e (iii) antes da próxima irrigação ($k + 2$).

A diferença entre o conteúdo de água no solo medido após a irrigação (θ_{k+1}) e imediatamente antes da irrigação (θ_k), permitiu o cálculo da água infiltrada (θ_I) no tempo ($k + 1$) – (k) para a posição da sonda TDR (R, Z), conforme equação 22:

$$\theta_I = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_{k+1} - \theta_k}{n} \quad (22)$$

sendo θ_I a água infiltrada por unidade de volume de solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), θ_{k+1} o conteúdo de água no solo imediatamente após a irrigação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), e θ_k o conteúdo de água no solo antes da irrigação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), n o número de ciclos de irrigação considerados.

Já para o conteúdo de água extraída (θ_E), o cálculo foi realizado pela diferença entre as medidas de θ nos períodos ($k + 1$) e ($k + 2$) para cada posição do sensor (R, Z), conforme a equação 23:

$$\theta_E = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_{k+2} - \theta_{k+1}}{n} \quad (23)$$

sendo θ_E a água extraída por unidade de volume de solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), θ_{k+1} o conteúdo de água no solo imediatamente após a irrigação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), θ_{k+2} o conteúdo de água no solo antes da próxima irrigação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e n o número de ciclos de irrigação considerados.

Para os cálculos de amplitude de variação de θ , para cada posicionamento de sensor (R, Z), foi utilizada a média das diferenças entre as medidas do valor máximo e mínimo de cada ciclo de irrigação (equação 24).

$$\Delta\theta = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_{max} - \theta_{min}}{n} \quad (24)$$

sendo $\Delta\theta$ a amplitude de variação média do conteúdo de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), θ_{max} o conteúdo de água no solo quando atinge o valor mais alto dentro do ciclo da irrigação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_{min} o conteúdo de água no solo quando atinge o valor mais baixo dentro do ciclo da irrigação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e n o número de ciclos de irrigação considerados.

Evapotranspiração e balanço de água no solo

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi estimada pela equação FAO-56 Penman-Monteith (Monteith, 1965; Penman, 1956) e foi calculada diariamente conforme equação 25 (Allen et al., 1998):

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + Y \frac{900}{T_{med} + 273,16} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + Y(1 + 0,34U_2)} \quad (25)$$

sendo ET_o a evapotranspiração de referência (mm), Δ a declinação da curva de saturação do vapor d'água ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), R_n o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), G a densidade do fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), Y o fator psicrométrico (MJ kg^{-1}), T_{med} a temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$), U_2 a velocidade do vento a 2 m do solo (m s^{-1}), e_s a pressão de saturação do vapor d'água (kPa) e e_a a pressão atual do vapor d'água (kPa).

Como a magnitude do fluxo de calor no solo em um dia é relativamente pequena, ela pode ser ignorada ($G = 0$) em aplicações diárias (Allen et al., 1998), foi o caso do presente estudo. Considerando que a velocidade do vento em estufa normalmente é bastante pequena, quando comparada com a encontrada fora da estufa, conforme relatado por Tanny (2012), Yan et al. (2018), Gong et al. (2017), Gong et al. (2020) e Fernández et al. (2010), foi adotado o valor de $0,5 \text{ m s}^{-1}$.

Para efetuar os cálculos e análises relacionados ao balanço de água no solo, bem como da variação de armazenamento da água no solo e evapotranspiração da cultura, foram utilizados dois métodos: por lisímetro de pesagem (LP) e por balanço de água no solo (BAS) estimada pelos valores do conteúdo de água no solo (θ) obtidos com as sondas TDR. Foram utilizados os dados de todo o período, desde o início da irrigação.

A fórmula utilizada em ambos os métodos foi a mesma (equação 26, adaptada da equação 14), entretanto, a mudança ocorre apenas no cálculo da variação de armazenamento de água no solo. A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi calculada diretamente pela equação do BAS aplicada sobre um determinado período (Δt) e para todo o volume de solo do lisímetro, considerado como volume de controle.

$$ET_c = I \pm \Delta h - D \quad (26)$$

sendo ET_c a evapotranspiração real da cultura (L dia^{-1}), I a lâmina de irrigação calculada com base no tempo de aplicação adotado (L), Δh a variação de armazenamento de água no solo (L) e D a drenagem interna (L), lembrando que o sistema de drenagem indicou que não houve nenhum volume de água perdido e a ascensão capilar foi desprezada.

Pelo método do LP, Δh foi determinada pelas variações de massa diária medidas nas plataformas de pesagem (equivalente a litros). Já pelo método do BAS, a variação de armazenamento foi estimada por meio dos valores de θ oriundos das sondas TDR instaladas no esquema tridimensional apresentado na Figura 29.

Neste último, os cálculos foram baseados em dados do θ nos seguintes momentos: (i) imediatamente antes do evento de irrigação (k); e (ii) antes da próxima irrigação ($k + 2$).

O armazenamento de água no solo (h) foi calculado para cada distância horizontal nos planos perpendicular (P_E) e paralelo (P_A) na profundidade total Z (0,45 m) pela equação 27, conforme segue:

$$h(P_i) = \int_0^Z \theta(Z_i) dZ \quad (27)$$

sendo $h(P_i)$ a função representativa do conteúdo de água no perfil do solo para a distância horizontal utilizada ($m^3 m^{-3}$), dZ a diferencial da variável independente Z , e Z a profundidade total do perfil (m). Para resolver a integral numérica, usamos a regra de Simpson.

A variação de armazenamento de água no solo para as abordagens 1D, 2D e 3D foi calculada de acordo com as equações 28, 29 e 30, respectivamente, e foram criados 18 cenários com as configurações uni e multidimensionais para o cálculo da ET_c por meio do BAS, descritas na Tabela 15.

$$\Delta h_{1D} = h(P_i)_{k+2} - h(P_i)_k \quad (28)$$

$$\Delta h_{2D} = \frac{\sum_{i=1}^n h(P_i)_{k+2} - h(P_i)_k}{n} \quad (29)$$

$$\Delta h_{3D} = \frac{(\Delta h_{2D_{P_E}} + \Delta h_{2D_{P_A}})}{2} \quad (30)$$

sendo Δh a variação de armazenamento de água no perfil do solo ($m^3 m^{-3}$) para os conjuntos de sondas instaladas a cada distância do gotejador, h o conteúdo de água armazenado no perfil do solo ($m^3 m^{-3}$), P a distância horizontal da planta perpendicular (P_E) ou paralela (P_A) à linha de gotejo (m), k o momento imediatamente antes do evento de irrigação, $k + 2$ o momento antes da próxima irrigação, n o número de planos horizontais unidimensionais utilizados.

Tabela 15. Configurações de cálculo da variação do balanço de água no solo para as abordagens uni (1D) e multidimensionais (2D/3D).

Sigla	Abordagem	Plano	Distância (m)	Número de Sondas
ET_c1E3	1D	Perpendicular	0,00	5
ET_c1E4	1D	Perpendicular	0,20	5
ET_c1E5	1D	Perpendicular	0,40	2
ET_c1A6	1D	Paralelo	0,00	5
ET_c1A7	1D	Paralelo	0,15	5
ET_c1A8	1D	Paralelo	0,30	3
ET_c1A9	1D	Paralelo	0,40	1
ET_c2E10	2D	Perpendicular	0,00; 0,20; 0,40	12
ET_c2E11	2D	Perpendicular	0,00; 0,20	10
ET_c2A12	2D	Paralelo	0,00; 0,15; 0,30; 0,40	14
ET_c2A13	2D	Paralelo	0,00; 0,15; 0,30	13
ET_c2A14	2D	Paralelo	0,00; 0,15	10
ET_c3D15	3D	Ambos	PE 0,00; 0,20; 0,40 PA 0,00; 0,15; 0,30; 0,40	26
ET_c3D16	3D	Ambos	PE 0,00; 0,20; 0,40 PA 0,00; 0,15; 0,30	25
ET_c3D17	3D	Ambos	PE 0,00; 0,20; 0,40 PA 0,00; 0,15	22
ET_c3D18	3D	Ambos	PE 0,00; 0,20 PA 0,00; 0,15; 0,30; 0,40	24
ET_c3D19	3D	Ambos	PE 0,00; 0,20 PA 0,00; 0,15; 0,30	23
ET_c3D20	3D	Ambos	PE 0,00; 0,20 PA 0,00; 0,15	20

Análise estatística

Para as análises de regressão, os dados foram resumidos semanalmente, sendo utilizadas 12 semanas. Os valores de evapotranspiração obtidos por BAS em todas as configurações (ET_c) foram comparados aos valores de evapotranspiração medidos por lisimetria de pesagem (ET_{CLP}) a partir das análises dos modelos de regressão linear simples, $y = a + bx + \varepsilon$, resultantes da relação $ET_c \times ET_{CLP}$. Os modelos foram avaliados considerando a hipótese de nulidade conjunta dos parâmetros estimados a e b : $H_0: a = 0 \text{ \& } b = 1$, por meio do teste F (Mayer et al., 1994). Se qualquer uma das duas hipóteses nulas for falsa a 5 % de significância, os valores de ET_c não são equivalentes aos de ET_{CLP} (Tedeschi, 2006).

Para comparação entre as regressões aprovadas foi realizada uma análise estatística em que foram avaliadas as distâncias entre os valores da ET_{CLP} e da ET_{CBAS} , as quais mede-se a acurácia e precisão por meio de índices apresentados na Tabela 16 utilizando o Model Evaluation Software (MES), versão 3.2.7 (Tedeschi,

2006) e seguindo recomendações de Pasquel et al. (2022), Wallach et al. (2018) e Bennet et al. (2013).

Tabela 16. Índices estatísticos utilizados para comparar os modelos de regressão linear.

