

ALINE SANTANA DE OLIVEIRA

**OTIMIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA NA PRODUÇÃO DE
MUDAS CLONAIS DE EUCALYPTUS**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2012

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

048o
2012

Oliveira, Aline Santana de, 1985-

Otimização do uso da água na produção de mudas clonais
de Eucalyptus / Aline Santana de Oliveira. – Viçosa, MG,
2012.

xii, 84f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Aristides Ribeiro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Evapotranspiração. 2. Lisímetro. 3. Eucalipto - Mudas.
4. Água - Consumo. 5. Estufas para cultivo. I. Universidade
Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 551.572

ALINE SANTANA DE OLIVEIRA

**OTIMIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA NA PRODUÇÃO DE
MUDAS CLONAIS DE EUCALYPTUS**

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

APROVADA: 17 de fevereiro de 2012.




Fernando Palha Leite



Aloísio Xavier



Sérgio Zolnier
(Coorientador)



Aristides Ribeiro
(Orientador)

DEDICO

*Ao meu amor, Marcelo.
Aos meus pais, Jorge e Lourdinha.
À minha irmã Daniela.*

*Impossível é apenas uma grande palavra usada por gente fraca,
que prefere viver no mundo como está
ao invés de usar o poder que tem para mudá-lo.
Impossível não é um fato, é uma opinião.
Impossível não é uma declaração, é um desafio.
Impossível é hipotético.
Impossível é temporário.*

Mohamed Ali

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar saúde, proteção e força.

Aos meus pais, Jorge e Lourdinha, pelo amor e educação oferecida em todos os momentos. Agradeço à minha mãe, pelas orações, pelo cuidado e por abrir mão dos seus sonhos para conceder-nos uma educação de qualidade. Ao meu pai, pelas sábias palavras e ensinamentos.

À minha irmã Daniela, pela amizade, companheirismo e amor.

Ao meu marido Marcelo, pelo amor, carinho, paciência e por estar sempre ao meu lado.

Ao Geraldinho, Fátima, Maria, Dudu e Simone, pelos momentos de alegria e por me acolherem em sua família.

Às minhas amigas de Viçosa, pelos momentos de descontração.

À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de realização do curso.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola.

Ao professor Aristides Ribeiro, pela orientação, ensinamentos, paciência e pela confiança. Também agradeço à sua esposa Ana Paula Granato, pela oportunidade a mim oferecida há alguns anos atrás e que permitiram que eu chegasse até aqui.

Ao professor Sérgio Zolnier, pela paciência, atenção e ensinamentos durante sua coorientação.

Ao professor Antônio José Steidle Neto, da Universidade Federal de São João Del Rei, pelo incentivo, contribuições e pela oportunidade de trabalharmos juntos.

Aos amigos do Grupo de Pesquisas Biomodel: Aloísio, André, Carla, José Eduardo, Jorge, Luiz Felipe, Mariana, Mariano, Maria Helena, Nilton, Robert, Robson, Valéria, Welliam e Yhasmin.

Aos secretários do Programa de Pós Graduação em Meteorologia Agrícola, Claudenilson e Graça, pela amizade, paciência e apoio. Também agradeço à Letícia, pela amizade, alegria e otimismo em todos os momentos.

À empresa Celulose Nipo-Brasileira S.A., pela concessão das estacas de eucalipto, necessárias à realização desta pesquisa e por todo o apoio fornecido.

À empresa Desenvoltec, pelo auxílio no desenvolvimento do programa computacional utilizado neste trabalho.

Ao Viveiro de Pesquisas pertencente ao Departamento de Engenharia Florestal, especialmente ao Prof. Aloísio Xavier, Alex Freitas, Sr. Sebastião e Geraldo Magela.

Aos amigos e colegas do Programa de Pós Graduação em Meteorologia Agrícola.

À Capes e a Fapemig, pela concessão das bolsas de estudo.

Às pessoas que, direta ou indiretamente, permitiram e torceram para que este trabalho fosse executado.

BIOGRAFIA

Aline Santana de Oliveira, filha de Jorge Lopes da Silva Oliveira e Maria de Lourdes Santana Castro, nasceu em 23 de abril de 1985, em Viçosa, Minas Gerais.

Em março de 2005, ingressou no curso de Agronomia, na Universidade Federal de Viçosa (UFV), graduando-se em dezembro de 2009.

Em março de 2010, iniciou o curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, defendendo a dissertação em fevereiro de 2012.

SUMÁRIO

RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	3
CAPÍTULO 1. MODELAGEM DO CRESCIMENTO DE MUDAS DE EUCALIPTO COM BASE NO TEMPO TÉRMICO	4
1.1. INTRODUÇÃO	4
1.2. MATERIAL E MÉTODOS	7
1.2.1. Caracterização do sistema de produção de mudas	7
1.2.2. Monitoramento do crescimento das mudas	9
1.2.3. Análise da qualidade das mudas de eucalipto	9
1.2.4. Determinação da soma térmica para produção de mudas de eucalipto	10
1.2.5. Desenvolvimento e validação de modelos de crescimento para mudas de eucalipto	12
1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
1.4. CONCLUSÕES	31
1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
CAPÍTULO 2. DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DE UM MINILISÍMETRO DE PESAGEM PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE MUDAS DE EUCALIPTO EM AMBIENTE PROTEGIDO	35
2.1. INTRODUÇÃO	35
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	36
2.2.1. Construção e instalação do minilímetro	36
2.2.2. Aquisição dos dados	38
2.2.3. Calibração do minilímetro	39
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40

2.4. CONCLUSÕES	42
2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
CAPÍTULO 3. DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NAS DIVERSAS FASES DE PRODUÇÃO DE MUDAS DE EUCALIPTO	45
3.1. INTRODUÇÃO	45
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	47
3.2.1. Cálculo da evapotranspiração	48
3.2.1.1. Cálculo da massa ideal	48
3.2.1.1.1. Massa das mudas.....	48
3.2.1.1.2. Massa da bandeja	49
3.2.1.1.3. Massa do conjunto tubete/substrato/água retida nos microporos.....	50
3.2.1.1.4. Massa da água interceptada pelas folhas e pela bandeja.....	51
3.2.1.2. Cálculo da massa atual	52
3.2.2. Manejo da irrigação.....	53
3.2.3. Rotina de cálculo.....	54
3.2.4. Estimativa da evapotranspiração a partir de variáveis meteorológicas externas ..	55
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
3.3.1. Características físicas do substrato.....	55
3.3.2. Consumo hídrico	55
3.3.2.1. Enraizamento.....	56
3.3.2.2. Aclimação.....	61
3.3.2.3. Crescimento.....	67
3.3.2.4. Rustificação.....	73
3.4. CONCLUSÕES	81
3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
CONCLUSÕES GERAIS	84

RESUMO

OLIVEIRA, Aline Santana de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2012. **Otimização do uso da água na produção de mudas clonais de Eucalyptus.** Orientador: Aristides Ribeiro. Coorientador: Sérgio Zolnier.

O Brasil detém 11,6% de toda a água doce existente no planeta, sendo que 67% da água disponível é utilizada na agricultura. Verifica-se que o uso indiscriminado desse recurso tem gerado discussões quanto ao alcance de um desenvolvimento sustentável para o país. O eucalipto é uma espécie de uso múltiplo que apresenta rápido crescimento e alta produtividade, por ser adaptado às condições climáticas do Brasil. Para elevar a produtividade da cultura no campo, o processo de produção das mudas deve ser realizado propiciando condições hídricas, nutricionais, microclimáticas e sanitárias adequadas. A presente pesquisa teve como objetivos realizar a modelagem do crescimento das mudas de eucalipto em função do tempo térmico, desenvolver e calibrar um minilímetro de pesagem para utilização em ambiente protegido e determinar a evapotranspiração de mudas de eucalipto em todas as fases de produção (enraizamento, aclimação, crescimento e rustificação). O experimento foi conduzido no Viveiro de Pesquisas do Departamento de Engenharia Florestal, pertencente à Universidade Federal de Viçosa. Foram realizados dois ciclos de produção de mudas de eucalipto (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*), sendo que no primeiro o manejo da irrigação foi realizado de acordo com o convencionalmente utilizado pelo viveiro. No segundo ciclo de produção a irrigação foi acionada em função da demanda hídrica na cultura. Além da determinação da biomassa fresca e seca das mudas, com periodicidade de 3 dias, foram realizadas medidas biométricas das mudas de eucalipto, nas quais foram mensuradas a área foliar, altura da parte aérea, diâmetro do colo e comprimento do sistema radicular. Posteriormente, foi determinada a qualidade das mudas por meio do Índice de Qualidade de Dickson (IQD). A determinação da evapotranspiração foi realizada com o auxílio do minilímetro de pesagem, desenvolvido e calibrado para utilização em ambiente protegido. A quantificação da entrada e saída de água no minilímetro foi baseada no acúmulo de biomassa fresca das mudas em função dos graus-dia acumulados, na interceptação de água pelas folhas e pela bandeja, e na quantidade de água retida nos microporos do substrato. Em média, foram necessários 1045 graus-dia acumulados

para a produção das mudas de eucalipto, do enraizamento à rustificação, em ambos os ciclos de produção. Em média, a evapotranspiração das mudas de eucalipto na fase de enraizamento foi igual a 2,40 mm; na aclimação igual a 2,00 mm; no crescimento de 4,82 mm e na rustificação igual a 3,84 mm. Com relação à lâmina aplicada, comparando a aplicação de água pelo manejo convencional e otimizado, verificou-se uma economia hídrica pelo manejo otimizado de 11,9 % na fase de enraizamento; 60,3 % na fase de aclimação; 25,6 % na fase de crescimento e 30,6 % na fase de rustificação. As novas lâminas de irrigação propostas não afetaram a qualidade das mudas. A evapotranspiração das mudas no interior do ambiente protegido se mostrou altamente correlacionada com as variáveis meteorológicas externas, podendo ser recomendada para estimativa da evapotranspiração em ambiente protegido.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Aline Santana de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2012. **Optimization of water use in the production of clonal seedlings of Eucalyptus**. Adviser: Aristides Ribeiro. Co-adviser: Sérgio Zolnier.

Brazil has 11.6% of all fresh water in the planet, with 67% of available water is used for agriculture. It appears that the indiscriminate use of this feature has generated discussions on the scope of sustainable development for the country. Eucalyptus is a multipurpose species exhibiting rapid growth and high productivity, to be adapted to the climatic conditions of Brazil. To raise the productivity of the crop in the field, seedling production process must be conducted providing water conditions, proper nutrition, microclimate and sanitary. This research had the objective of modeling the growth of eucalyptus seedlings as a function of thermal time, develop and calibrate a weighing microlysimeter for use in a protected environment and determine the evapotranspiration of eucalyptus seedlings at all stages of production (rooting, acclimatization, growth and hardening). The experiment was conducted in the Nurseries Research from the Department of Forestry, belonging to the Federal University of Viçosa. There were two production cycles of eucalyptus (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*), and the first irrigation was carried out according to the traditionally used by the seedlings. In the second production cycle was thrown into the irrigation water demand function in culture. In addition to determining fresh and dry biomass of seedlings at intervals of 3 days were accomplished biometric measurements of eucalyptus seedlings, which were measured in leaf area, shoot height, stem diameter and length of the root system. It was later determined the quality of seedlings through the Dickson Quality Index (DQI). The determination of the evaporation was performed with the aid of the weighing microlysimeter, designed and calibrated for use in a greenhouse. Quantification of input and output of water in microlysimeter was based on fresh biomass accumulation of seedlings as a function of degree-days, in the interception of water by the leaves and the tray, and the amount of water retained in the micropores of the substrate. On average, it took 1045 degree-days for the production of eucalyptus seedlings, rooting for hardening in both production cycles. On average, the evapotranspiration of eucalyptus plants for rooting was equal to 2.40 mm; acclimatization equal to 2.00 mm, 4.82 mm of growth

and hardening equal to 3.84 mm. With respect to the water depth applied, comparing the application of water by traditional management and optimized, there was a water economy optimized for the management of 11.9% for rooting, 60.3% at the acclimatization, the 25.6% growth phase and 30.6% during hardening. The proposed new irrigation levels did not affect the quality of the seedlings. The evapotranspiration of the plants inside the greenhouse was highly correlated with the variable weather outside, being recommended for the estimation of evapotranspiration in greenhouse.

INTRODUÇÃO GERAL

A água é um recurso natural que ocupa cerca de 75% da superfície do planeta. Desse total, 97% é composto por água salgada e 3% por água doce, sendo que apenas 0,4% é encontrada em rios, lagos e na atmosfera, estando prontamente disponível para o consumo dos seres vivos. Dentre todos os usos da água doce, a agricultura utiliza em torno de 67%, a indústria 23% e o abastecimento público 10%, (MENDONÇA, 2004).

No entanto, o uso descontrolado deste recurso natural juntamente às perspectivas de escassez dos mesmos, alertam para a necessidade da busca de técnicas para a otimização do seu uso, contribuindo para a diminuição dos impactos ambientais.

Considerando o consumo de água via irrigação, apesar dessa técnica possibilitar o aumento da produção em regiões que apresentam limitações hídricas, verifica-se grande desperdício na sua utilização quando a quantidade de água aplicada não é equivalente à necessidade hídrica da cultura.

Em viveiros destinados à produção de mudas de eucalipto, verifica-se que não há uma padronização quanto à quantidade de água aplicada às mudas. Na maioria dos viveiros, a irrigação ocorre de forma temporizada, sendo a irrigação acionada em intervalos pré-estabelecidos, por determinado tempo, variando em função da época do ano e da fase de produção das mudas. Em outros, a aplicação de água se dá a partir da observação visual do estado hídrico das plantas, sendo altamente dependente da prática do viveirista.

Na fase de enraizamento, a umidade do ar deve ser mantida acima de 80%, mantendo-se a turgescência dos tecidos vegetais (XAVIER et al., 2009), sendo o sistema de irrigação formado por bicos nebulizadores de alta pressão e baixa vazão. Durante a aclimação, crescimento e rusticificação, geralmente utiliza-se aspersores com maior vazão e menor pressão, buscando dar condições de maior rusticidade no controle das condições ambientais.

A irrigação aplicada na medida certa é fundamental na produção de mudas de qualidade das diversas espécies de plantas de interesse comercial, visto que a falta ou excesso de água pode comprometer o crescimento e desenvolvimento das mesmas e a produtividade no campo.

Em relação à cultura do *Eucalyptus*, esse gênero possui grande importância em plantios florestais comerciais que visam a produção de papel, celulose, madeira e carvão, por apresentar crescimento rápido e ser muito adaptado às condições climáticas do Brasil.