Sigla	Descrição	Observação	Equação
R^2	Coefficiente de determinação da regressão	Quanto mais próximo de 1 é melhor	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{CLP_i} - \widehat{ET}_{c_i,f})^2}{\sum_{i=1}^n (ET_{CLP_i} - \overline{ET_c})^2} \quad (31)$
MAE	Erro médio absoluto	Quanto menor é melhor	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ET_{CLP_i} - ET_{c_i} \quad (32)$
$RMSE$	Raiz do erro médio quadrado	Quanto menor é melhor	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_{CLP_i} - ET_{c_i})^2} \quad (33)$
CD	Coefficiente de determinação do modelo	Quanto mais próximo de 1 é melhor	$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{CLP_i} - \overline{ET_c})^2}{\sum_{i=1}^n (f(\widehat{ET}_{c_{1,f}, \dots, \widehat{ET}_{c_{p,f}}})_i - \overline{ET_c})^2} \quad (34)$
$MSEP$	Erro médio quadrado da predição	Quanto menor é melhor	$MSEP = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{CLP_i} - f(\widehat{ET}_{c_{1,f}, \dots, \widehat{ET}_{c_{p,f}}})_i)^2}{n} \quad (35)$

ET_{CLP_i} : valor da evapotranspiração da cultura calculada por lisimetria de pesagem; ET_{c_i} : valor da evapotranspiração da cultura calculada por balanço de água no solo; $\widehat{ET}_{c_i,f}$: valor simulado de ET_c usando o modelo de regressão entre ET_{CLP_i} e ET_{c_i} ; $\overline{ET_c}$: média dos valores de ET_c ; $f(\widehat{ET}_{c_{1,f}, \dots, \widehat{ET}_{c_{p,f}}})_i$: o valor simulado de ET_c usando o modelo de regressão para cada par de dados; n : o número de observações.

Coeficiente de cultura e eficiência do uso da água

Foi calculado o coeficiente de cultura (K_c) médio para cada mês, considerando apenas as configurações de cálculo da ET_c que obtiveram os melhores valores nas análises estatísticas, observando se há diferenças nessa fase inicial de crescimento (equação 36). Para tanto, a evapotranspiração de referência foi convertida de milímetros para litros por planta por meio da área do lisímetro.

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (36)$$

sendo K_c o coeficiente de cultura, ET_c a evapotranspiração da cultura (L planta⁻¹ dia⁻¹), ET_o a evapotranspiração de referência (L planta⁻¹ dia⁻¹).

Por fim, foi calculada a produtividade da água (PA) para a produção de biomassa seca do fuste, conforme equação 37.

$$PA = \frac{BSFu}{ET_c} \quad (37)$$

sendo PA a produtividade da água (g L⁻¹) e $BSFu$ a biomassa seca do fuste (g).

Considerou-se o termo PA como sinônimo de produtividade biofísica da água da cultura com o objetivo de contribuir com a abordagem utilizada por Fernández et al. (2020), os quais apresentam os conceitos e equações envolvidas de indicadores úteis para a análise do uso da água em culturas lenhosas.

Resultados e Discussão

Análise espaço-temporal do conteúdo de água no solo

Observou-se que as maiores variações do conteúdo de água no solo ocorreram mais próximas ao emissor e ao caule da planta, entretanto, chegaram a atingir toda a profundidade do perfil, bem como toda a distância horizontal monitorada, de acordo com a análise das isolinhas (Figura 34) e das variações nos valores de monitoramento em cada sensor de θ . Entretanto, observou-se que a frente de molhamento mais considerável atingiu até 0,35 m de raio da planta e do gotejador, resultado semelhante foi encontrado em experimento com maracujá, onde Nascimento et al (2021) obtiveram um raio de 0,3 m no mesmo tipo de solo.

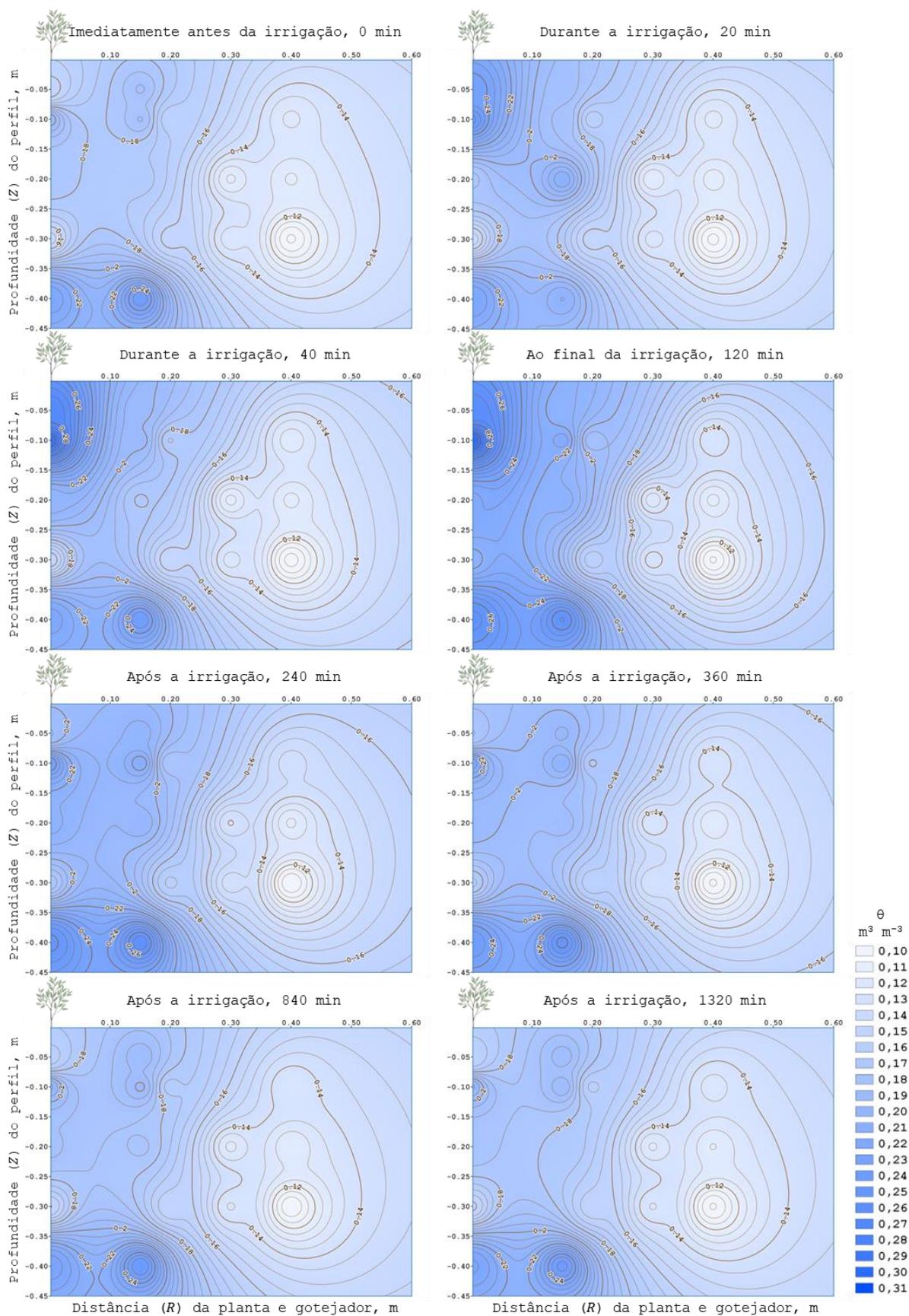


Figura 34. Variabilidade espaço-temporal da média do conteúdo de água no solo para 6 ciclos de irrigação monitorados com as sondas TDR em eucalipto.

Observou-se aumento crescente de θ em todo o perfil até o momento final da irrigação, aos 120 minutos. A extração de água ocorreu com muito mais intensidade logo nos primeiros momentos após o fim da irrigação. Aos 240 min foi observada redução de pelo menos $0,078 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no θ das sondas instaladas na distância (R) 0,0 m e profundidade (Z) 0,05 m, local onde havia maior conteúdo de água no solo. Esse fato é associado ao momento em que terminava a irrigação, entre 11 e 12 horas da manhã, quando ocorria a maior demanda hídrica e são elevados o fluxo de seiva e a ET_c (Wang et al., 2022; Ooghatoo et al., 2020; Vellame et al., 2009).

Os resultados encontrados para infiltração e extração de água para cada posição das sondas TDR estão apresentados na Figura 35, pode ser observado que os pontos monitorados mais próximos à planta/gotejador são aqueles em que ocorrem maiores valores do θ , oriundos dos processos de infiltração e extração. A infiltração é resultado da interação entre a água da irrigação por gotejamento e as características físico-hídricas do solo, já a extração de água é função das relações solo, planta/raiz e atmosfera.

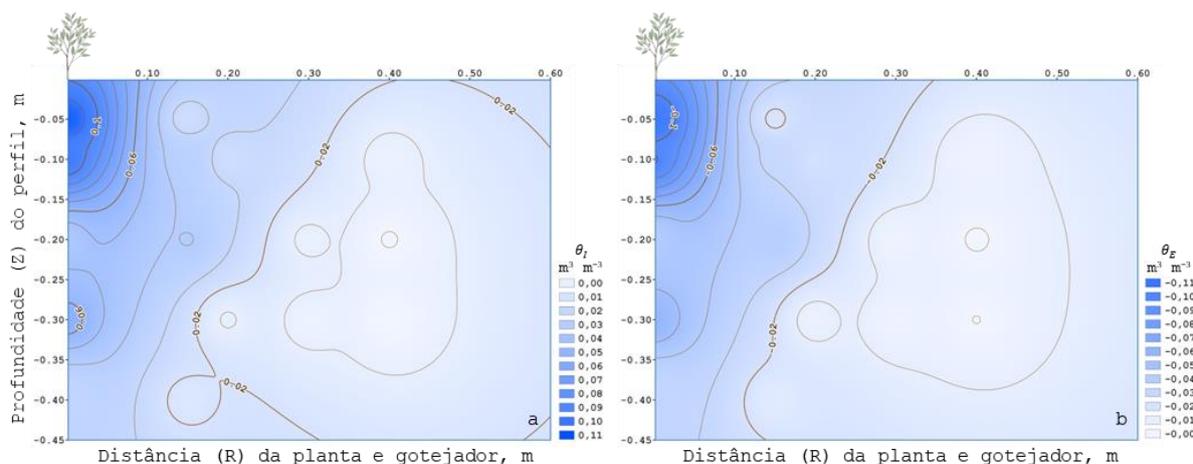


Figura 35. Processos de infiltração (a) e extração (b) da água no perfil bidimensional do solo para a média de 6 ciclos de irrigação monitorados com as sondas TDR em eucalipto.

Cerca de 80 % do total do θ extraído ocorreu até a distância R 0,15 m de e profundidade Z 0,25 m, sendo essa região considerada como a zona efetiva de extração de água (Silva et al., 2009; Coelho et al., 2007).

Nota-se que os gráficos (Figura 35) foram muito semelhantes, indicando que os locais com maior quantidade de água presente no solo após a infiltração apresentaram a extração da água praticamente na mesma proporção da que infiltrou após a irrigação. Para comprovar tal fato, foi realizada uma regressão linear com os

dados modulados, que resultou em um ajuste que apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,997, um $RMSE$ de $0,002 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, um coeficiente linear de 0,9513 e angular de 0,0024, indicando alta proximidade da reta 1:1 (Figura 36).

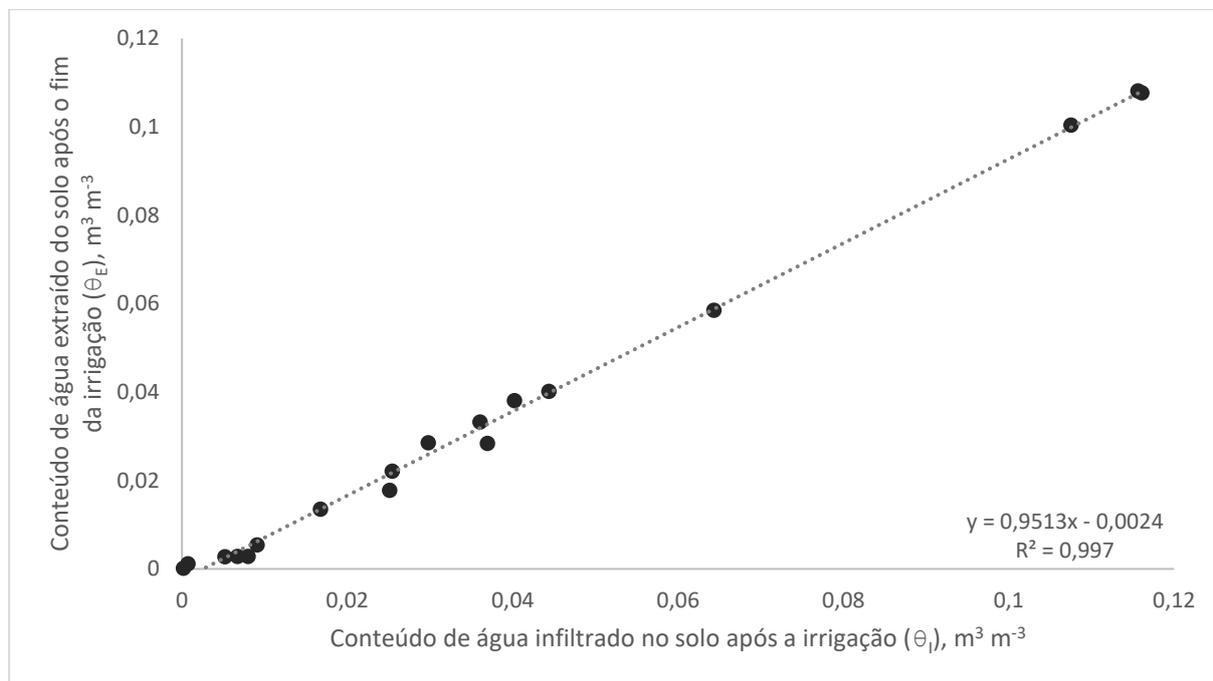


Figura 36. Relação entre os dados de infiltração e de extração de água no solo para cada um dos sensores TDR instalados no lisímetro cultivado com eucalipto irrigado por gotejamento.

Há na literatura estudos que indicam que há uma alta correlação positiva da distribuição de biomassa de raízes finas com o conteúdo de água no solo e a disponibilidade de nutrientes (Ochoa-Hueso et al., 2020; Saha et al., 2020), fato que pode influenciar a extração de água pelas culturas nos locais onde há maior disponibilidade de água. No caso da irrigação por gotejamento, principalmente de fonte pontual, isso ocorre em um volume limitado do solo.

Os valores de θ ao longo dos 6 ciclos de irrigação estão representados para cada distância e profundidade de monitoramento na Figura 37. Observam-se maiores variações em resposta à irrigação nas distâncias horizontais mais próximas do gotejador, sendo bastante efetiva em todas as profundidades na distância 0 m (R00). Essa variação vai reduzindo na mesma ordem da distância horizontal do gotejador (R15 > R20 > R30 > R40). Na distância R de 0,4 m, principalmente nas profundidades Z de 0,2 e 0,3 m, a variação do conteúdo de água no solo tornou-se bastante reduzida.

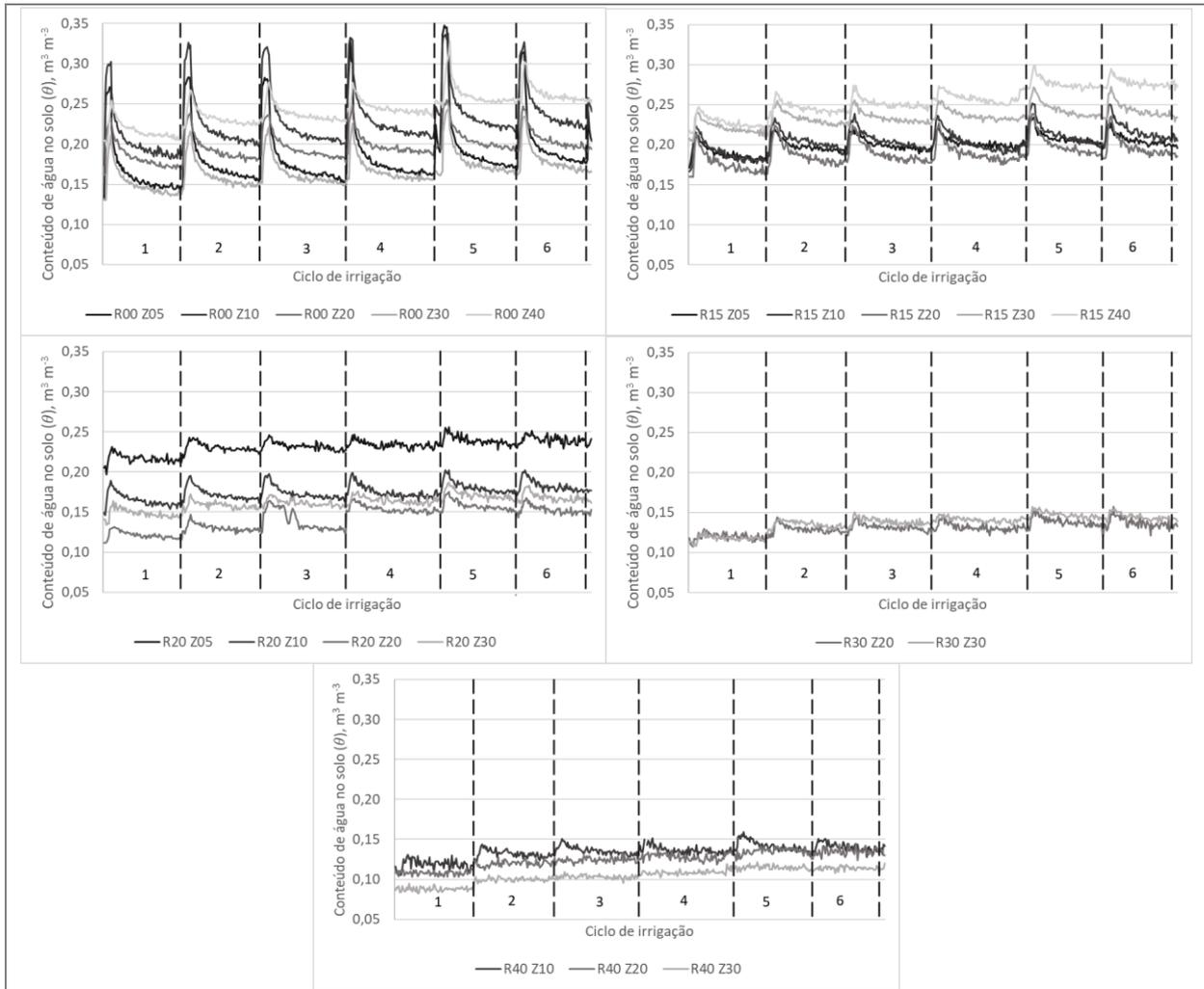


Figura 37. Conteúdo de água no solo nas distâncias e profundidades monitoradas do perfil do lisímetro de pesagem, durante 6 ciclos de irrigação em eucalipto.