Segundo dados da Associação Brasileira de Celulose e Papel, a produtividade média da cultura do eucalipto no Brasil aumentou de 24 para 41 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, entre o período de 1980 a 2010. Isso se deve à disponibilidade de mão-de-obra altamente qualificada, investimento em pesquisa e também avanços tecnológicos nas áreas de genética, biotecnologia, utilização de matéria-prima de alta qualidade, planejamento sócio-ambiental, manejo florestal e rotação de áreas plantadas (BRACELPA, 2011).

Atualmente, o setor florestal brasileiro conta com aproximadamente 4,75 milhões de hectares de florestas plantadas com eucalipto, sendo que a maior concentração de plantios florestais ocorre nas regiões Sul e Sudeste, onde também estão localizadas as principais unidades industriais dos segmentos de celulose, papel, painéis de madeira industrializada e siderurgia a carvão vegetal (ABRAF, 2011).

Além de possuírem funções produtivas, as florestas plantadas também atuam na conservação do meio ambiente, auxiliando na diminuição da pressão sobre florestas nativas e promovendo o sequestro de carbono, mitigando os efeitos de possíveis mudanças climáticas.

Para elevar a produtividade de determinada cultura no campo, o processo de produção das mudas deve ser realizado propiciando condições hídricas, nutricionais, microclimáticas e sanitárias adequadas. Para isso, é importante o conhecimento da relação entre o desenvolvimento da planta durante a fase de muda e o ambiente de cultivo (GOMES et al., 2002), aumentando a chance de sucesso na implantação da cultura no campo.

Geralmente, é observado alto consumo de água em viveiros destinados à produção de mudas florestais pelo fato da aplicação de água via irrigação não corresponder apenas à necessidade hídrica das mudas.

Diante do exposto, a presente pesquisa teve como principal objetivo determinar a necessidade hídrica de mudas de eucalipto nas diversas fases de produção, de forma a promover a otimização do uso da água em viveiros florestais.

O trabalho foi dividido em três capítulos, sendo o primeiro responsável pelo monitoramento do crescimento e desenvolvimento das mudas de eucalipto com base no tempo térmico; o segundo pelo desenvolvimento e calibração de um equipamento capaz de medir de forma precisa o consumo hídrico em intervalos instantâneos utilizando o princípio da variação de massa (minilímetro) e o terceiro mostra a aplicação do minilímetro para determinação da evapotranspiração das mudas de eucalipto nas diversas fases de produção, a partir das condições ambientais reinantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário Estatístico da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas 2011, Ano Base 2010.** Disponível em:<www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF11/ABRAF11-BR.pdf>. Acesso em: 29 nov.2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL - BRACELPA. **Relatório Estatístico 2010/2011.** Disponível em:<www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/rel2010.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2011.

GOMES, J. M.; COUTO, L.; LEITE, H. G.; XAVIER, A.; GARCIA, S. L. R. Parâmetros morfológicos na avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v.26, n. 6, p.655-664, dez. 2002.

MENDONÇA, R. **Como cuidar de seu meio ambiente.** São Paulo: Bei, 2004. 276 p.

XAVIER, A.; WENDLING, I.; SILVA, R. L. da. **Silvicultura clonal: princípios e técnicas.** Viçosa: Editora UFV, 2009. 272 p.

CAPÍTULO 1

MODELAGEM DO CRESCIMENTO DE MUDAS DE EUCALIPTO COM BASE NO TEMPO TÉRMICO

1.1. INTRODUÇÃO

Para elevar a produtividade de determinada cultura no campo, o processo de produção das mudas deve ser realizado propiciando condições hídricas, nutricionais e microclimáticas adequadas. Para isso, é importante o conhecimento da relação entre o desenvolvimento da planta durante a fase de muda e o ambiente de cultivo (GOMES et al., 2002), aumentando a chance de sucesso na implantação da cultura no campo.

O eucalipto é uma espécie de uso múltiplo que apresenta rápido crescimento e alta produtividade, por ser adaptado às condições edafoclimáticas do Brasil.

Para garantir a homogeneidade e melhor qualidade das mudas, o desenvolvimento de florestas clonais de eucalipto tem sido cada vez mais utilizado, uma vez que permite a preservação dos genótipos de interesse e a manutenção da produtividade no campo. A produção de mudas desta espécie, por estaquia, compreende as fases de enraizamento, aclimação, crescimento e rustificação (CARMO & SILVA, 1989), sendo que em cada uma há exigências microclimáticas e hídricas diferenciadas.

Na etapa de enraizamento, as estacas são mantidas em casa de vegetação até que o processo de formação de raízes seja totalmente finalizado. A irrigação nessa fase é intermitente, sendo realizada por nebulizadores controlados por uma unidade automática. A ausência de raízes ou a presença de raízes pouco funcionais exige que a frequência de irrigação seja maior para que sempre seja mantida água sobre a superfície das folhas, evitando a morte das estacas por desidratação.

Após o enraizamento, as mudas são transferidas para a casa de sombra, normalmente coberta com tela de sombrite de 50%, para iniciar o processo de aclimação, sendo a irrigação realizada através de microaspersores. A fase de crescimento tem por objetivo o desenvolvimento da parte aérea das mudas, sendo que elas permanecem em estruturas com aberturas laterais e irrigação através de

microaspersores. A etapa de rustificação prepara as mudas fisiologicamente para o plantio, tornando-as resistentes ao microclima adverso reinante em condições de campo, caracterizado por altos valores de radiação solar e déficit de pressão de saturação do vapor d'água.

Dentre as fases de maior importância para a produção de mudas de eucalipto, podemos destacar a de enraizamento que, se não forem atendidas as necessidades hídricas, nutricionais, sanitárias e climáticas, pode comprometer a sobrevivência e a qualidade das mudas. Mudanças heterogêneas e com problemas de enraizamento causam menor produtividade no campo e desuniformidade do talhão, induzindo a grandes prejuízos na produtividade dos plantios. Por isso, é necessário que cada fase seja realizada com critérios para que a qualidade final da muda produzida acarrete em maior produtividade no campo.

Diversas variáveis influenciam no crescimento e desenvolvimento das raízes durante o processo de propagação de plantas por meio de estacas, tais como: espécie, período de coleta das estacas, estado nutricional, sanidade, disponibilidade de água e variações nas condições climáticas (HIGASHI et al., 2000).

Dentre as variáveis meteorológicas que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas, a temperatura possui considerável relevância nos processos fisiológicos, por estar diretamente relacionada aos processos de evapotranspiração e às reações metabólicas, atuando também na duração do ciclo de desenvolvimento e na época da colheita. Outro fator a se destacar é que a temperatura é uma variável de fácil medição, por existirem diversos métodos para tal função, permitindo a utilização de sistemas robustos, exatos e de baixo custo.

Segundo OMETTO (1981), existe um valor de energia mínima que aciona os mecanismos metabólicos das plantas, denominada de temperatura base inferior, em que somente estados energéticos acima deste limite são propícios ao crescimento e ao desenvolvimento dos vegetais. De acordo com MARTINS et al. (2007), a temperatura basal inferior para o desenvolvimento de mudas de *Eucalyptus grandis* é de 10 °C e a de *Eucalyptus saligna* é de 8 °C. Por outro lado, o limite máximo para a aceleração dos processos metabólicos, também conhecido como temperatura basal superior, é de 36 °C para mudas de *Eucalyptus grandis* (ALMEIDA et al., 2004; DYE et al., 2004) e de 35 °C para *Eucalyptus saligna* (NIETO & RODRIGUEZ, 2005).

Neste sentido, para que uma espécie vegetal atinja certo grau de desenvolvimento fenológico, é necessário que ocorra o acúmulo de determinada

quantidade de energia, denominada de graus-dia acumulados ou soma térmica, que representa o acúmulo térmico acima da temperatura basal inferior. Segundo TAIZ & ZEIGER (2004), as reações bioquímicas são aceleradas se forem mantidas dentro de uma faixa de temperatura adequada para a ativação das enzimas. Valores abaixo ou acima de determinada faixa de temperatura podem causar a desnaturação das enzimas, provocando perdas da sua função biológica e, conseqüentemente, na taxa de crescimento.

A determinação dos graus-dia acumulados possui grande importância para a avaliação da duração do ciclo fenológico das culturas, uma vez que, considerando apenas o tempo cronológico, poderão ocorrer variações em função das condições meteorológicas reinantes. Além disso, apresenta-se como uma importante ferramenta no processo de redução de riscos climáticos, pois o conhecimento das exigências térmicas de determinada cultura contribui para a definição antecipada do planejamento das atividades florestais (determinação da quantidade de ciclos por ano) e indicação do potencial climático da região para produção.

Diversos estudos têm associado o conceito de tempo térmico aos processos fisiológicos de várias culturas, dentre eles, cita-se a determinação da soma térmica para as culturas da figueira (SOUZA et al., 2009), laranjeira (STENZEL et al., 2006), batata (PAULA et al., 2005) e videira (ROBERTO et al., 2004). Contudo, na revisão bibliográfica realizada não foram encontradas pesquisas relativas à acumulação dos graus-dia para a produção de mudas de eucalipto.

O ajuste de modelos que correlacionam variáveis associadas à interação planta-ambiente no enraizamento e desenvolvimento de diferentes materiais genéticos a serem propagados no viveiro, pode minimizar os custos, em virtude da otimização da utilização das instalações e redução das perdas ocasionadas por doenças (FERREIRA et al., 2004).

Esta pesquisa teve como objetivo geral o desenvolvimento de modelos de crescimento para mudas de eucalipto nas diferentes fases de produção, com base na soma térmica. Especificamente, visou o monitoramento do crescimento das mudas de eucalipto nas distintas fases de produção em dois ciclos de produção; a determinação da soma térmica necessária à produção de mudas de eucalipto em épocas distintas e o desenvolvimento e validação de modelos de crescimento das mudas de eucalipto.

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1. Caracterização do sistema de produção de mudas de eucalipto

O experimento foi conduzido no Viveiro de Pesquisas do Departamento de Engenharia Florestal, pertencente à Universidade Federal de Viçosa, situado na cidade de Viçosa, Minas Gerais. A área experimental está localizada na latitude 20°45'45" S, longitude 42°52'04" W e altitude de 690 m. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo temperado quente-mesotérmico (Cwa), com verões chuvosos e invernos secos. Apresenta precipitação média anual de 1.220 mm, temperatura máxima média de 26 °C e mínima média de 14 °C.

A produção das mudas de eucalipto foi realizada em uma estufa adaptada para atender todas as fases (enraizamento, aclimatação, crescimento e rustificação) no mesmo ambiente. A estrutura era coberta com filme plástico de polietileno de baixa densidade (PEBD), possuindo espessura de 150µm e sombreamento móvel (sombrite com malha de 60%). A instalação apresentava largura de 6 m, comprimento de 6 m e pé direito de 3 m de altura, sendo a superfície do piso interno revestida com concreto e a estrutura de sustentação em aço galvanizado. As laterais da estrutura possuíam dobradiças metálicas que permitiam sua abertura quando ocorria a mudança da fase de produção (Figura 1).



Figura 1. Estrutura utilizada para a produção de mudas de eucalipto

Para a obtenção das mudas de eucalipto, foram utilizadas estacas de um clone comercial (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*), possuindo aproximadamente 10 cm de comprimento e dois pares de folhas. No primeiro ciclo, as estacas tiveram a área foliar

reduzida em 40% a fim de diminuir a transpiração, enquanto que no segundo ciclo não ocorreu redução da área foliar.

Os recipientes utilizados na produção das mudas de eucalipto foram tubetes de polipropileno, com capacidade volumétrica de 55 cm³ e altura de 12,5 cm. Os tubetes foram preenchidos com uma mistura de substrato comercial à base de casca de pinus compostada (MecPlant®), fertilizante super simples e fertilizante de liberação lenta Osmocote® (formulação 19-6-10, Scotts, Ohio, EUA). Após a fase de enraizamento, foi realizada uma adubação de cobertura com o fosfato monoamônio (MAP), na proporção de 150 g do adubo para 10 L de água, para promover o crescimento da parte aérea das mudas, sendo aplicado 5 ml da solução em cada tubete.

Para que o monitoramento de todas as etapas de produção fosse contemplado, foi realizado o plantio das estacas em bandejas de plástico com capacidade unitária para 96 tubetes. Nas fases de aclimação, crescimento e rustificação, foram ocupadas apenas 48 células de cada bandeja a fim de evitar a sobreposição de folhas e minimizar a disseminação de doenças entre mudas.

A estrutura de produção das mudas foi equipada com um sensor conjugado de temperatura e umidade relativa do ar conectado a um controlador digital (N323 RHT, Novus, Brasil) responsável pelo acionamento de uma bomba de irrigação e do sistema de ventilação mecânico constituído de um exaustor. Os valores de temperatura e umidade do ar foram gravados no disco rígido de um computador de acordo com a frequência de aquisição de dados que, neste experimento, foi de 1 minuto.

No primeiro ciclo de produção, ocorrido de 08/02/2011 a 22/04/2011, na fase de enraizamento, a irrigação das mudas foi realizada por meio de um sistema de nebulização formado por 100 bicos nebulizadores, com uma vazão unitária de 7,5 L h⁻¹, que era acionado quando a temperatura no interior da casa de vegetação estivesse acima de 30 °C ou a umidade relativa do ar estivesse abaixo de 85%.

Na aclimação, a irrigação foi realizada por meio de 9 microaspersores com vazão unitária de 120 L h⁻¹ e 64 bicos nebulizadores com uma vazão unitária de 7,5 L h⁻¹, acionados quatro vezes ao dia (8, 12, 14 e 16 h), ficando o sistema ligado por 5 minutos. Além disso, o sombrite permaneceu estendido para diminuir a exposição das mudas à radiação solar.

Durante o período de crescimento, o sistema de irrigação foi constituído pelos mesmos 9 microaspersores e 64 nebulizadores, porém, acionados apenas duas vezes ao dia (10 e 15 h), durante 10 minutos. Na rustificação, a aplicação de água ocorreu duas

vezes por dia, porém, por 8 minutos. Nas duas últimas fases, as laterais do ambiente protegido permaneceram abertas e o sombrite recolhido.

No segundo ciclo de produção, realizado no período de 22/10/2011 a 07/01/2012, para todas as fases de produção, a irrigação foi acionada em função da demanda hídrica na cultura.