A análise da amplitude de variação ($\Delta\theta$) média dos valores do conteúdo de água no solo para os ciclos de irrigação permitiram confirmar o que já foi apresentado, observou-se que $\Delta\theta$ diminui semelhante a um formato oval ao longo do perfil do solo, havendo uma tendência de maiores variações em profundidade por conta de o movimento da água no solo ocorrer, preferencialmente, na direção vertical, fato que torna o bulbo molhado mais próximo desse formato (Figura 38).

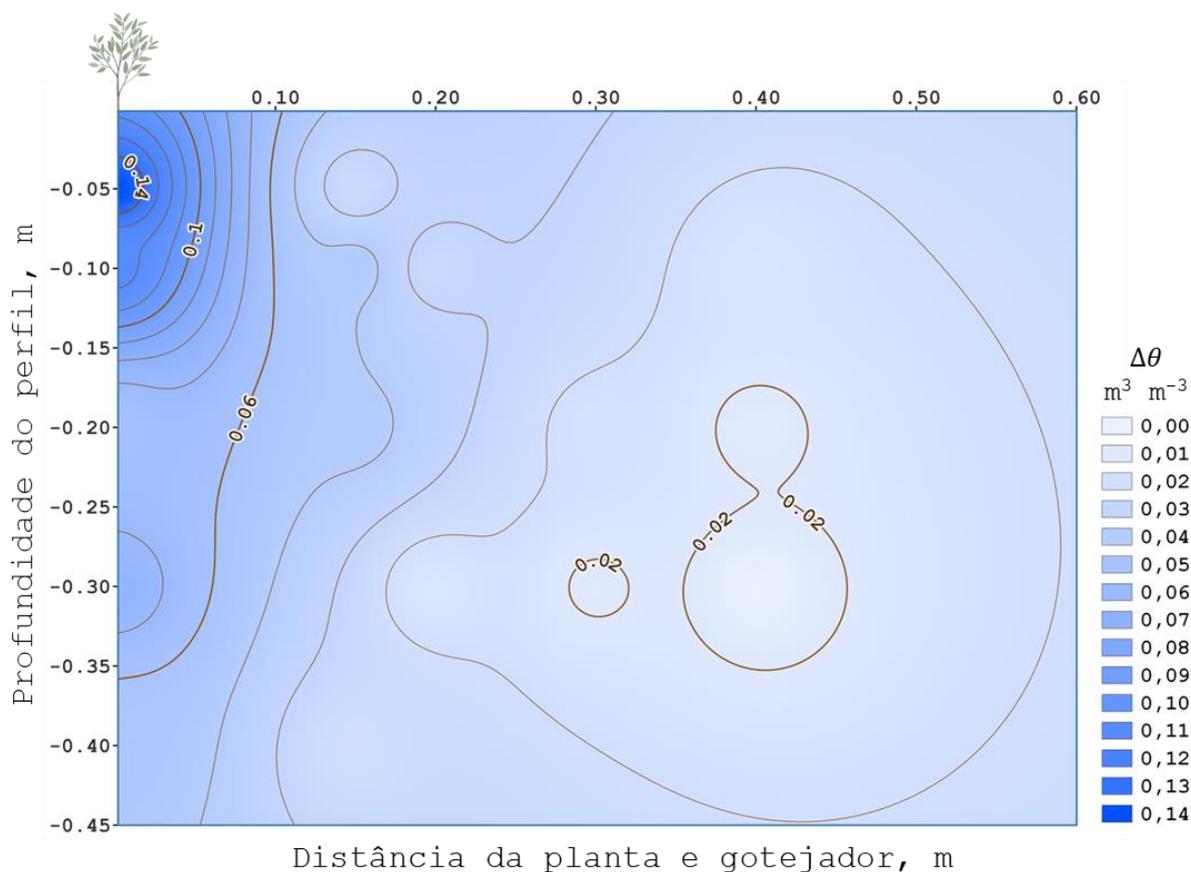


Figura 38. Amplitude de variação média do conteúdo de água no solo no perfil bidimensional para 6 ciclos de irrigação monitorados com as sondas TDR em eucalipto.

Evapotranspiração do eucalipto determinada por lisimetria e balanço de água no solo

Os resultados encontrados para a evapotranspiração de referência (ET_0), conforme FAO-56 Penman-Monteith, estão apresentados graficamente na Figura 39. Na análise descritiva dos dados observou-se uma média geral de $5,6 \pm 1,4 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e coeficiente de variação de 25,8 %. O valor máximo no período foi de 8,6 e o mínimo de $1,9 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$.

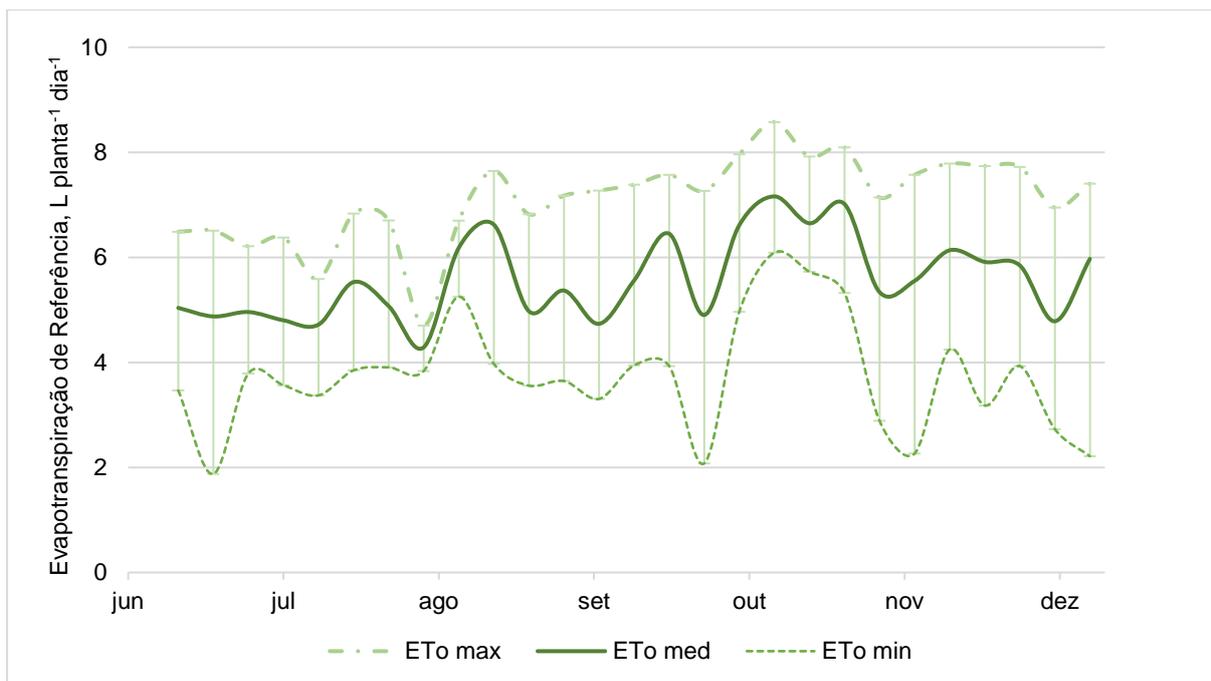


Figura 39. Evapotranspiração de Referência (ET_0) em valores semanais mínimos (min), médios (med) e máximos (max) medidos diariamente na estufa agrícola.

A ET_{CLP} apresentou uma média de $8,8 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e desvio padrão de $1,06 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ para um período contínuo de 12 semanas de cultivo, sendo que os valores variaram de $6,8$ até $10,6 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ (Figura 40). Observa-se que as maiores amplitudes de variação nos valores da ET_{CLP} encontradas corresponderam a mínima de $3,5 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e máxima de $13,2 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, acontecendo na mesma semana de medições.

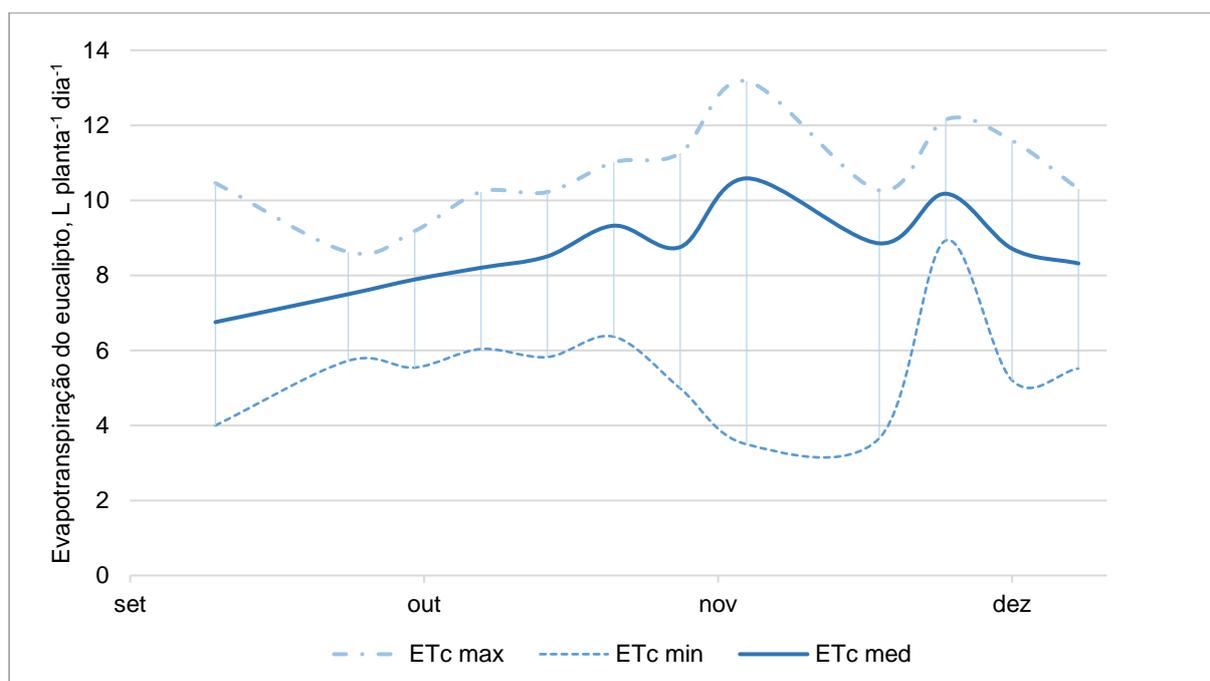


Figura 40. Evapotranspiração da cultura do eucalipto (ET_{cLP}) em valores semanais mínimos (min), médios (med) e máximos (max) medidos com base no lisímetro de pesagem.

Para os valores da evapotranspiração da cultura, calculados pelo balanço de água no solo (ET_c), levando em consideração todas as configurações estabelecidas (Tabela 15), encontrou-se, em média, o valor de $8,2 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e desvio padrão de $1,0 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. A mínima ficou em $4,9 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e a máxima em $13,7 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$.

De acordo com o teste F (Tabela 17) das análises de regressão realizadas entre a ET_{cLP} e cada configuração do BAS, cinco delas foram não significativas, ao nível de 5% de probabilidade, sendo, portanto, inválidas para determinar a ET_c . Dessas, a maioria foi de configuração unidimensional, entretanto, um deles foi tridimensional, ET_{c3D17} .

Tabela 17. Estatísticas descritivas da evapotranspiração de referência (ET_o) e do eucalipto (ET_c), L planta⁻¹ dia⁻¹, índices estatísticos e análise comparativa dos modelos de regressão da estimativa da ET_c pelo balanço de água no solo (BAS) utilizando sondas TDR nas configurações 1D, 2D e 3D.

Sigla	----- Estatística descritiva -----				----- Parâmetros e estatísticas do modelo de regressão linear -----							
	<i>ET</i> média	DP	Mínimo	Máximo	<i>a</i>	<i>b</i>	R^2	P-valor ¹	MAE	RMSE	CD	MSEP
ET_o	6,0	0,80	5,0	7,1	-	-	-	-	-	-	-	-
ET_{CLP}	8,8	1,06	6,8	10,6	-	-	-	-	-	-	-	-
ET_c 1E3	8,6	1,89	6,5	12,8	6,629	0,223	0,1580	0,0021 ^{ns}	-	-	-	-
ET_c 1E4	8,1	0,97	5,9	9,4	2,260	0,784	0,5090	0,1014*	0,635	0,781	0,931	0,803
ET_c 1E5	8,1	0,83	7,1	9,4	3,352	0,638	0,2504	0,3010*	0,741	0,965	1,355	0,986
ET_c 1A6	8,5	2,24	6,7	13,7	4,213	0,441	0,8027	0,0004 ^{ns}	-	-	-	-
ET_c 1A7	8,2	1,03	6,9	10,2	1,634	0,829	0,6522	0,4277*	0,503	0,657	1,015	0,426
ET_c 1A8	8,5	1,45	5,2	10,2	5,367	0,411	0,4180	0,0080 ^{ns}	-	-	-	-
ET_c 1A9	8,2	1,83	4,9	12,2	5,721	0,358	0,3813	0,0023 ^{ns}	-	-	-	-
ET_c 2E10	8,1	0,80	6,7	9,4	-0,206	1,064	0,6455	0,2724*	0,544	0,663	1,486	0,476
ET_c 2E11	8,1	0,90	6,3	9,5	0,474	0,987	0,6928	0,1681*	0,553	0,617	1,187	0,454
ET_c 2A12	8,1	1,01	6,8	10,5	2,670	0,718	0,4693	0,2347*	0,684	0,812	0,984	0,734
ET_c 2A13	8,1	0,91	6,9	9,9	1,757	0,826	0,5037	0,3550*	0,644	0,785	1,204	0,631
ET_c 2A14	8,0	0,92	6,6	9,7	1,646	0,848	0,5340	0,2189*	0,662	0,761	1,122	0,653
ET_c 3D15	8,1	0,96	7,0	10,0	1,063	0,914	0,6830	0,1912*	0,552	0,627	1,068	0,456
ET_c 3D16	8,1	0,90	7,0	9,7	0,548	0,980	0,6951	0,1435*	0,548	0,615	1,153	0,465
ET_c 3D17	8,0	0,89	6,6	9,7	0,117	1,042	0,7702	0,0391 ^{ns}	-	-	-	-
ET_c 3D18	8,1	0,97	6,8	9,9	1,026	0,925	0,7099	0,1026*	0,535	0,600	1,008	0,473
ET_c 3D19	8,1	0,94	6,8	9,7	0,629	0,974	0,7473	0,0757*	0,507	0,560	1,045	0,438
ET_c 3D20	8,1	0,91	6,4	9,6	1,010	0,922	0,6252	0,2148*	0,599	0,682	1,155	0,527

¹ Valor do teste F de nulidade conjunta dos parâmetros estimados em que $H_0: a = 0$ & $b = 1$ (Mayer et al., 1994); * Significativo ao nível de 5 % de probabilidade; ^{ns} Não significativo; DP: Desvio Padrão; *a*, *b* e R^2 : Coeficientes linear, angular e de determinação da regressão, respectivamente; MAE: Erro médio absoluto; RMSE: Raiz do erro médio quadrado; CD: Coeficiente de determinação do modelo; MSEP: Erro médio quadrado da predição.

Os valores encontrados para ET_c1A6 e ET_c1A8 apresentaram muitas falhas, o que foi mais um fato que justificou eliminá-las antes da análise conjunta com as demais configurações do BAS.

Os gráficos da regressão para os dados das configurações ET_c1E3 e ET_c3D17 , são apresentados na Figura 41, e na sequência (Figura 42), observam-se as regressões de quatro das configurações que apresentaram significância para o teste F e obtiveram os melhores resultados pelos demais parâmetros e estatísticas calculados, ET_c1A7 , ET_c2E11 , ET_c3D18 e ET_c3D19 .

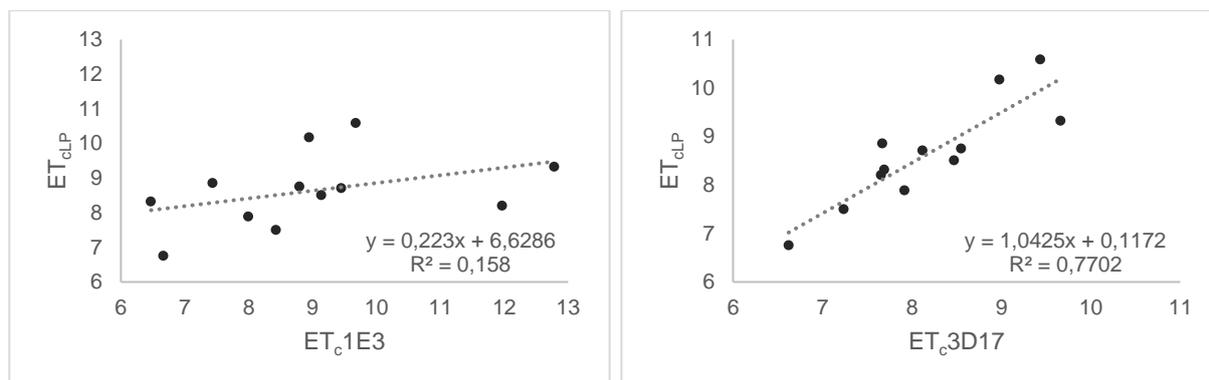


Figura 41. Modelos de regressão linear da evapotranspiração do eucalipto estimada por balanço de água no solo de configurações não significativas no teste F (Mayer et al., 1994), $L \text{ planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$.

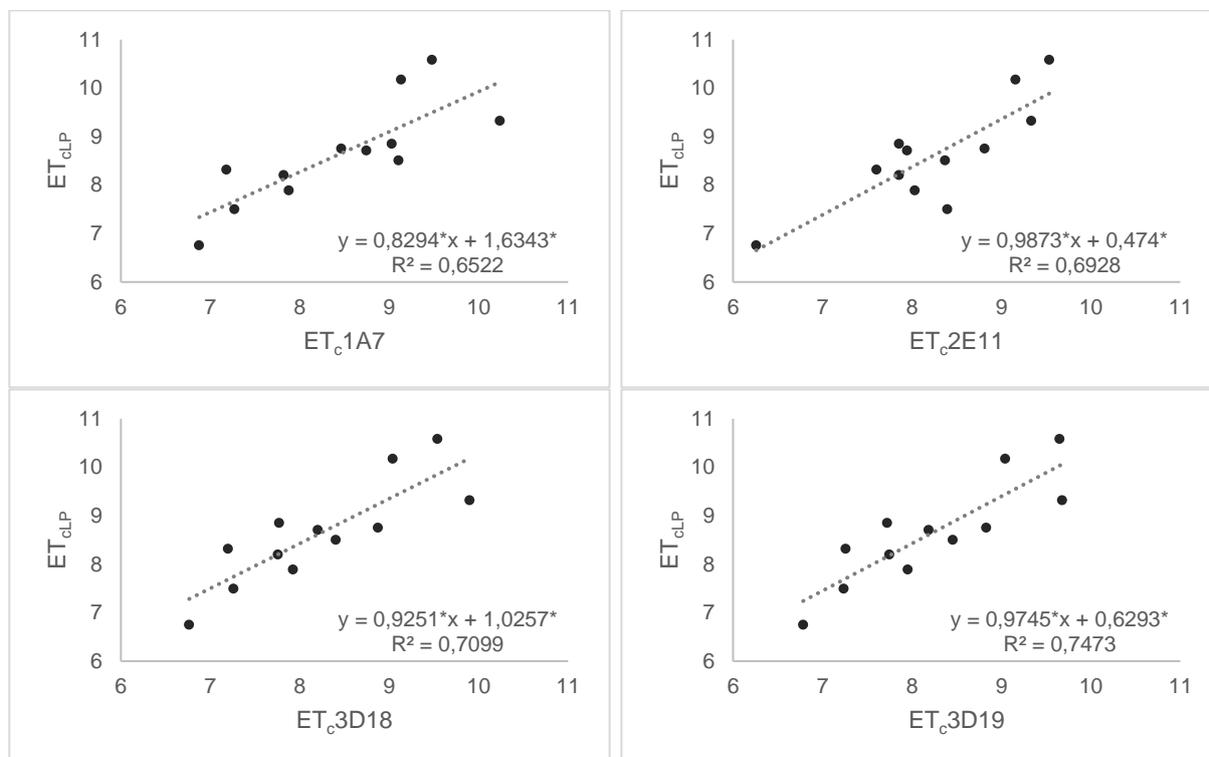


Figura 42. Modelos de regressão linear da evapotranspiração do eucalipto estimada por balanço de água no solo das configurações que obtiveram alta precisão e exatidão, $L \text{ planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$.