1.2.2. Monitoramento do crescimento das mudas

Para a determinação do acréscimo de biomassa das mudas de eucalipto, foi adotado o método destrutivo, no qual, a partir da data de estaqueamento, com periodicidade de 3 dias, ocorreu a medição da biomassa fresca de cada uma das estacas presentes em uma bandeja.

Em seguida à medição da biomassa fresca, as estacas foram submetidas à secagem em estufa a 65 °C, até atingir massa constante, para a obtenção da biomassa seca. As medidas de biomassa fresca e seca foram realizadas em uma balança de precisão com resolução de 0,01 g (modelo SA 210, Scientech, EUA).

Simultaneamente às determinações das biomassas fresca e seca, foram realizadas medidas biométricas das mudas de eucalipto, nas quais foram mensuradas as seguintes características: área foliar, altura da parte aérea, diâmetro do colo e comprimento do sistema radicular. A área foliar das mudas foi obtida por meio de um equipamento que integra a área de cada folha (modelo LI 3100C, Licor Biosciences, EUA). A altura da parte aérea e o comprimento do sistema radicular (raiz principal) das mudas foram medidos com régua milimetrada. Já o diâmetro do colo das mudas foi determinado por meio de um paquímetro com precisão de 0,1 mm (Eccofer, Brasil).

1.2.3. Análise da qualidade das mudas de eucalipto

A análise da qualidade das mudas de eucalipto foi realizada com base no Índice de Qualidade de Dickson (IQD).

O IQD, proposto por DICKSON et al. (1960), considera nesta estimativa qualitativa a altura da parte aérea e o diâmetro do colo das mudas, além das biomassas secas da parte aérea, raiz e total, conforme a Equação 1.1.

$$IQD = \frac{BSM_{tot}}{\left[\left(\frac{H}{D}\right) + \left(\frac{BSM_{p.aérea}}{BSM_{raiz}}\right)\right]} \quad (1.1)$$

em que,

- BSM_{tot} = biomassa seca total, g;
 H = altura da parte aérea, cm;
 D = diâmetro do colo, mm;
 $BSM_{p.aérea}$ = biomassa seca da parte aérea, g;
 BSM_{raiz} = biomassa seca da raiz, g.

O Índice de Qualidade de Dickson é um importante indicador da qualidade de mudas, por considerar no seu cálculo a robustez e o equilíbrio da distribuição da biomassa, sendo ponderado vários parâmetros importantes (FONSECA, 2000). Além disso, mostra-se como uma importante ferramenta capaz de prever a qualidade da muda antes do seu plantio no campo. O IQD é uma combinação de variáveis morfológicas e quanto maior o seu valor, melhor a qualidade das mudas.

Foi avaliada a variação do Índice de Qualidade de Dickson em função do acúmulo dos graus-dia ao longo dos dois ciclos de produção.

1.2.4. Determinação da soma térmica para a produção de mudas de eucalipto

O tempo térmico foi determinado com base nas medidas de um sensor de temperatura do tipo semicondutor com faixa de medição de -55 a +125 °C e resolução de 0,1 °C (modelo DS 1820, Dallas Semiconductor, Texas, EUA). Este sensor foi instalado na parte central da estrutura para produção das mudas de eucalipto, à altura do dossel vegetativo, sendo conectado a um computador para armazenamento dos dados coletados, com média aritmética a cada 10 minutos.

Para o cálculo dos graus-dia acumulados (soma térmica) foi adotada a metodologia proposta por VILLA NOVA (1972), nos Casos I a IV.

A Equação 1.2, referente ao Caso I, é aplicada se a temperatura basal inferior da cultura for inferior à temperatura mínima diária e se temperatura basal superior da cultura for superior à temperatura máxima diária.

A Equação 1.3 refere-se ao Caso II, em que a temperatura basal inferior é maior ou igual à temperatura mínima diária e a temperatura basal superior é maior que a máxima diária.

Já a Equação 1.4, associada ao Caso III, é utilizada se a temperatura basal inferior da cultura for inferior à temperatura mínima diária e se temperatura basal superior da cultura for inferior à temperatura máxima diária.

Por fim, o Caso IV (Equação 1.5) é aplicado quando a temperatura basal inferior é maior que a temperatura mínima e temperatura basal superior é menor que a máxima diária.

$$GD_{acum} = \sum_{i=1}^n [(T_{min} - T_i) + \frac{(T_{max} - T_{min})}{2}] \quad (1.2)$$

$$GD_{acum} = \sum_{i=1}^n [\frac{(T_{max} - T_i)^2}{2(T_{max} - T_{min})}] \quad (1.3)$$

$$GD_{acum} = \sum_{i=1}^n [(T_{min} - T_i) + \frac{(T_{max} - T_{min})}{2} - \frac{(T_{max} - T_s)^2}{2 \cdot (T_{max} - T_{min})}] \quad (1.4)$$

$$GD_{acum} = \sum_{i=1}^n [\frac{(T_{max} - T_i)^2}{2 \cdot (T_{max} - T_{min})} - \frac{(T_{max} - T_s)^2}{2 \cdot (T_{max} - T_{min})}] \quad (1.5)$$

em que,

GD_{acum} = graus-dia acumulados, °C;

n = número de dias, adimensional;

T_{min} = temperatura do ar mínima diária, °C;

T_i = temperatura basal inferior da cultura, °C;

T_{max} = temperatura do ar máxima diária, °C;

T_s = temperatura basal superior da cultura, °C.

Durante a realização de ambos os ciclos de produção foram utilizados apenas os Casos I e III, uma vez que a temperatura mínima diária foi sempre superior à temperatura basal inferior da cultura.

1.2.5. Desenvolvimento e validação de modelos de crescimento para mudas de eucalipto

A partir das biomassas (fresca e seca) e da soma térmica foram obtidos, por meio de regressões múltiplas, modelos de crescimento para mudas de eucalipto, utilizando-se o programa computacional Sigma Plot (versão 11.0).

Após o desenvolvimento dos modelos, foi realizada a validação dos mesmos através de repetições dos procedimentos descritos anteriormente, com conjuntos de dados independentes.

Na análise estatística foram utilizados os seguintes índices: coeficiente de correlação de Pearson (r), coeficiente de Willmott (d), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e viés médio do erro (MBE), de acordo com as Equações 1.6 a 1.9, respectivamente.

A partir do coeficiente de Pearson (r) foi possível quantificar a precisão do modelo, sendo que quanto mais próximo de 1, maior o grau de relação entre os valores observados e estimados.

$$r = \frac{\sum(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum(O_i - \bar{O})^2 \sum(P_i - \bar{P})^2}} \quad (1.6)$$

O coeficiente de Willmott (d) quantificará a exatidão e está relacionado ao afastamento dos valores estimados em relação ao adotado como referência (observado), variando de 0 para nenhuma concordância à 1 para a concordância perfeita.

$$d = 1 - \frac{\sum(P_i - O_i)^2}{\sum(|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (1.7)$$

A raiz do erro quadrático médio (RMSE) foi utilizada para comparar os valores de biomassa estimados e observados, sendo que baixos valores do RMSE são mais desejáveis.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (1.8)$$

Por meio do viés médio do erro (MBE) foi possível verificar se a previsão é sistematicamente subestimada (valores negativos) ou superestimada (valores positivos).

$$\text{MBE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (1.9)$$

em que,

O_i = valor de biomassa observado, g muda⁻¹;

P_i = valor de biomassa estimado, g muda⁻¹;

\bar{O} = média dos valores observados, g muda⁻¹;

\bar{P} = média dos valores estimados, em g muda⁻¹;

n = número de observações, adimensional.

1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes à fase de enraizamento foram apresentados separadamente para verificar se houve diferença na velocidade de enraizamento entre estacas com e sem redução de área foliar (1º ciclo e 2º ciclo, respectivamente).

A Figura 2 apresenta a variação do comprimento do sistema radicular em função do tempo térmico expresso em graus-dia acumulados, correspondentes ao primeiro e segundo ciclo de produção. É possível visualizar que a redução ou não da área foliar não influenciou na iniciação do processo de enraizamento das estacas.

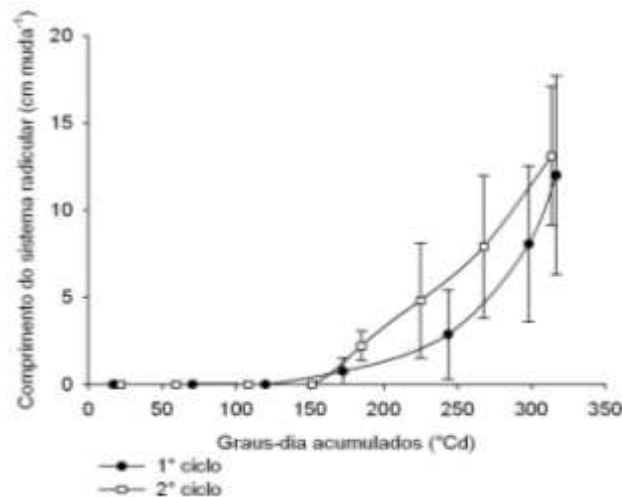


Figura 2. Variação do comprimento radicular, na fase de enraizamento, em função do acúmulo dos graus-dia, em clones de *Eucalyptus*

Pode-se constatar que, até cerca de 150 graus-dia acumulados, o processo de enraizamento prosseguiu sem alterações visíveis, em ambos os ciclos de produção. Durante esse período ocorre a formação endógena (processos moleculares e bioquímicos) de primórdios radiculares e a proliferação e formação de uma massa de células desorganizadas, denominada calo (GOULART, 2007).

Segundo XAVIER et al. (2009), o enraizamento em mudas produzidas por estaquia constitui-se um processo complexo, que envolve o redirecionamento do desenvolvimento de células vegetais totipotentes para a formação de um meristema direcionado à formação de um novo sistema radicular.

HARTMANN et al. (2011) afirmam que, a formação de raízes adventícias em estacas envolve a formação e diferenciação de grupos de células meristemáticas em primórdios de raiz, incluindo a ruptura de outros tecidos do caule para formação de conexões vasculares com os tecidos condutores da estaca.

Após o aparecimento das primeiras raízes e a formação de células especializadas na absorção de água e nutrientes pela muda, verificou-se a aceleração do crescimento radicular, sendo que a emissão de raízes ficou evidente a partir de 150 graus-dia acumulados. A observação das raízes na extremidade inferior dos tubetes, que correspondeu a um comprimento de 12 cm, ocorreu após o acúmulo de 316,6 graus-dia no primeiro ciclo e 313,4 graus-dia no segundo ciclo.

Com relação ao diâmetro do colo é possível visualizar na Figura 3 que as estacas apresentaram diâmetros semelhantes em ambos os ciclos de produção, variando de $1,12 \pm 0,24$ g a $1,73 \pm 0,33$ g, no primeiro ciclo e $1,09 \pm 0,2$ g a $1,92 \pm 0,34$ g, no segundo ciclo.

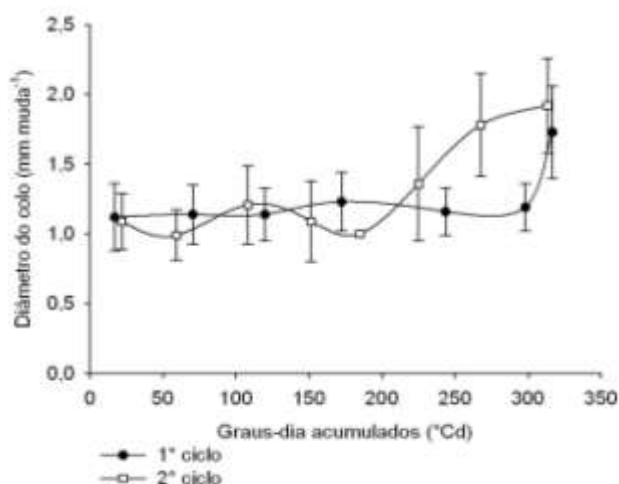


Figura 3. Variação do diâmetro do colo, na fase de enraizamento, em função do acúmulo dos graus-dia, em clones de *Eucalyptus*

A Figura 4 mostra a variação da altura das estacas durante o período de enraizamento, em ambos os ciclos. Verifica-se que no primeiro ciclo, a altura variou de $9,46 \pm 1,11$ cm a $9,8 \pm 1,58$ cm. No segundo ciclo, a variação foi de $8,31 \pm 1,38$ cm a $9,77 \pm 1,47$ cm, do início ao fim do enraizamento.

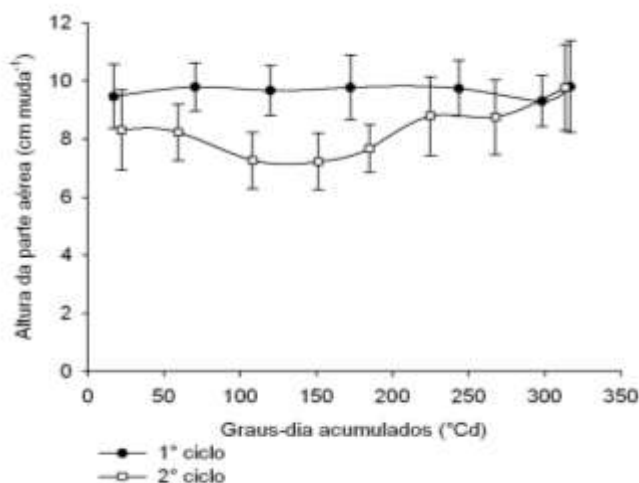


Figura 4. Variação da altura da parte aérea, na fase de enraizamento, em função do acúmulo dos graus-dia, em clones de *Eucalyptus*

A Figura 5 apresenta a variação da área foliar no decorrer do processo de enraizamento. Conforme esperado, a área foliar do primeiro ciclo foi inferior à do segundo ciclo de produção, devido ao procedimento realizado no preparo das estacas. A variação da área foliar foi de $8,14 \pm 2,61 \text{ cm}^2$ a $14,93 \pm 3,31 \text{ cm}^2$ para o primeiro ciclo e de $11,67 \pm 2,2 \text{ cm}^2$ a $19,29 \pm 3,53 \text{ cm}^2$, para o segundo ciclo.