Vale destacar que a correlação entre os dados da configuração ET_c 3D17 e da ET_{CLP} apresentou 0,8027 para o coeficiente de determinação da regressão (R^2), sendo o mais elevado dentre todas, entretanto, foi a que obteve o menor P-valor do teste F (não significativo), isso indica que é possível estimar a ET_c com precisão próxima à ET_{CLP} , porém, há um risco muito alto de errar com esse monitoramento unidimensional (Tedeschi, 2006).

Justifica-se, dessa forma, o fato de que o R^2 não deve ser a única medida a ser levada em consideração nesse tipo de análise, pois não se busca apenas avaliar o quão forte é a correlação e nem apenas a precisão do ajuste, mas também o quão próximo está da reta 1:1, bem como a sua exatidão, tanto dos dados estimados, como das predições da equação de ajuste (Pasquel et al., 2022; Bennet et al., 2013; Tedeschi, 2006).

Observou-se que as regressões por abordagem 3D obtiveram valores mais adequados para a grande maioria das estatísticas e parâmetros avaliados, fato que pode ser associado ao grande número de sondas de monitoramento no perfil do solo, que ficou em torno de 23, necessários para estimar com maior precisão e exatidão a variação do θ , principalmente nas condições de cultivo irrigado por gotejamento do eucalipto, tendo em vista que a dinâmica da água no solo não é homogênea em toda a área de cultivo, varia rapidamente entre os ciclos de irrigação e a arquitetura espacial de distribuição das raízes do eucalipto apresenta um padrão heterogêneo e extremamente difícil de quantificar em condições de campo (Saha et al., 2020; Dabach et al., 2015; Casadesús et al., 2012; Coelho & Or, 2007).

Até mesmo a instalação da instrumentação para medir diretamente o θ pode interferir no padrão e na variabilidade espacial da dinâmica de infiltração/extração da água, bem como as próprias condições locais, como camadas de compactação e condições superficiais do solo (Subbaia, 2013).

Em relação ao R^2 e $RMSE$, as configurações que obtiveram valores mais adequados no ajuste da regressão com ET_{CLP} foram ET_c 3D19, ET_c 3D18 e ET_c 3D16. Dessas, o resultado da correlação com ET_c 3D19 obteve os melhores índices em praticamente todos os critérios de avaliação, exceto para CD , em que a regressão com ET_c 3D18 obteve o valor 1,008, sendo aquela que foi mais próxima do valor ideal (Tabela 16).

A configuração bidimensional utilizada na determinação da ET_c 2E11, que utilizou 10 sondas TDR instaladas a 0 e 0,2 m de distância horizontal (R) perpendicular (P_E) à linha do gotejador e nas cinco posições em profundidade (Z) do perfil (0,05, 0,1, 0,2, 0,3 e 0,4 m), quando comparada com a ET_{cLP} , obteve valores estatísticos satisfatórios na análise de regressão, ficando logo depois dos tridimensionais já citados.

Entre as 3 configurações de monitoramento 1D da água no solo, que proporcionaram valores semelhantes à LP e foram significativos na análise de regressão para o teste F, destacou-se a ET_c 1A7, que apresentava 5 sondas distribuídas na distância horizontal (R) paralela (P_A) de 0,15 m e obteve os menores valores de MAE , $MSEP$ e um valor muito próximo de 1 no CD . Essa precisão e exatidão na predição pode estar associada justamente à posição dessas sondas, estando na região que, provavelmente, representou melhor a média da variação do θ , gerando uma boa estimativa da ET_c .

Esse fato coloca em discussão a possibilidade de identificar uma posição ou região onde seria possível realizar o monitoramento do θ para estimativa da ET_c via BAS com precisão e exatidão utilizando poucos ou apenas um sensor em campo. Vários métodos têm sido desenvolvidos e descritos na literatura com essa finalidade (Nascimento et al., 2021; Silva et al., 2018; Soulis & Elmaloglou, 2018; Dabach et al., 2015; Subbaiah, 2013; Casadesús et al., 2012; Coelho & Or, 2007; Coelho et al., 2007; Fernández-Gálvez & Simmonds, 2006).

Os gráficos da Figura 43 relacionam os dados da ET_{cLP} com os da ET_c das configurações ET_c 1E3 e ET_c 3D19, permitindo observar o contraste entre as curvas ao longo das semanas de medição, com dispersão muito maior nos resultados da configuração unidimensional.

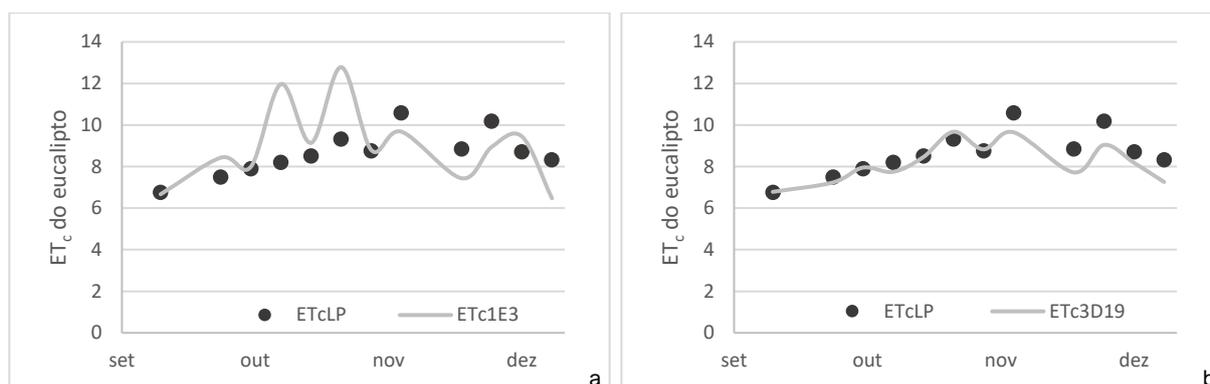


Figura 43. Dispersão dos dados semanais de evapotranspiração do eucalipto estimados por BAS, para a configuração 1D (a) e 3D (b), $L\ planta^{-1}\ dia^{-1}$.

O resumo mensal da evapotranspiração de referência e das evapotranspirações do eucalipto, calculadas pela LP e pelo BAS de quatro das configurações que tiveram resultados estatísticos adequados para a estimativa da ET_c é apresentado na Tabela 18. O coeficiente de cultura (K_c) para cada mês foi calculado e demonstrado entre parênteses.

Tabela 18. Valores médios mensais da evapotranspiração de referência (ET_o), da evapotranspiração do eucalipto pelos métodos da lisimetria de pesagem (ET_{cLP}) e do balanço de água no solo (ET_c) e do coeficiente de cultura (K_c).

Mês após transplante	ET_o	ET_{cLP}	ET_c1A7	ET_c2E11	ET_c3D18	ET_c3D19
	----- $L\ planta^{-1}\ dia^{-1}\ (K_c)$ -----					
4	5,9	6,9 (1,18)	7,0 (1,19)	7,3 (1,24)	7,1 (1,20)	7,1 (1,21)
5	6,5	8,9 (1,36)	8,8 (1,35)	8,7 (1,33)	8,8 (1,34)	8,7 (1,34)
6	5,7	9,8 (1,71)	8,4 (1,47)	8,0 (1,40)	8,1 (1,41)	8,1 (1,41)
7	5,3	9,8 (1,86)	8,6 (1,64)	8,7 (1,65)	8,5 (1,61)	8,5 (1,61)
Média	6,0	8,8 (1,47)	8,2 (1,37)	8,1 (1,35)	8,1 (1,35)	8,1 (1,35)

Na média, a ET_{cLP} ficou em $8,8\ L\ planta^{-1}\ dia^{-1}$ e o K_c em 1,47, nas condições desse experimento. Já a ET_c considerando as 4 configurações, apresentou uma média de $8,1\ L\ planta^{-1}\ dia^{-1}$ e K_c de 1,35.

O coeficiente de cultivo, em todos os casos, foi crescente até o sétimo mês após o transplante, fato atribuído ao crescimento das árvores e das raízes do eucalipto que passaram a aumentar a demanda hídrica, associada às variações climáticas.

A evapotranspiração foi contabilizada para todos os meses de cultivo, resultando em 1205,7 litros para a ET_{cLP} e 1198,8 litros para a ET_c3D19 . A biomassa seca do fuste da árvore foi de 704,4 g, resultando em uma eficiência de uso da água de 0,584 e 0,588 $g\ L^{-1}$, respectivamente, ou seja, praticamente iguais. Demonstrando

que a ET_c estimada por BAS 3D pode ser aplicada em eucalipto irrigado por gotejamento com precisão e exatidão satisfatórios.

Conclusões

O monitoramento do conteúdo de água no solo indicou alta variabilidade espaço-temporal nos processos de infiltração/extração de água em eucalipto irrigado por gotejamento, com fluxo predominantemente vertical.

Observou-se variação em todas as distâncias horizontais do emissor/caule da planta e profundidades monitoradas nos ciclos de irrigação.

As configurações com utilização de sondas de monitoramento do conteúdo da água no solo instaladas tridimensionalmente (3D) tiveram maior precisão e acurácia nas estimativas, quando comparados aos bidimensionais (2D) e unidimensionais (1D), para irrigação por gotejamento de fonte pontual.

Referências

Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; & Smith, M. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). **FAO Irrigation and Drainage Paper n.º 56**. Rome: FAO, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

Al-Ogaidi, A. A.; Wayayok, A.; Rowshon, M. K.; Abdullah, A. F. The influence of magnetized water on soil water dynamics under drip irrigation systems. **Agricultural Water Management**, v. 180, p. 70-77, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.11.001>.

Bahia, Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais. **Balanço hídrico do Estado da Bahia**. Salvador: SEI. Série Estudos e Pesquisas, v. 45, 1999. 250p.

Bennett, N. D.; Croke, B. F.; Guariso, G.; Guillaume, J. H.; Hamilton, S. H.; Jakeman, A. J.; Marsili-Libelli, S.; Newham, L. T. H.; Norton, J. P.; Perrin, C.; Pierce, S. A.; Robson, B.; Seppelt, R.; Voinov, A. A.; Fath, B. D.; Andreassian, V. Characterising performance of environmental models. **Environmental modelling & software**, v. 40, p. 1-20, 2013. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.011>.

Casadesús, J.; Mata, M.; Marsal, J.; Girona, J. A general algorithm for automated scheduling of drip irrigation in tree crops. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 83, p. 11-20, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.01.005>.

Coelho, E. F. & Or, D. Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. **Transactions of the ASAE**, v. 39, n. 6, p. 2007-2016, 1996. doi: <https://doi.org/10.13031/2013.27703>.

Coelho, E. F.; Santos, D. B. D.; Azevedo, C. A. Sensor placement for soil water monitoring in lemon irrigated by micro sprinkler. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 46-52, 2007. doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000100006>.

Dabach, S.; Shani, U.; Lazarovitch, N. Optimal tensiometer placement for high-frequency subsurface drip irrigation management in heterogeneous soils. **Agricultural Water Management**, v. 152, p. 91-98, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.003>.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Global Forest Resources Assessment 2020: Main report**. Rome: FAO. 2020. 186 p. doi: <https://doi.org/10.4060/ca9825en>.

Fernández, J. E.; Alcon, F.; Diaz-Espejo, A.; Hernandez-Santana, V.; Cuevas, M. V. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. **Agricultural water management**, v. 237, p. 106074, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106074>.

Fernández, M. D.; Bonachela, S.; Orgaz, F.; Thompson, R.; López, J. C.; Granados, M. R.; Gallardo, M.; Fereres, E. Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. **Irrigation science**, v. 28, p. 497-509, 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-010-0210-z>.

Fernández-Gálvez, J. & Simmonds, L. P. Monitoring and modelling the three-dimensional flow of water under drip irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 83, n. 3, p. 197-208, 2006. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.11.008>.

Ferraz, S. D. B.; Rodrigues, C. B.; Garcia, L. G.; Alvares, C. A.; Lima, W. P. Effects of *Eucalyptus* plantations on streamflow in Brazil: moving beyond the water use debate.

Forest Ecology and Management, v. 453, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117571>.

Frizzone, J. A.; Freitas, P. S. L.; Rezende, R.; Faria, M. A. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. Maringá: Eduem, 2012. 356 p.

Gonçalves, J. L. M.; Alvares, C. A.; Souza, A. H. B. N.; Arthur Junior, J. C. Caracterização Edafoclimática e Manejo de Solos das Áreas com Plantações de Eucalipto. In: Schumacher, M. V.; Viera, M. (Ed.). **Silvicultura do Eucalipto no Brasil**. Santa Maria: Fundação de Apoio a Tecnologia e Ciência-Editora UFSM, 2015. Cap. 4, p. 113-156.

Gong, X.; Liu, H.; Sun, J.; Gao, Y.; Zhang, X.; Jha, S. K.; Zhang, H.; Ma, X.; Wang, W. A proposed surface resistance model for the Penman-Monteith formula to estimate evapotranspiration in a solar greenhouse. **Journal of Arid Land**, v. 9, p. 530-546, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s40333-017-0020-8>.

Gong, X.; Wang, S.; Xu, C.; Zhang, H.; Ge, J. Evaluation of several reference evapotranspiration models and determination of crop water requirement for tomato in a solar greenhouse. **HortScience**, v. 55, n. 2, p. 244-250, 2020. doi: <https://doi.org/10.21273/hortsci14514-19>.

Hakamada, R. E.; Hubbard, R. M.; Stape, J. L.; de Paula Lima, W.; Moreira, G. G.; de Barros Ferraz, S. F. (2020). Stocking effects on seasonal tree transpiration and ecosystem water balance in a fast-growing Eucalyptus plantation in Brazil. **Forest Ecology and Management**, 466, 118149. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118149>.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Ibá 2022**. São Paulo: Instituto Brasileiro de Economia (IBRE), da Fundação Getúlio Vargas (FGV), 2022. 96 p.

Jardim, A. M. D. R. F.; Silva, T. G. F.; Souza, L. S. B.; Alves, H. K. M. N.; Araújo, J. F. N.; Silva, G. I. N.; Silva, J. O. N. Dinâmica da água no solo com cultivo de palma forrageira sob quatro sistemas de plantio. **Agrometeoros**, v. 27, n. 2, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v27i2.26446>.

Libardi, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2.ed. São Paulo, EDUSP, 2012. 352p.

LIMA, W. de P.; FREIRE, O. Evapotranspiração em plantações de eucalipto e de pinheiro e em vegetação herbácea natural. IPEF, v. 13, p. 75-90, 1976.

Mayer, D. G.; Stuart, M. A.; Swain, A. J. Regression of real-world data on model output: an appropriate overall test of validity. **Agricultural Systems**, v. 45, n. 1, p. 93-104, 1994. doi: [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(94\)90282-8](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(94)90282-8).

Minhas, P. S.; Yadav, R. K.; Lal, K.; Chaturvedi, R. K. Effect of long-term irrigation with wastewater on growth, biomass production and water use by Eucalyptus (*Eucalyptus tereticornis* Sm.) planted at variable stocking density. **Agricultural Water Management**, v. 152, p. 151-160, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.009>.

Monteith, J. L. Evaporation and environment. In: **Symposia of the society for experimental biology**, 19th. Cambridge University Press (CUP) Cambridge, 1965. p. 205-234.

Mualem, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, **Water Resources Research**, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976. doi: <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>.

Nascimento, F. A. L.; Silva, A. J. P.; Freitas, F. T. O.; Veimrober Junior, L. A. D. A. Sensor placement in 2D/3D wetting patterns from drip irrigation for quantification of evapotranspiration. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 188, p. 106356, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106356>.

Ochoa-Hueso, R.; Piñeiro, J.; Power, S. A. Spatial distribution of fine root biomass in a remnant Eucalyptus tereticornis woodland in Eastern Australia. **Plant Ecology**, v. 221, p. 55-62, 2020. doi: <https://doi.org/10.1007/s11258-019-00990-5>.

Oogathoo, S.; Houle, D.; Duchesne, L.; Kneeshaw, D. Vapour pressure deficit and solar radiation are the major drivers of transpiration of balsam fir and black spruce tree species in humid boreal regions, even during a short-term drought. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 291, p. 108063, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108063>.

Pasquel, D.; Roux, S.; Richetti, J.; Cammarano, D.; Tisseyre, B.; Taylor, J. A. A review of methods to evaluate crop model performance at multiple and changing spatial scales. **Precision Agriculture**, v. 23, n. 4, p. 1489-1513, 2022. doi: <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09885-4>.

Penman, H. L. Estimating evaporation. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 37, n. 1, p. 43-50, 1956. doi: <https://doi.org/10.1029/TR037i001p00043>.

Reichert, J. M.; Prevedello, J.; Gubiani, P. I.; Vogelmann, E. S.; Reinert, D. J.; Consensa, C. O. B.; Soares, J. C. W.; Srinivasan, R. Eucalyptus tree stockings effect on water balance and use efficiency in subtropical sandy soil. **Forest Ecology and Management**, v. 497, p. 119473, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119473>.

Ryan, M. G.; Stape, J. L.; Binkley, D.; Alvares, C. A. Cross-site patterns in the response of *Eucalyptus* plantations to irrigation, climate and intra-annual weather variation. **Forest Ecology and Management**, v. 475, p. 118444, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118444>.

Saha, R.; Ginwal, H. S.; Chandra, G.; Barthwal, S. Root distribution, orientation and root length density modelling in Eucalyptus and evaluation of associated water use efficiency. **New Forests**, v. 51, p. 1023-1037, 2020. doi: <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09772-8>.

Silva, A. J. P.; Coelho, E. F.; Coelho Filho, M. A. Water extraction variability in the banana root zone affects the reliability of water balance. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 1, p. 1-10, 2015. doi: <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0003>.

Silva, A. J. P.; Coelho, E. F.; Coelho Filho, M. A.; Souza, J. L. D. Water extraction and implications on soil moisture sensor placement in the root zone of banana. **Scientia Agricola**, v. 75, p. 95-101, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0339>.

Silva, A. J. P.; Coelho, E. F.; Miranda, J. H.; Workman, S. R. Estimating water application efficiency for drip irrigation emitter patterns on banana. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 730-737, 2009. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000700013>.