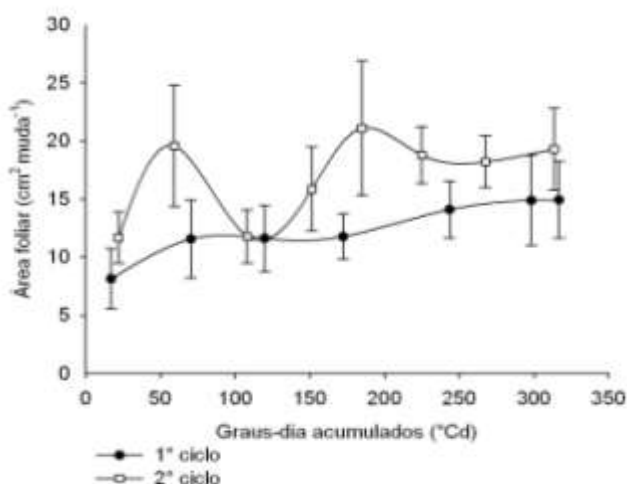


Figura 5. Variação da área foliar, na fase de enraizamento, em função do acúmulo dos graus-dia, em clones de *Eucalyptus*

O comportamento curvilíneo de aumento e diminuição dos valores da área foliar apresentados no segundo ciclo não deve ser considerado. Isso ocorreu após a escolha aleatória de bandejas que ocasionalmente obtinham mudas com áreas foliares maiores, sem que visualmente fosse percebido.

Em relação à biomassa fresca, no início do experimento do primeiro ciclo, a média de biomassa fresca das mudas foi de $0,28 \pm 0,09 \text{ g}$. Após o enraizamento completo das estacas de eucalipto, a média de biomassa fresca foi de $0,79 \pm 0,23 \text{ g}$. No segundo ciclo, a média da biomassa fresca das mudas variou de $0,49 \pm 0,20 \text{ g}$ a $1,25 \pm 0,60 \text{ g}$, do início ao fim do experimento, respectivamente (Figura 6).

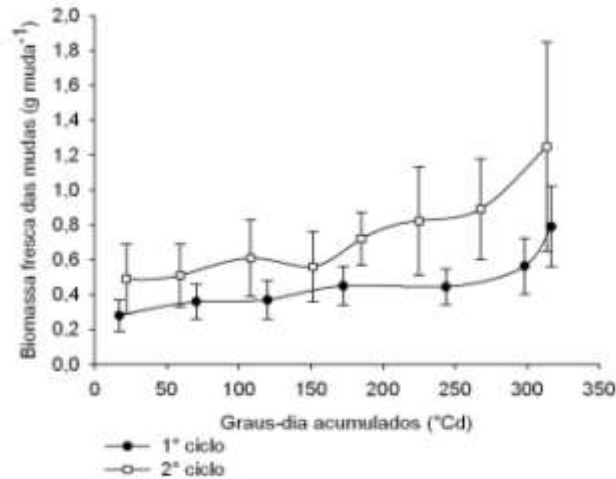


Figura 6. Variação da biomassa fresca das mudas, na fase de enraizamento, em função do acúmulo dos graus-dia, em clones de *Eucalyptus*

Já a Figura 7 apresenta a variação da biomassa seca no decorrer do enraizamento, mostrando que a biomassa seca variou de $0,07 \pm 0,02$ g a $0,17 \pm 0,04$ g no primeiro ciclo, e de $0,10 \pm 0,04$ g a $0,25 \pm 0,08$ g no segundo ciclo.

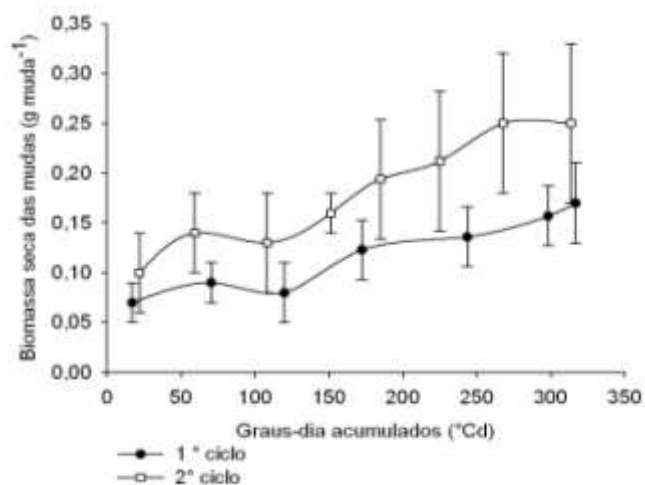


Figura 7. Variação da biomassa seca das mudas, na fase de enraizamento, em função do acúmulo dos graus-dia, em clones de *Eucalyptus*

Ao analisar as Figuras 6 e 7, infere-se que a água constitui cerca de 75% da massa total da estaca, do início ao fim do enraizamento.

A Figura 8 mostra a variação da biomassa fresca das raízes no período de enraizamento, a fim de verificar se a ausência da prática da redução foliar interfere no acúmulo de biomassa das mesmas. Verifica-se que no final do primeiro ciclo, a biomassa

fresca das raízes foi igual a 0,37 g muda⁻¹; para o segundo ciclo, a biomassa foi igual a 0,56 g muda⁻¹.

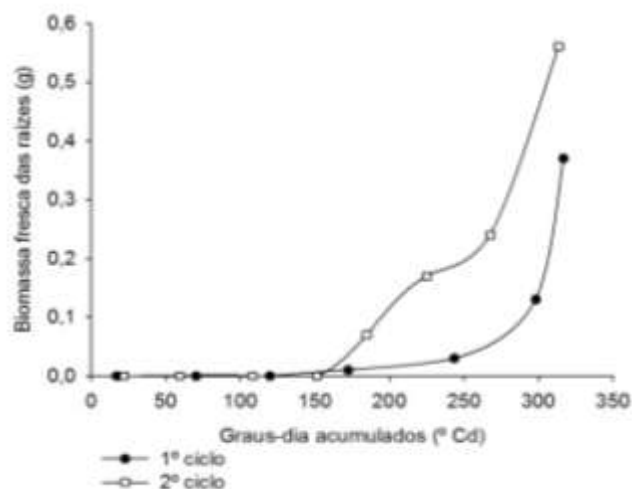


Figura 8. Variação da biomassa fresca das raízes, na fase de enraizamento, em função do acúmulo dos graus-dia, em clones de *Eucalyptus*

É possível perceber que apesar na iniciação radicular ter sido semelhante em ambos os ciclos, o acúmulo de biomassa fresca das raízes no ciclo em que não houve redução foliar foi 66% superior com relação ao primeiro ciclo. Comportamento semelhante foi observado com a biomassa seca das raízes (Figura 9). FERNANDES (2011) também observou aumento da biomassa das raízes no tratamento em que não houve redução da área foliar em clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake e *E. grandis* W. Hill ex Maiden.

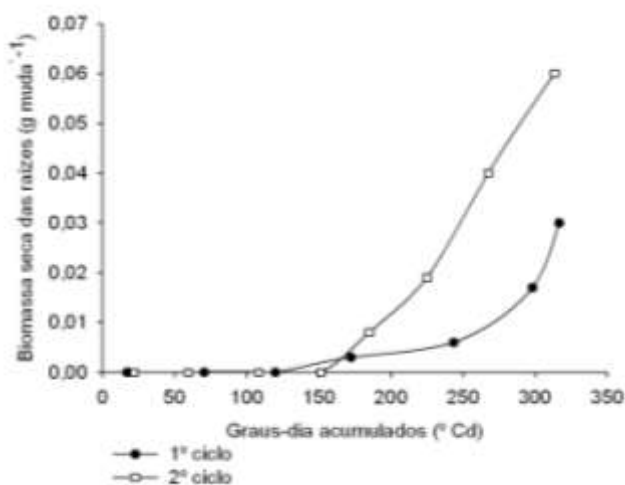


Figura 9. Variação da biomassa seca das raízes, na fase de enraizamento, em função do acúmulo dos graus-dia, em clones de *Eucalyptus*

Considerando todo o ciclo de produção, isto é, da fase de enraizamento à rustificação, as Figuras 10 a 13 apresentam os modelos gerados pelos parâmetros biométricos (comprimento radicular, altura da parte aérea, diâmetro do colo e área foliar) em função do acúmulo dos graus-dia. Os modelos foram obtidos a partir do monitoramento do desenvolvimento das mudas realizado no primeiro ciclo de produção e validados com os dados gerados no segundo ciclo.

A Figura 10 mostra a variação do comprimento radicular em função dos graus-dia. Após o enraizamento, em que ocorre a observação das raízes na extremidade inferior dos tubetes, foi realizado o corte das raízes que se sobressaíram, limitando seu tamanho em 12 cm. Conforme citado anteriormente, o completo enraizamento das mudas de eucalipto ocorreu por volta dos 315 graus-dia acumulados.

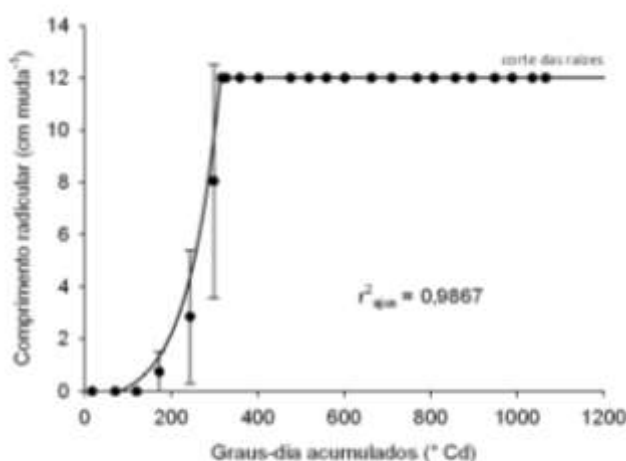


Figura 10. Variação do comprimento do sistema radicular durante todo o ciclo de produção em função do acúmulo dos graus-dia, em clones de *Eucalyptus*

A equação de correlação entre o comprimento do sistema radicular e o acúmulo de graus-dia foi gerada a partir de um modelo sigmoidal com 5 parâmetros (Equação 1.10), em que o coeficiente de determinação ajustado foi igual a 0,9867.

$$C_{\text{rad}} = -0,5742 + \left(\frac{12,5867}{1 + \exp\left(-\frac{(\text{GD}_{\text{acum}} - 313,5739)^{0,0056}}{175,90,4179561}\right)} \right) \quad r^2_{\text{ajus}} = 0,9867 \quad (1.10)$$

em que,

C_{rad} = comprimento radicular, cm;

GD_{acum} = graus-dia acumulados; °Cd;

Por meio da Figura 11 é possível verificar o desempenho estatístico do modelo obtido. Pode-se perceber que a validação com os dados do segundo ciclo de produção apresentou alto coeficiente de precisão e de exatidão.

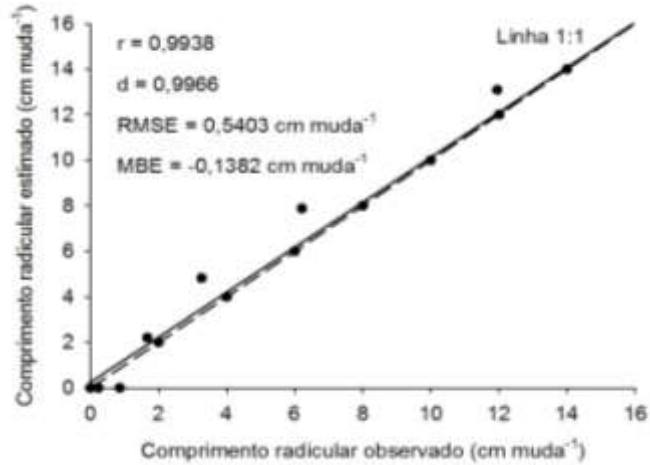


Figura 11. Desempenho estatístico da equação de regressão (Eq.1.10) para estimativa do comprimento radicular durante todo o ciclo de produção das mudas de *Eucalyptus*

A Figura 12 apresenta a variação da altura no decorrer do processo de produção, mostrando que o aumento pronunciado da parte aérea ocorreu após 440 graus-dia acumulados, soma térmica na qual ocorreu a finalização da fase de aclimação. Isso ocorreu devido à aplicação do fosfato monoamônio (1,5%) no início da fase de aclimação, sendo que seu efeito foi evidenciado no início da fase de crescimento.

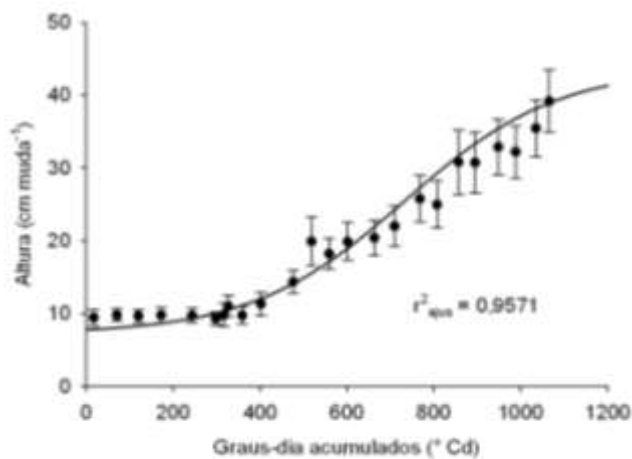


Figura 12. Variação da altura da parte aérea em função do acúmulo dos graus-dia, em clones de *Eucalyptus*

O coeficiente de variação entre a altura das mudas de uma mesma bandeja foi em torno de 13%.

Após o acúmulo de aproximadamente 910 graus-dia, a altura da parte aérea apresentou comportamento com menor aceleração do crescimento, até o final do processo de produção. As mudas já rustificadas apresentaram altura média de 39 cm. Segundo RIBEIRO et al. (2001), uma muda de boa qualidade apresenta altura de 20 a 30 cm de altura e sem tortuosidade. No entanto, de modo geral, verifica-se que não existe um valor padrão de variáveis biométricas que caracterizem uma muda de boa qualidade para plantio.

A equação de correlação entre a altura da parte aérea e o acúmulo de graus-dia foi obtida por meio de um modelo sigmoidal com 4 parâmetros (Equação 1.11), em que o coeficiente de determinação ajustado foi igual a 0,9571.

$$H = 7,1914 + \left(\frac{36,506}{1 + \exp\left(-\frac{GD_{\text{acum}} - 732,1223}{175,9561}\right)} \right) \quad r^2_{\text{ajus}} = 0,9571 \quad (1.11)$$

em que,

H = altura da parte aérea, cm;

GD_{acum} = graus-dia acumulados; °Cd;

A Figura 13 apresenta o desempenho estatístico do modelo obtido a partir do primeiro ciclo de produção. Verifica-se que o modelo apresentou alto coeficiente de precisão ($r = 0,9907$) e de exatidão (0,9895).