Silva, A. J. P.; Coelho, E. F.; Miranda, J. H. Efficiency of water application of irrigation systems based on microsprinkling in banana plantations. **Scientia Agricola**, v. 70, p. 139-146, 2013. doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000300001>.

Šimůnek, J.; Van Genuchten, M.; Sejna, M. Recent developments and applications of the Hydrus computer software packages. **Vadose Zone Journal**, v. 15 n. 7, p. 1-25, 2016. doi: <https://doi.org/10.2136/vzj2016.04.0033>.

Soulis, K. X. & Elmaloglou, S. Optimum soil water content sensors placement for surface drip irrigation scheduling in layered soils. **Computers and electronics in agriculture**, v. 152, p. 1-8, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.052>.

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: <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.020>.

Stape, J. L.; Binkley, D.; Ryan, M. G.; Fonseca, S.; Loos, R. A.; Takahashi, E. N.; Silva, C. R.; Silva, S. R.; Hakamada, R. E.; Ferreira, J. M. A.; Lima, A. M. N.; Gava, J. L.; Leite, F. P.; Andrade, H. B.; Alves, J. M.; Silva, G. G. C.; Azevedo, M. R. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1684-1694, 2010. doi: <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.012>.

Subbaiah, R. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. **Irrigation Science**, v. 31, n. 3, p. 225-258, 2013. doi: <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0309-x>.

Tanny, J. Microclimate and evapotranspiration of crops covered by agricultural screens: A review. **Biosystems Engineering**, v. 114, n. 1, p. 26-43, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.10.008>.

Tedeschi, L. O. Assessment of the adequacy of mathematical models. **Agricultural systems**, v. 89, n. 2-3, p. 225-247, 2006. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.11.004>.

Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

Van Genuchten, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980. Ddoi: <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.

Vellame, L. M.; Coelho Filho, M. A.; Paz, V. P. Transpiração em mangueira pelo método Granier. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 516-523, 2009. doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000500002>.

Wallach, D.; Martre, P.; Liu, B.; Asseng, S.; Ewert, F.; Thorburn, P. J.; van Ittersum, M.; Aggarwal, P. K.; Ahmed, M.; Basso, B.; Biernath, C.; Cammarano, D.; Challinor, A. J.; De Sanctis, G.; Dumont, B.; Rezaei, E. E.; Fereres, E.; Fitzgerald, G. J.; Garcia-Vila, M.; Gayler, S.; Girousse, C.; Hoogeboom, G.; Horam, H.; Izaurrealde, R. C.; Jones, C. D.; Kassie, B. T.; Kersebaum, K. C.; Klein, C.; Koehler, A-K.; Maiorano, A.; Minoli, S.; Müller, C.; Kumar, S. N.; Nendel, C.; O'Leary, G. J.; Palosuo, T.; Priesack, E.; Ripoche, D.; Rötter, R. P.; Semenov, M. A.; Stöckle, C.; Stratonovitch, P.; Streck, T.; Supit, I.; Tao, F.; Wolf, J.; Zhang, Z. Multimodel ensembles improve predictions of crop–environment–management interactions. **Global change biology**, v. 24, n. 11, p. 5072-5083, 2018. doi: <https://doi.org/10.1111/gcb.14411>.

Wang, Z.; Liu, S.; Xu, Y.; Zhu, W.; Du, A. Differences in Transpiration Characteristics among *Eucalyptus* Plantations of Three Species on the Leizhou Peninsula, Southern China. **Forests**, v. 13, n. 10, p. 1544, 2022. <https://doi.org/10.3390/f13101544>.

White, D. A.; McGrath, J. F.; Ryan, M. G.; Battaglia, M.; Mendham, D. S.; Kinal, J.; Downes, G. M.; Crombie, D. S.; Hunt, M. E. Managing for water-use efficient wood production in *Eucalyptus globulus* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 331, p. 272-280, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2014.08.020>.

Whitehead, D.; Beadle, C. L. Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. **Forest ecology and management**, v. 193, n. 1-2, p. 113-140, 2004. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.026>.

Yan, H.; Zhang, C.; Gerrits, M. C.; Acquah, S. J.; Zhang, H.; Wu, H.; Zhao, B.; Huang, S.; Fu, H. Parametrization of aerodynamic and canopy resistances for modeling evapotranspiration of greenhouse cucumber. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 262, p. 370-378, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.07.020>.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos desenvolvidos nessa tese apresentaram alta relevância para a comunidade científica da área de silvicultura do eucalipto e manejo do solo e da água. A avaliação de clones comerciais de eucalipto em condições de estresse abiótico, como no caso do déficit hídrico, é fundamental para a busca de novas áreas menos favoráveis em quantidade e regularidade das chuvas para a exploração sustentável dessa cultura. Além disso, contribui com a busca de alternativas aos problemas advindos das tendências observadas em relação às mudanças climáticas, como o aumento da temperatura, a redução da precipitação e secas mais prolongadas.

O clone de *Eucalyptus urophylla* (UP1) obteve o melhor desempenho para as variáveis analisadas em todas as faixas de disponibilidade de água no solo, podendo ser indicado como aquele que foi mais tolerante ao déficit hídrico nas condições do experimento. Entretanto, seria interessante avaliar os clones em experimento com déficit hídrico progressivo, para identificar aqueles que de fato poderiam suportar as condições de maior deficiência hídrica em campo, com maior índice de sobrevivência.

O uso do lisímetro de lençol freático de carga constante foi uma importante ferramenta nas análises. Os resultados demonstraram que a disponibilidade hídrica nesse tratamento garantiu crescimento e produtividade das árvores do eucalipto superiores às dos tratamentos irrigados.

A produtividade da água para a produção de biomassa seca do fuste ($BSFu$) foi maior na condição da faixa de potencial matricial da água no solo (ψ) *alta*, observou-se um consumo de água muito semelhante com o tratamento irrigado na faixa de ψ *média*, que buscou manter o solo na capacidade de campo (CC), que é um parâmetro muito utilizado como referência para garantir a máxima produtividade das culturas em geral, entretanto, a produção de $BSFu$ foi muito superior na faixa de ψ *alta*.

Esses resultados indicaram que a irrigação por gotejamento de fonte pontual com um emissor, manejada para manter o ψ em faixa próxima à CC, não foi suficiente para extrair o máximo potencial produtivo do eucalipto durante a fase inicial de crescimento. Portanto, são necessários estudos para avaliar sistemas de irrigação localizada que se adequam melhor às exigências hídricas do eucalipto, como por exemplo, a microaspersão, o gotejamento de fonte pontual com dois emissores, o gotejamento de fonte linear e o gotejamento subsuperficial.

Os estudos indicaram alta variabilidade espaço-temporal da dinâmica de água no solo em eucalipto irrigado por gotejamento, exigindo que o monitoramento do conteúdo de água no solo (θ) seja feito utilizando abordagem multidimensional (2D/3D) visando a estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c) pelo método do balanço de água no solo (BAS) com maior precisão e exatidão.

Outro aspecto relevante e que pode ter influência sobre a variabilidade espaço-temporal, principalmente, dos processos de extração de água, corresponde à arquitetura e distribuição das raízes do eucalipto, tendo em vista que a literatura apresenta estudos que encontraram correlações significativas de características desse compartimento da planta com as condições de disponibilidade e/ou conteúdo de água nos solos.

Apesar dos resultados indicarem a necessidade da abordagem multidimensional, é possível que novos estudos permitam definir posições no perfil do solo para a instalação de apenas um sensor (ou poucos) de medição do θ que seja representativo para a estimativa da extração média de água do solo e que apresente alta correlação com a ET_c , quando calculada pelo BAS.

Torna-se necessário realizar mais estudos para estimativa da ET_c do eucalipto pelo método do BAS em condições de campo durante todo o seu ciclo rotacional, com o objetivo de propor estratégias de manejo da água no solo, bem como, critérios para promover a irrigação de forma economicamente sustentável.

O método experimental apresentado nessa tese pode ser replicado em programas de melhoramento genético florestal (PMGF) visando a avaliação precoce de genótipos integrada ao estudo para seleção de biomarcadores moleculares com base nos resultados encontrados, principalmente os das variáveis de status hídrico e dos compartimentos relativizados da planta.

Observou-se que a maioria dos trabalhos científicos realizados em estufa agrícola de PMGF utilizou vaso com volume muito pequeno de solo, limitando o crescimento do eucalipto, o que reduz o tempo, a idade e pode até interferir nos resultados das análises das variáveis. A utilização de estruturas com maior volume de solo para o desenvolvimento das raízes e da planta em ambiente controlado foi mais um item que se mostrou bastante promissor nesse estudo.

Estudos complementares, utilizando estrutura de pesquisa semelhante, devem incluir variáveis fisiológicas, como fotossíntese, fluorescência da clorofila, temperatura foliar, condutância estomática, fluxo de seiva e umidade do caule, por conta de trazerem mais informações relacionadas ao comportamento do eucalipto frente às condições de disponibilidade hídrica impostas e que também podem ser utilizadas por PMGF na seleção de biomarcadores moleculares de genótipos potenciais.

Por fim, pode-se afirmar que os objetivos da pesquisa foram atingidos, permitindo a seleção dos clones com maior desempenho nas variáveis analisadas em cada faixa de ψ a que foram submetidos. As respostas foram estudadas por meio dos testes e correlações estatísticas que contribuíram para o entendimento da influência das diferentes faixas de ψ sobre as variáveis de crescimento, produção, status hídrico e produtividade da água na produção de biomassa seca do fuste. Além disso, com já colocado, observou-se que a variabilidade espaço-temporal do θ , por ser heterogênea em irrigação por gotejamento, influenciou os cálculos da ET_c do eucalipto por BAS, exigindo abordagem multidimensional para sua estimativa com precisão e exatidão satisfatórios.