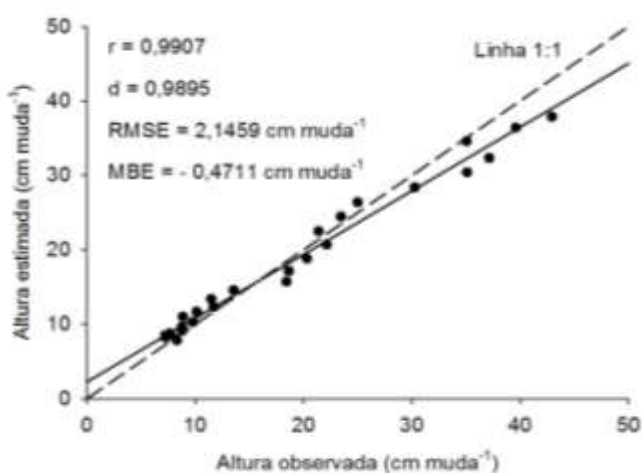


Figura 13. Desempenho estatístico da equação de regressão (Eq.1.11) para estimativa da altura da parte aérea durante todo o ciclo de produção das mudas de *Eucalyptus*

Com relação ao diâmetro do colo (Figura 14), que variou de $1,12 \pm 0,24$ mm a $3,21 \pm 0,43$ mm, semelhantemente ao ocorrido com a altura da parte aérea, após os 440 graus-dia acumulados foi possível perceber um aumento mais acentuado dessa variável. LOPES (2004) estabeleceu um valor mínimo de diâmetro de colo de 2,5 mm para plantio de *Eucalyptus grandis*.

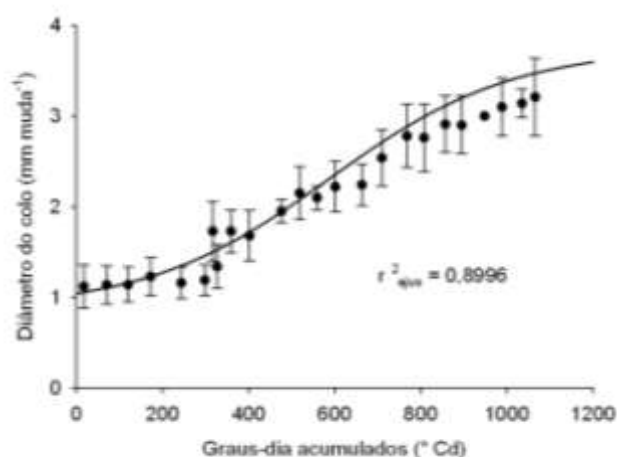


Figura 14. Variação do diâmetro do colo em função do acúmulo dos graus-dia, em clones de *Eucalyptus*

O coeficiente de variação do diâmetro do colo das mudas de uma mesma bandeja foi em torno de 15%.

O modelo de estimativa do diâmetro do colo em função dos graus-dia foi obtido a partir do modelo sigmoide com 4 parâmetros (Equação 1.12), apresentando coeficiente de determinação ajustado igual a 0,8996.

$$D = 0,8724 + \left(\frac{2,8743}{1 + \exp\left(-\frac{GD_{\text{acum}} - 587,7020}{212,6830}\right)} \right) \quad r^2_{\text{ajus}} = 0,8996 \quad (1.12)$$

em que,

D = diâmetro do colo, cm;

GD_{acum} = graus-dia acumulados; °Cd;

A Figura 15 apresenta o desempenho estatístico do modelo obtido a partir do primeiro ciclo de produção. Verifica-se que o modelo apresentou alto coeficiente de precisão ($r = 0,9596$) e de exatidão (0,9670).

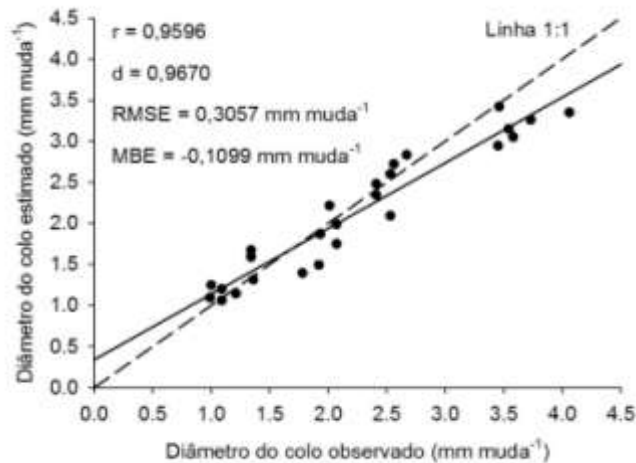


Figura 15. Desempenho estatístico da equação de regressão (Eq.1.12) para estimativa do diâmetro do colo durante todo o ciclo de produção das mudas de Eucalyptus

A área foliar também apresentou comportamento semelhante à altura e diâmetro do colo, em que o aumento pôde ser melhor visualizado a partir dos 440 graus-dia (início da fase de crescimento), apresentando menor desenvolvimento a partir de 910 graus-dia acumulados (fim da fase de crescimento) (Figura 16). A área foliar variou de $8,14 \pm 2,61$ a $195,41 \pm 19,04 \text{ cm}^2$. O coeficiente de variação entre as mudas foi de 22%.

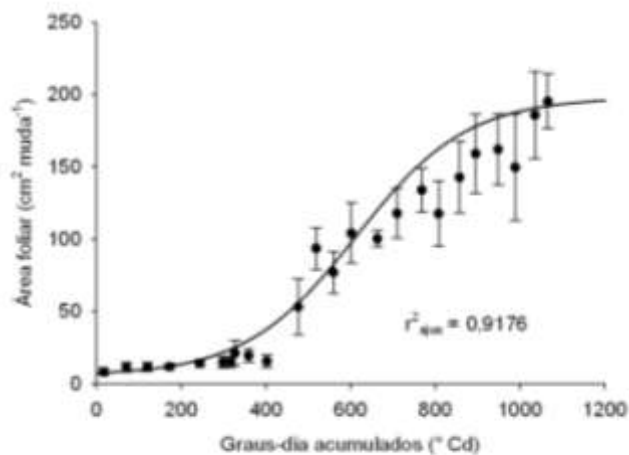


Figura 16. Variação da área foliar em função do acúmulo dos graus-dia, durante todo o ciclo de produção,, em clones de Eucalyptus

Durante a fase de enraizamento, a planta utiliza carboidratos armazenados na estaca como fonte de carbono para a síntese de substâncias essenciais à formação das raízes (ARAÚJO et al. 2004). Nesse sentido, não percebe-se aumento de área foliar, altura da parte aérea e diâmetro do colo, nas estacas na fase de enraizamento. Na

aclimação, ocorre um discreto aumento da área foliar, visto que as raízes já estão formadas. A partir da fase de crescimento, após a realização da adubação de cobertura, ocorreu maior formação de folhas, contribuindo para o acentuado aumento da área foliar.

A equação de correlação entre a variação da área foliar e o acúmulo de graus-dia foi obtida a partir de um modelo sigmoidal com 4 parâmetros (Equação 1.13), em que o coeficiente de determinação ajustado foi igual a 0,9176.

$$AF = 5,6364 + \left(\frac{192,3486}{1 + \exp\left(-\frac{GD_{acum} - 612,3152}{131,0675}\right)} \right) \quad r^2_{ajus} = 0,9176 \quad (1.13)$$

em que,

AF = área foliar, cm²;

GD_{acum} = graus-dia acumulados; °Cd;

Por meio da Figura 17 é possível verificar o desempenho estatístico do modelo obtido. Pode-se perceber que a validação com os dados do segundo ciclo de produção apresentou alto coeficiente de precisão e de exatidão.

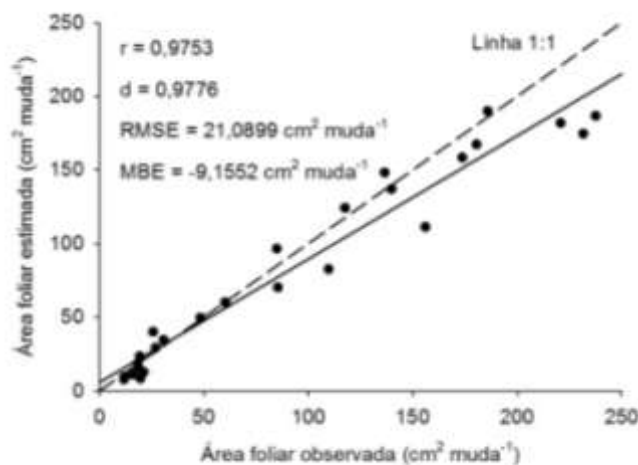


Figura 17. Desempenho estatístico da equação de regressão (Eq.1.13) para estimativa da área foliar durante todo o ciclo de produção das mudas de *Eucalyptus*

A variação das medidas dos parâmetros morfológicos avaliados, entre as mudas de uma mesma bandeja, pode ser explicada pela condição nutricional da planta matriz. XAVIER et al. (2009) afirmam que a nutrição mineral pode influenciar o enraizamento de estacas em decorrência do vigor vegetativo da planta matriz da qual se coletam as brotações e do próprio status nutricional do propágulo coletado.

Já a Figura 18 apresenta o acúmulo de biomassa no decorrer do processo de produção do primeiro ciclo. No início do enraizamento, a média da biomassa fresca das estacas era de $0,28 \pm 0,09$ g muda⁻¹. No fim da rustificação, a média da biomassa fresca das mudas foi igual a $10,41 \pm 2,26$ g muda⁻¹.

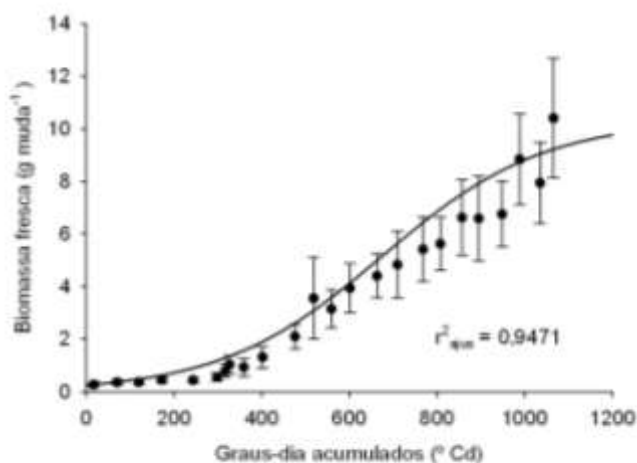


Figura 18. Variação da biomassa fresca das mudas em função do acúmulo dos graus-dia, no primeiro ciclo, em clones de *Eucalyptus*

A partir dos dados de biomassa fresca das mudas e dos graus-dia acumulados, medidos e armazenados no decorrer do experimento, foi possível gerar uma equação correlacionando ambas as variáveis usando o modelo sigmoide com 3 parâmetros (Equação 1.14). O coeficiente de determinação ajustado foi de 0,9471.

$$\text{BFM} = \left(\frac{10,3281}{1 + \exp\left(\frac{\text{GD}_{\text{acum}} - 675,1355}{183,9092}\right)} \right) \quad r^2_{\text{ajus}} = 0,9471 \quad (1.14)$$

em que,

BFM = biomassa fresca das mudas, g muda⁻¹;

GD_{acum} = graus-dia acumulados, °Cd;

O modelo sigmoide representa uma progressão temporal em que no início do experimento a variável analisada apresenta um baixo desenvolvimento, uma região de transição caracterizada por uma forte aceleração, atingindo um clímax após certo tempo, tendendo a apresentar um comportamento constante.

A Figura 19 apresenta a dispersão entre os dados estimados pelo modelo e os observados no segundo ciclo de produção. Verifica-se que o modelo apresentou alta

precisão (r) e exatidão (d) e baixo erro (RMSE). Através do valor MBE, é possível perceber que o modelo subestimou a biomassa observada no segundo ciclo de produção.

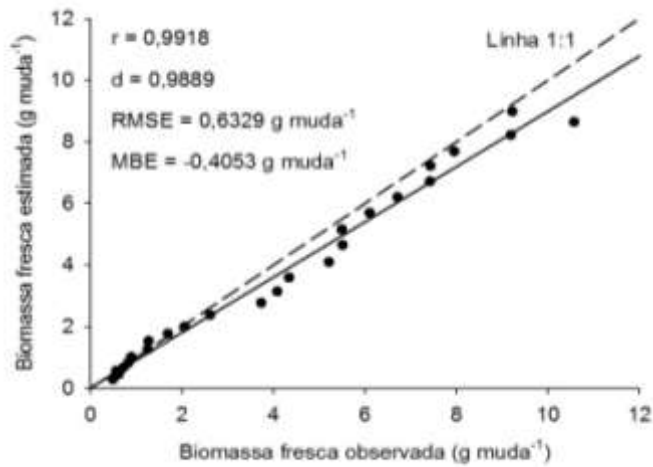


Figura 19. Desempenho estatístico da equação de regressão (Eq.1.14) para estimativa da biomassa fresca das mudas durante todo o ciclo de produção, em clones de *Eucalyptus*

A variação da biomassa seca das mudas (Figura 20) foi de $0,07 \pm 0,02 \text{ g muda}^{-1}$ a $2,70 \pm 0,52 \text{ g muda}^{-1}$, do início ao fim do primeiro experimento. No início do enraizamento o conteúdo de água nas estacas era em torno de 75% e no final da rustificação, por volta de 71%, em relação à biomassa fresca. A diminuição do conteúdo de água nas mudas na fase de rustificação pode estar relacionada a alterações fisiológicas ocorridas no processo de desenvolvimento das mudas, como a lignificação do caule e aumento da espessura foliar, que contribuem para o aumento da matéria seca.

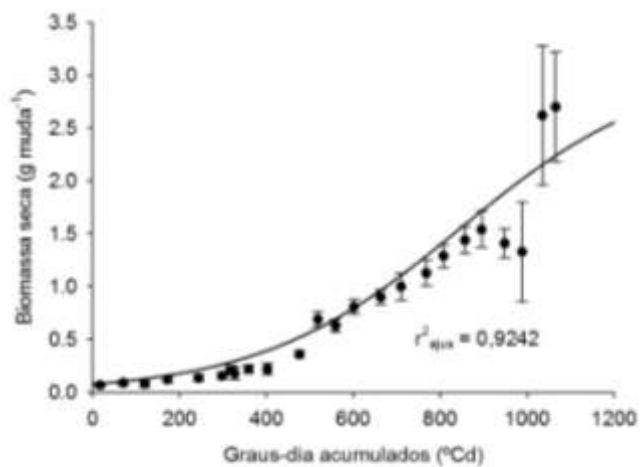


Figura 20. Variação da biomassa seca das mudas em função do acúmulo dos graus-dia, em clones de *Eucalyptus*

Utilizando o modelo sigmoidal com 3 parâmetros, obteve-se a Equação 1.15, que correlaciona o acúmulo de biomassa seca em função da soma térmica. O coeficiente de determinação ajustado foi igual a 0,9242.

$$BSM = \left(\frac{3,1048}{1 + \exp\left(-\frac{GD_{acum} - 846,3373}{230,9001}\right)} \right) \quad r^2_{ajus} = 0,9242 \quad (1.15)$$

em que,

BSM = biomassa seca das mudas, g muda⁻¹;

GD_{acum} = graus-dia acumulados, °Cd;

A dispersão entre os dados observados da biomassa seca no segundo experimento e os estimados pelo primeiro ciclo (Figura 21) mostra que o modelo apresentou alta precisão ($r = 0,9780$) e exatidão ($d = 0,9510$). Através do valor MBE, é possível perceber que o modelo subestimou a biomassa observada.

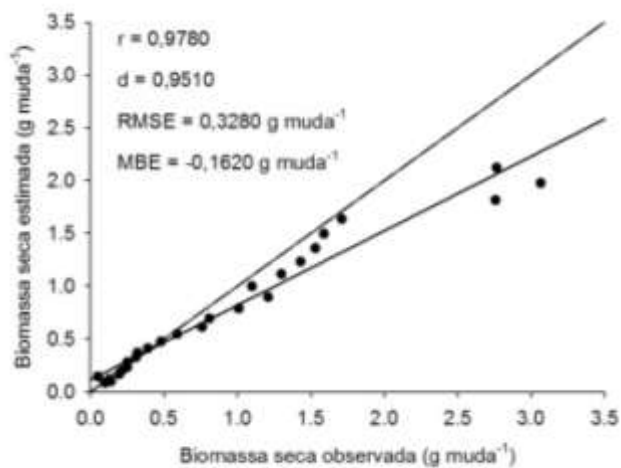


Figura 21. Desempenho estatístico da equação de regressão (Eq.1.15) para estimativa da biomassa seca durante todo o ciclo de produção das mudas de *Eucalyptus*

A Figura 22 apresenta a variação da temperatura mínima, média e máxima no decorrer de ambos os experimentos.

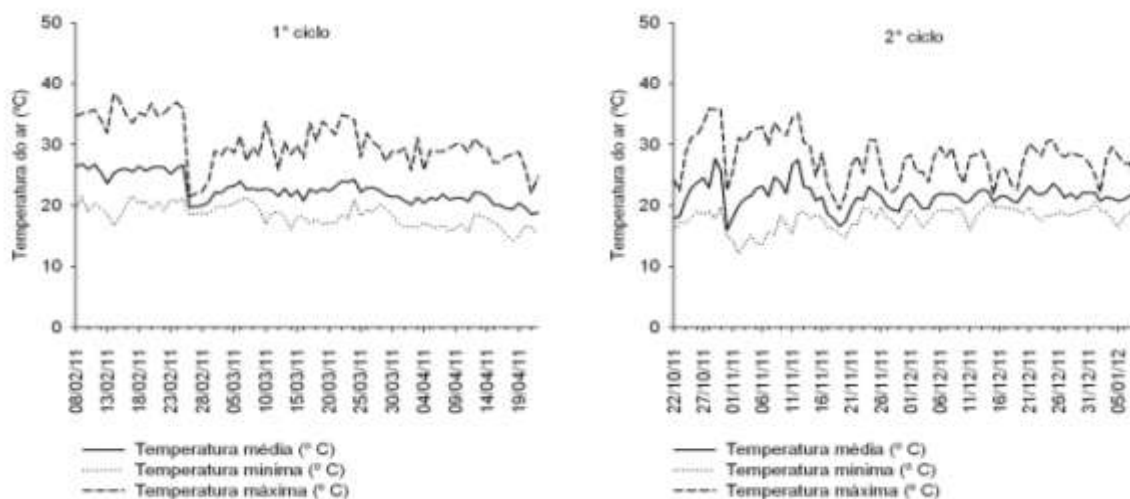


Figura 22. Variação da temperatura mínima, média e máxima, no primeiro e segundo ciclo de produção das mudas de *Eucalyptus*

No primeiro ciclo, a temperatura média variou de 18,6 a 26,8 °C; a mínima de 14,2 a 21,6 °C e a máxima de 21,5 a 38,4 °C e em nenhum momento a temperatura foi menor que a temperatura basal inferior necessária ao crescimento e desenvolvimento das mudas de eucalipto. No segundo, a temperatura média variou de 15,9 a 27,7 °C; a mínima de 12,1 a 20,5 °C e a máxima de 19,4 a 35,9 °C e conforme ocorrido no primeiro ciclo, em nenhum momento a temperatura foi menor que a temperatura basal inferior necessária ao crescimento e desenvolvimento das mudas de eucalipto.

Verifica-se maior amplitude térmica e maior temperatura média no primeiro ciclo de produção, o que contribuiu para a obtenção de maiores valores de graus-dia e, conseqüentemente, de maior rapidez no crescimento e desenvolvimento das mudas de eucalipto, quando comparado ao segundo ciclo.

A Tabela 1 apresenta os valores do Índice de Qualidade de Dickson (IQD) calculados no decorrer do processo de produção de mudas, em ambos os ciclos.

Tabela 1. Índice de Qualidade de Mudanças (IQD) e a soma térmica em cada ciclo de produção

Fase	Ciclo 1		Ciclo 2	
	IQD	Soma térmica	IQD	Soma térmica
Enraizamento	0,02	317	0,03	313
Aclimação	0,02	462	0,05	426
Crescimento	0,14	948	0,13	872
Rustificação	0,19	1065	0,19	1025

Verifica-se que nas fases de enraizamento e aclimação, o IQD no segundo ciclo foi o superior ao primeiro. Esse fato pode ser explicado pela maior biomassa fresca apresentada pelas estacas no segundo ciclo devido à não redução da área foliar no momento do preparo das estacas. A partir da fase de crescimento, em que a adubação realizada manifesta seu efeito, os valores do IQD tenderam a se igualar, pois o crescimento vegetativo foi mais pronunciado em ambos os ciclos. BINOTTO (2007) encontrou um IQD de 0,03 em mudas de *Eucalyptus grandis* produzidas por sementes, aos 90 dias. MORAES (2009), trabalhando com aplicação de preparados homeopáticos em mudas de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), encontrou valores de IQD em torno de 0,15.

Com relação à soma térmica correspondente a cada fase de produção, conforme apresentado na Tabela 1, é possível perceber maior discrepância entre os graus-dia acumulados na fase de aclimação de ambos os ciclos. Isso ocorreu pelo fato desta fase ter uma duração fixa de 10 dias, de acordo com o manejo convencional.

O término das fases de crescimento e rustificação do segundo ciclo de produção foi baseado no Índice de Qualidade de Dickson obtido nas mesmas fases do primeiro ciclo. Visualmente, a finalização da fase de crescimento foi caracterizada pela alteração da coloração das folhas e um leve endurecimento do caule. Ao final da rustificação, foi percebido maior rigidez da parte aérea e coloração avermelhada das folhas (Figura 23).

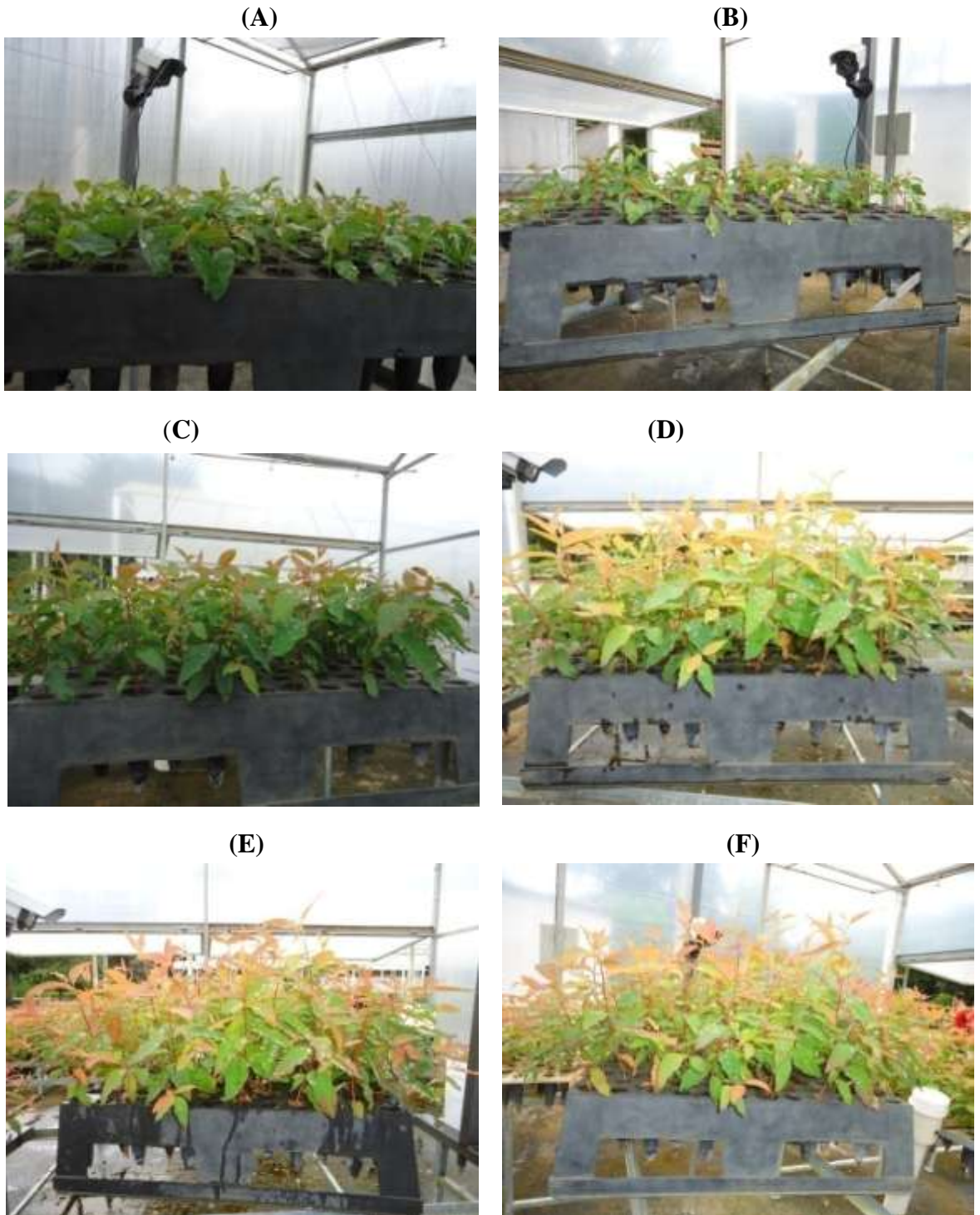


Figura 23. A.Enraizamento;B.Aclimação;C.Crescimento aos 46 dias; D.Crescimento aos 61 dias; E.Crescimento aos 68 dias; F.Rustificação

1.4. CONCLUSÕES

A redução ou não da área foliar das estacas, não influenciou no processo de iniciação radicular. No entanto, aumentou o acúmulo da biomassa das raízes durante o período de enraizamento.

Para o enraizamento das estacas de eucalipto foram necessários aproximadamente 315 graus-dia acumulados. Em média, foram necessários 1045 graus-dia acumulados para a produção das mudas de eucalipto, do enraizamento à rustificação.

O modelo sigmoidal das biomassas fresca e seca, obtidos no primeiro ciclo de produção, apresentou bom desempenho quando validados com os dados do segundo ciclo.

1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J., SANDS, P. J. Parameterization of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, v.193, n. 2, p.179-195, mar. 2004.

ARAÚJO, J.P.C.; SCARPARE FILHO, J.A. & RODRIGUES, A. 2004. Alporquia em Lichia: épocas e concentrações de carboidratos solúveis em ramos. In: **Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Fruticultura**. Florianópolis, 2004, Adaltech, cd-rom.

BINOTTO, A. F. **Relação entre variáveis de crescimento e o Índice de Qualidade de Dickson em mudas de *Eucalyptus grandis* W. Hill. exMaid e *Pinus elliottii* var. *elliottii* – Engelm.** 2007. 54 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

CARMO Júnior, José C. do; SILVA, Aloir R. da. **Produção de mudas de *Eucalyptus* spp. por estaquia.** São Mateus: FRDSA, 1989.

DYE, P. J.; JACOBS, S.; DREW, D. Verification of 3-PG growth and water-use predictions in twelve *Eucalyptus* plantation stands in Zululand, South Africa. **Forest Ecology and Management**. v.193, p.197-218, 2004.

FERNANDES, S. J. de O. **Influência de lâminas de irrigação no minijardim clonal na produção de mudas de eucalipto**. 2011. 54 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal), Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, MG.

FERREIRA, E. M.; ALFENAS, A. C., MAFIA; R. G.; LEITE, H. G.; SARTORIO, R. C.; PENCHEL Filho, R. M. Determinação do tempo ótimo do enraizamento de miniestacas de clones de *Eucalyptus spp*. **Revista Árvore**, v.28, n. 2, p.183-187, 2004.

GOMES, J. M.; COUTO, L.; LEITE, H. G.; XAVIER, A.; GARCIA, S. L. R. Parâmetros morfológicos na avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v.26, n. 6, p.655-664, 2002.

GOULART, P. B. **Influência do acondicionamento, antioxidantes, auxinas e seus cofatores no enraizamento de miniestacas de clones de *E. grandis* x *E. urophylla***. 2007. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

HARTMANN, H. T.; KESTER, D. E.; DAVIES JÚNIOR, F. T.; GENEVE, R. L. **Plant propagation – principles and practices**. New York: Prentice-Hall International, 2011. 770 p.

HIGASHI, E. N.; SILVEIRA, R. L. V. A. de; GONÇALVES, A. N. **Propagação vegetativa de *Eucalyptus*: princípios básicos e a sua evolução no Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 2000. 14p. (Circular Técnica, 192).

INFELD, J. A.; SILVA, J. B. da; ASSIS, F. N. Temperatura-base e graus-dias durante o período vegetativo de três grupos de cultivares em arroz irrigado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.6, n. 2, p.49-53, 1998.

LOPES, J. L. W. **Produção de mudas de *Eucalyptus grandis* W. (Hill ex. Maiden) em diferentes substratos e lâminas de irrigação**. 2004. 100f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

MARTINS, F. B. SILVA, J. C. da.; STRECK, N. A. Estimativa da temperatura-base para emissão de folhas e do filocrono em duas espécies de eucalipto na fase de muda. **Revista Árvore**, v. 31, n. 3, p.373-381, jun. 2007.

MORAES, L. C. C. A. V. **Crescimento e qualidade de mudas clonais de eucalipto com aplicação de preparados homeopáticos**. 2009. 54 f. Dissertação – Programa de Pós Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

NIETO, V. M.; RODRIGUEZ, J. Parte II – Species descriptions *Eucalyptus saligna* Sm.. **Corporacion Nacional de Investigacion Forestal**: Santafé, p.468-469, 2005.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 440p.

PAULA, F. L. M.; STRECK, N. A.; HELDWEIN, A. B.; BISOGNIN, D. A.; PAULA, A. L.; DELLAI, J. Soma térmica de algumas fases do ciclo de desenvolvimento da batata (*Solanum tuberosum* L.).**Ciência Rural**, v.35, n. 35, p.1034-1042, out. 2005.

RIBEIRO, G. T.; PAIVA, H. N.; JACOVINE, L. A. G.; TRINDADE, C. **Produção de mudas de eucalipto**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2001. 122 p.

ROBERTO, S. R.; SATO, A. J.; BRENNER, E. A.; SANTOS, C. E.;GENTA, W. Fenologia e soma térmica (graus-dia) para a videira ‘Isabel’ (*Vitis labrusca*) cultivada no Noroeste do Paraná. **Semina: Ciências Agrárias**, v.25, n. 4, p.273-280, 2004.

SOUZA, A. P.; SILVA, A. C.; LEONEL, S.; ESCOBEDO, J. F. Temperaturas basais e soma térmica para a figueira podada em diferentes épocas.**Revista Brasileira de Fruticultura**, v.31, n. 2, p.314-322, 2009.

STENZEL, N. M. C.; NEVES, C. S. V. J.; MARUR, C. J.; SCHOLZ, M. B. S.; GOMES, J. C. Maturation curves and degree-days accumulation for fruits of ‘folha murcha’ orange trees. **Scientia Agricola**, v.63, n. 3, p.219-225, 2006.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

VILLA NOVA, N. A. A. et al. **Estimativa de graus dia acumulados acima de qualquer temperatura base, em função das temperaturas máxima e mínima.** São Paulo: Instituto de Geografia, USP, 1972. 8p. (Caderno de ciência da terra, n.30).

XAVIER, A.; WENDLING, I.; SILVA, R.L. da. **Silvicultura clonal: princípios e técnicas.** Viçosa: Editora UFV, 2009. 272 p.

CAPÍTULO 2

DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DE UM MINILISÍMETRO DE PESAGEM PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE MUDAS DE EUCALIPTO EM AMBIENTE PROTEGIDO

2.1. INTRODUÇÃO

A evapotranspiração é o processo pelo qual ocorre a transferência de água para a atmosfera, via evaporação do solo e das folhas, além da transpiração da vegetação. Sua determinação é de grande importância para que a reposição de água por meio da irrigação seja equivalente à quantidade perdida pela evapotranspiração das culturas, contribuindo para o uso racional dos recursos hídricos.

Diversos estudos são realizados para a determinação da evapotranspiração de referência e de culturas em geral, utilizando os métodos da razão de Bowen (CARDOSO et. al, 2005; SILVA et. al, 2005), de Penman-Monteith (CUNHA et. al, 2008; GUEDES FILHO et. al, 2011), da lisimetria (SOUSA et. al, 2011), entre outros.

A lisimetria, que consiste na determinação da evapotranspiração a partir da variação da massa de um solo, contabilizando-se as entradas e saídas de água, pode ser dividida em duas categorias: a de pesagem e a de não-pesagem (drenagem e lençol freático de nível constante). Segundo HOWELL et. al (1991) e MENDONÇA et. al (2003), a lisimetria de pesagem é considerada o método padrão para a determinação da evapotranspiração.

Os lisímetros de pesagem utilizam um dispositivo denominado célula de carga, na qual, quando submetida a uma força, ocorre variação da resistência elétrica dos extensômetros (ligados segundo a ponte de Wheatstone), gerando um sinal elétrico proporcional à força aplicada. A utilização de extensômetros elétricos de resistência apresenta como vantagens alta precisão da medida, excelente resposta dinâmica, facilidade de instalação e possibilidade de efetuar medidas à distância.

Ao utilizar a célula de carga, um importante efeito a ser avaliado é a histerese, na qual medições de cargas sucessivas não coincidem com as respectivas descargas. É desejável que esse efeito seja desprezível.

Geralmente, os lisímetros desenvolvidos são volumosos e de grande porte, sendo mais comumente aplicados em condições de campo. No entanto, diversos estudos têm utilizado lisímetros em ambientes protegidos (SANTOS et. al, 2007; REIS, et. al, 2009; VIANA et. al, 2003), nos quais ocorre menor incidência da radiação solar, aumento da temperatura e umidade do ar e redução da velocidade do vento.

Para a cultura do eucalipto, verifica-se escassez de informações referentes ao consumo hídrico pelas mudas, o que pode acarretar na aplicação de água em quantidade menor que o necessário, ocasionando um déficit hídrico e consequente diminuição da produtividade ou na aplicação de água em excesso, promovendo a lixiviação dos nutrientes do substrato e desperdício do recurso natural.

Diante da importância de se determinar a evapotranspiração de culturas para o manejo da irrigação e da carência de informações com relação ao consumo hídrico de mudas de eucalipto, este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e calibração de um minilímetro de pesagem para determinação da evapotranspiração de mudas de eucalipto em ambiente protegido.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Construção e instalação do minilímetro

O minilímetro foi composto por uma caixa de polipropileno utilizada como suporte de tubetes, contendo 96 células, com as dimensões de 435 x 630 x 165 mm (largura x comprimento x altura), a qual foi suspensa por cabos de aço conectados a uma célula de carga com capacidade nominal de 20 kg e precisão de 0,010 kg (SV20, Alfa Instrumentos, Brasil).

A quantidade de tubetes utilizada para preencher a caixa de polipropileno variou em função da fase de produção, sendo 96 tubetes na fase de enraizamento e 48 na aclimação, crescimento e rustificação. Os tubetes foram preenchidos com uma mistura de substrato comercial à base de casca de pinus compostada (MecPlant®), fertilizante super simples e fertilizante de liberação lenta Osmocote® (formulação 19-6-10, Scotts, Ohio, EUA). O enchimento dos tubetes foi realizado de forma manual, sendo que após o preenchimento, prodeceu-se inicialmente 6 batimentos, para a seguir serem completados com o substrato; depois mais 4 batimentos e foram completados e por fim, mais 2 batimentos e completados novamente.

A célula de carga foi acondicionada em um recipiente de acrílico, o qual foi revestido com papel alumínio, para promover a reflexão da radiação solar incidente e impedir o aumento da temperatura do dispositivo, o que poderia acarretar em erros de leituras das tensões (Figura 1).



Figura 1. Detalhe para o recipiente envolto pelo papel alumínio

Para facilitar o deslocamento do minilímetro, o recipiente de acrílico, juntamente à célula de carga, foram fixados a um suporte de metalon que possui formato adaptado ao encaixe às bancadas utilizadas para apoio das bandejas contendo as mudas (Figura 2).



Figura 2. Suporte utilizado para fixação da célula de carga

O minilísímetro foi instalado em ambiente protegido, utilizado para enraizamento e produção de mudas clonais de eucalipto, pelo processo de miniestaquia.

No suporte utilizado para fixação da célula de carga e da bandeja suspensa, foi instalada uma webcam (modelo AW084A, Pixxo, São Paulo), conectada à porta USB do computador, para monitoramento da qualidade visual das mudas de eucalipto.

A quantificação da entrada e saída de água no minilísímetro foi baseada na interceptação de água pelas folhas e pela bandeja e quantidade de água retida nos microporos do substrato.

2.2.2. Aquisição dos dados

Os dados da célula de carga foram transmitidos ao computador por meio de um módulo serial de aquisição de dados (LR-7018, LR Industrial, Brasil), amplamente utilizado em sistemas de automação. Esse módulo foi conectado aos módulos LR-7067D e LR-7520, do mesmo fabricante, sendo estes responsáveis pelo acionamento dos equipamentos e conversão do protocolo de transmissão de dados RS-232 para RS-485, respectivamente (Figura 3).

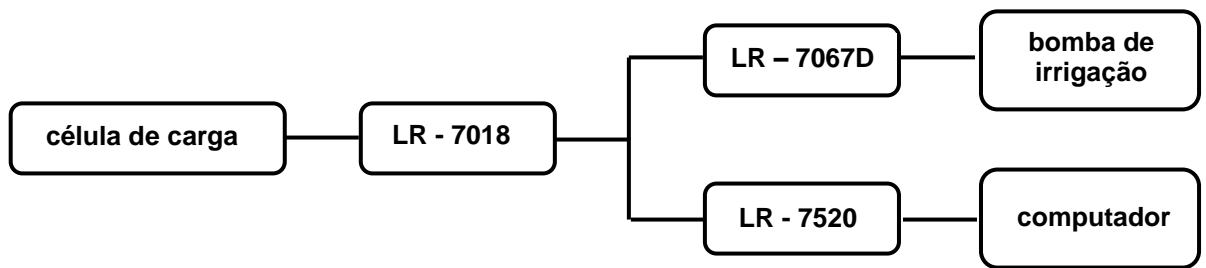


Figura 3. Fluxograma de conexão dos equipamentos

2.2.3. Calibração do minilímetro

Para a calibração do minilímetro de pesagem, foram utilizados sacos plásticos preenchidos por pregos, com massa variando de 0,010 kg a 10 kg. As massas-padrão foram penduradas na célula de carga por meio de um gancho metálico e as leituras das voltagens anotadas para a obtenção da correlação entre as diferentes massas e tensões.

A fim de verificar o efeito da histerese, inicialmente realizou-se o processo denominado carregamento, em que os sacos plásticos foram pendurados, começando pelo de menor massa, sendo as leituras das voltagens anotadas a cada 5 segundos, que é o intervalo de leitura do sistema de aquisição de dados (Figura 4). Após a adição de todas as massas, o procedimento inverso foi realizado, isto é, os sacos plásticos foram retirados, no mesmo intervalo de tempo, iniciando pelo de 10 kg e finalizando com o de 0,010 kg (descarregamento).

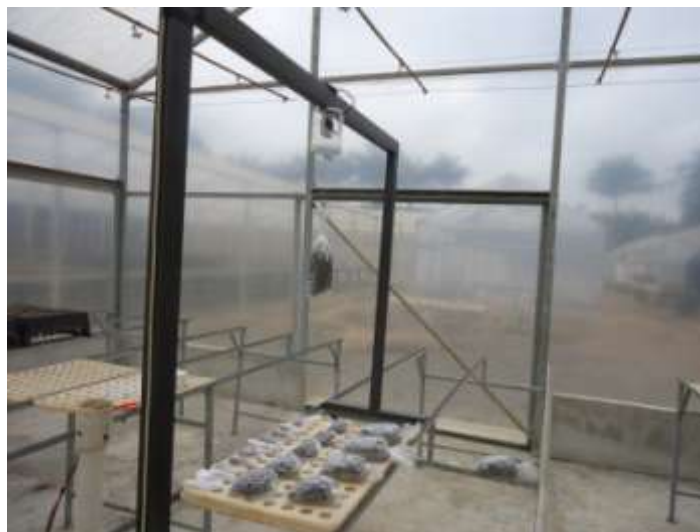


Figura 4. Adição e retirada das massas-padrão

A carga e descarga do sistema de medição foi realizada durante cinco dias, a fim de expor a célula de carga a diferentes temperaturas, com o objetivo de verificar se essa

variável promovia alterações das leituras das tensões. O monitoramento da temperatura da célula de carga foi realizado por cinco dias consecutivos por meio de um termopar do tipo T, também conectado ao módulo de aquisição de dados.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 apresenta a relação entre a tensão lida, em mV, e a massa utilizada durante o processo de calibração. É possível verificar, com base no alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,99$), que o modelo linear demonstrou uma estreita relação entre a massa da bandeja de cultivo e a tensão elétrica aplicada aos terminais da célula de carga. Pesquisas que utilizaram lisímetro de pesagem (CAMPECHE, 2002; CAMPECHE et. al 2011; CARVALHO et. al, 2007; FARIA et. al, 2006; MIRANDA et. al 1999) também demonstraram altos coeficientes de determinação.

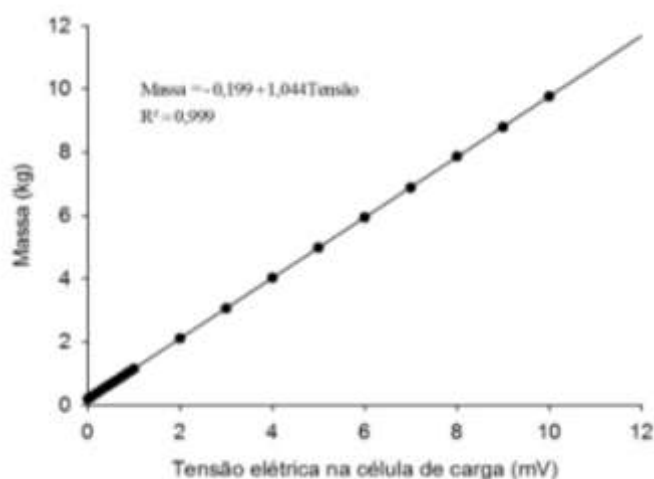


Figura 5. Relação entre a tensão da célula de carga (mV) e a massa da bandeja de cultivo (kg)

Quanto à avaliação do efeito da histerese, verifica-se a partir da Figura 6, que este fenômeno pode ser considerado desprezível na utilização do minilísímetro, visto que a carga e descarga progressiva das massas-padrão, no intervalo de tempo pré-estabelecido, proporcionou tensões elétricas semelhantes.

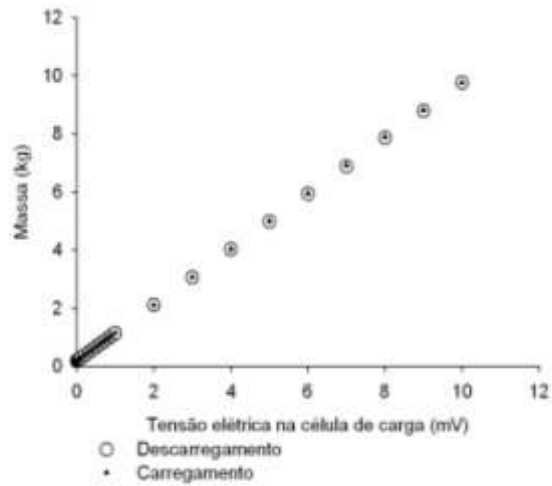


Figura 6. Carregamento e descarregamento das massas-padrão

Com relação à variação da tensão elétrica aplicada aos terminais da célula de carga em função da temperatura do ar no ambiente de cultivo, observa-se na Figura 7 que uma diferença de aproximadamente 4°C na temperatura não acarreta em alteração na massa estimada pelo sistema.

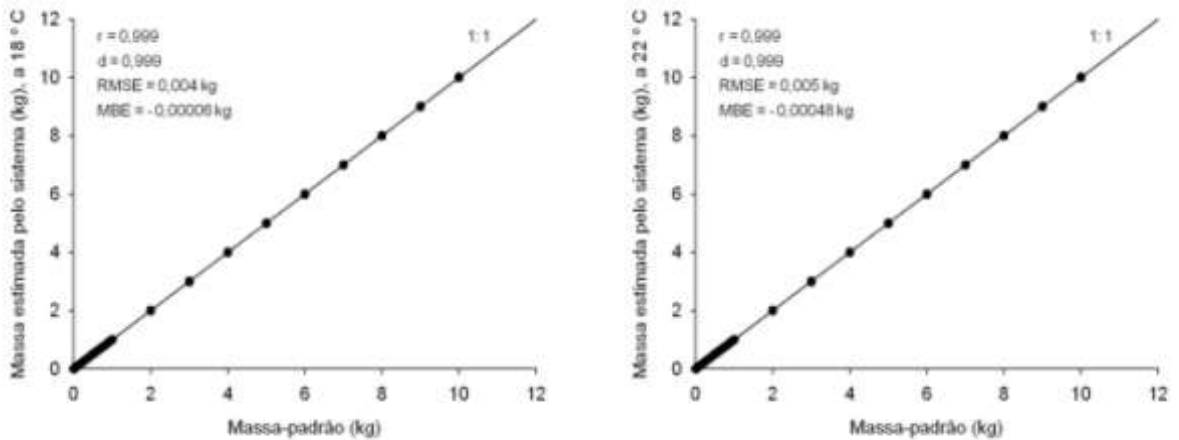


Figura 7. Massa estimada pelo sistema em função da variação da temperatura

Isso ocorre devido à introdução de resistências especiais (denominadas de dummy), no circuito de Wheatstone, que variam com o calor de forma inversa à dos extensômetros, compensando os efeitos da temperatura (KILIAN, 2000). Resultados semelhantes foram apresentados por SILVA et. al (1999) e FIELTZ et. al (2003).

2.4. CONCLUSÕES

O minilísímetro de pesagem proposto apresentou alta relação linear entre as massas-padrão e a tensão elétrica aplicada nos terminais da célula de carga. Além disso, não foi observado efeito significativo da temperatura do ar no sinal elétrico da célula de carga, permitindo sua utilização em ambientes protegidos para determinação da evapotranspiração.

2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMPECHE, L. F. M. S.. **Construção, calibração e análise de funcionamentos de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida ‘Tahiti’ (*Citruslatifolia* Tan.)**. 2002. 64p. Tese. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

CAMPECHE, L. F. M. S.; AGUIAR NETTO, A. O.; SOUSA, I. F.; FACCIOLI, G. G.; SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte I: Desenvolvimento e calibração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.5, p. 519-525, 2011.

CARDOSO, G. B.; VIANA, T. V. A.; AZEVEDO, B. M.; SOUSA, V. F.; SOUSA, F. Determinação da ET de referência pela razão de Bowen com psicrômetros instalados a diferentes alturas. **Revista Ciência Agronômica**, v.36, n.1, p. 16-23, 2005.

CARVALHO, F. D.; Silva, L. D. B.; GUERRA, J. G. M.; CRUZ, F. A.; SOUZA, A. P. Instalação, calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v. 27, n.2, p. 363-372, 2007.

CUNHA, A. R.; VOLPE, C. A.; ESCOBEDO, F. J. Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith (FAO-56) com saldo de radiação medido por diferentes sensores. **Agronomía Tropical**, v.58, n.1, p.81-84, 2008.

FARIA, R. T.; CAMPECHE, F. S. M.; CHIBANA, E. Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 237-242, 2006.

FIELTZ, C. R.; SILVA, F. C.; URCHEI, M. A. Instalação e calibração de lisímetros de pesagem para medida de evapotranspiração de culturas anuais. In: **Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, 13, Santa Maria: SBA, 2003, p. 411-412.

GUEDES FILHO, D. H.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; COSTA FILHO, J. F.; FRANCISCO, P. R. M.; Campos, V. B. Estimativa da evapotranspiração de referência para a cidade de Areia, Paraíba. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.5, n.1, p.37-47, 2011.

HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D.; JENSEN, M. E. History of lysimeter designer and use for evapotranspiration measurements. In: Allen, R. G. et. al (Ed.). **Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991, p. 1-9.

KILIAN, C. T. **Modern Control Technology: Componentes and systems**, Delmar Thomson Learning, 2000.

MIRANDA, F. R.; YODER, R. E.; SOUZA, F. Instalação e calibração de um lisímetro de pesagem no projeto de irrigação Curu-Paraipaba, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.1, p. 107-110, 1999.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p. 275-279, 2003.

REIS, L. S.; SOUZA, J. L.; AZEVEDO, C. A. V. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do tomate caqui cultivado em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.3, p.289-296, 2009.

SANTOS, R. A.; FOLEGATTI, M. V.; BOTREL, T. A.; ATARASSI, R. T.; ALVES JÚNIOR, J. Projeto, construção e calibração de um lisímetro móvel de pesagem, com célula de carga hidráulica, para determinação da demanda hídrica de mudas cítricas em casa de vegetação. **Irriga, Botucatu**, v. 12, n.2, p. 202-215, 2007.

SILVA, F. C.; FOLEGATTI, M. V.; MAGIOTTO, S. R. Análise do funcionamento de um lisímetro de pesagem com célula de carga. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.1, p.53-58, 1999.

SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; VILLA NOVA, N. A. Evapotranspiração do capim tanzânia obtida pelo método da razão de Bowen e lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.25, n.3, p. 705-712, 2005.

SOUSA, I. F.; NETTO, A. O. A.; CAMPECHE, L. F. M. S.; BARROS, A. C.; SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte II: Consumo hídrico do coqueiro anão verde irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.5, p.526-532, 2011.

VIANA, T. V. A.; FOLEGATTI, M. V.; AZEVEDO, B. M.; BONFIM, G. V.; ELÓI, W. M. Evapotranspiração obtida com o sistema razão de Bowen e com um lisímetro de pesagem em ambiente protegido. **Irriga, Botucatu**, v.8, n.2, p. 113-119, 2003.

Portal informativo sobre células de carga e suas aplicações. Disponível em <www.celuladecarga.com.br>. Acesso em: 22 dez. 2011.

CAPÍTULO 3

DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NAS DIVERSAS FASES DE PRODUÇÃO DE MUDAS DE EUCALIPTO

3.1. INTRODUÇÃO

O Brasil detém 11,6% de toda a água doce existente no planeta, apresentando alto potencial hidrológico. Apesar disso, verifica-se que o uso indiscriminado desse recurso tem gerado discussões quanto ao alcance de um desenvolvimento sustentável para o país. De acordo com MENDONÇA (2004), 67% da água disponível é utilizada na agricultura, 23% na indústria e 10% para o abastecimento público.

O advento da irrigação possibilitou o aumento da produção de culturas em regiões que apresentavam limitações hídricas. No entanto, o decréscimo da disponibilidade da água e o excesso de sua aplicação por meio da irrigação, devido a um manejo inadequado, têm aumentado o interesse pelo aperfeiçoamento da técnica, de modo a aumentar sua eficiência.

A irrigação aplicada na medida certa é fundamental na produção de mudas de qualidade, visto que a falta ou excesso de água pode comprometer o crescimento e desenvolvimento das mesmas e a produtividade no campo. A redução da disponibilidade de água no solo afeta drasticamente o metabolismo das plantas (TAIZ & ZEIGER, 2004). De acordo com LARCHER (2000), a primeira resposta ao déficit hídrico é a diminuição da turgescência dos vegetais. Associado a isso, ocorre o fechamento estomático que compromete a absorção de gás carbônico, afetando a biossíntese das plantas. Por outro lado, a aplicação de água em excesso acarreta na lixiviação de nutrientes, diminuição da oxigenação das raízes (favorecendo o geotropismo negativo) e favorecimento à ocorrência de doenças.

A utilização inadequada da irrigação em viveiros florestais resulta em alta mortalidade das mudas, bem como plantas muitas vezes tortuosas, aumentando, assim, os custos de produção e o plantio destas (FREITAG, 2007).

Geralmente, é observado alto consumo de água em viveiros destinados à produção de mudas florestais pelo fato da aplicação de água via irrigação não

corresponder apenas à necessidade hídrica das mudas. RODRIGUES (2007) afirma que para a produção de 12 milhões de mudas de eucalipto, no município de Martinho Campos (MG), foram necessários 592 m³ de água por dia. FREITAG (2007) cita que, em média, são utilizados 10 m³ dia⁻¹ para a produção de 100 mil mudas por ano.

No entanto, a preocupação com relação à otimização dos recursos hídricos tem aumentado cada vez mais por parte de empresas florestais. Aliado a isso, existe a exigência de empresas certificadoras, no caso, a FSC (Forest Stewardship Council) ou Conselho de Manejo Florestal, que estabelece regras que visam o cumprimento de questões ambientalmente adequadas, socialmente benéficas e economicamente viáveis, desde a fase de produção de mudas ao plantio no campo.

Considerando que a evapotranspiração representa a perda conjunta de água pelo solo e superfícies livres e também pelas plantas, verifica-se a necessidade de realizar sua determinação para que a água repostada via irrigação seja aquela que efetivamente foi perdida durante o processo de produção de mudas, favorecendo o processo de otimização do uso da água.

Dentre os métodos para estimativa e medida da evapotranspiração, cita-se como mais utilizados o método da razão de Bowen (CARDOSO et. al, 2005; SILVA et. al, 2005; BEZERRA et. al, 2008), de Penman-Monteith (LIMA et. al, 2006; CUNHA et. al, 2008; REIS et. al, 2009; GUEDES FILHO et. al, 2011) e da lisimetria (SOUSA et. al, 2011), sendo este considerado o método padrão para determinação da evapotranspiração.

A evapotranspiração que ocorre em dada parcela de solo cultivado depende das condições meteorológicas reinantes, da atividade biológica da vegetação presente e ainda da umidade disponível na zona das raízes (VAREJÃO-SILVA, 2006). As variáveis meteorológicas que influenciam fortemente a evapotranspiração são a temperatura, umidade, radiação solar e velocidade do vento.

Diante do exposto, a presente pesquisa teve como objetivo a determinação da evapotranspiração de mudas de eucalipto, em cada fase de produção, a fim de determinar as necessidades hídricas das mudas, buscando promover a otimização do uso da água em viveiros florestais. Especificamente, visou a obtenção de modelos de estimativa da evapotranspiração, para cada fase de produção, a partir de variáveis meteorológicas medidas externamente ao ambiente protegido.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

Para determinação da evapotranspiração nas diversas fases de produção de mudas de eucalipto, optou-se pela utilização de um minilísímetro de pesagem, o qual foi desenvolvido e calibrado para utilização em ambiente protegido (Figura 1).

O minilísímetro consistiu de um equipamento composto por uma bandeja com capacidade unitária para 96 tubetes, sustentada por uma célula de carga e controlado por um sistema computacional que determinava a variação de sua massa e conseqüentemente a evapotranspiração das mudas. Além disso, o sistema foi responsável pelo controle da irrigação, conforme a necessidade hídrica das plantas nas diferentes fases da produção.

Considerando que a produção de mudas de eucalipto é realizada em quatro fases distintas (enraizamento, aclimação, crescimento e rustificação) e que cada uma delas demanda um tipo de estrutura que favoreça seu crescimento e desenvolvimento, optou-se pela instalação do minilísímetro em uma estrutura adaptada para atender a todas às fases. Com isso, foi possível evitar a necessidade de remanejamento da estrutura do minilísímetro instalada no interior do ambiente protegido.



Figura 1. Instalação do minilísímetro no centro do ambiente protegido

O sistema computacional utilizado para o monitoramento e controle do minilísímetro foi desenvolvido nas linguagens PHP, Shell Script, Ckernit e a plataforma utilizada foi a Debian Linux. Utilizou-se o banco de dados MySQL, tornando possível seu acesso via web através da rede local e internet.

3.2.1. Cálculo da Evapotranspiração

Sabendo-se que a evapotranspiração é a perda de água via transpiração das plantas e evaporação de água do substrato e das folhas, podemos inferir que uma forma eficiente de determiná-la seria através da determinação da diferença entre a massa ideal (M_{Ideal}) e da massa atual (M_{Atual}) do minilímetro.

Consideramos neste trabalho que a massa ideal é aquela formada pela soma da massa das mudas (M_{Mudas}), da bandeja ($M_{Bandeja}$), do conjunto tubete/substrato/água retida nos microporos ($M_{Tubete/substrato/água}$) e massa de água interceptada pelas folhas e pela bandeja ($M_{Água\ Interceptada}$), conforme mostrado no esquema abaixo:

$$M_{Ideal} = M_{Mudas} + M_{Bandeja} + M_{Tubetes/substrato/água\ nos\ microporos} + M_{Água\ Interceptada}$$

Já a massa atual é aquela apresentada pelo minilímetro em tempo real.

3.2.1.2. Cálculo da massa ideal

Para estabelecer os valores de M_{Ideal} foi necessário determinar a massa das seguintes variáveis:

3.2.1.2.1. Massa das mudas

O acúmulo de graus-dia permite que a espécie vegetal atinja certo grau de desenvolvimento fenológico. Assim, a partir dos dados de biomassa fresca das plantas obtidas no primeiro ciclo de produção e dos graus-dia acumulados, foi possível gerar uma equação que correlacionasse ambas as variáveis (Equação 3.1).

$$BFM = \frac{10,3281}{1 + \exp\left(-\left(\frac{GD_{acum} - 675,1355}{183,9092}\right)\right)} \quad (3.1)$$

em que,

BFM = biomassa fresca das mudas, em g muda⁻¹;

GD_{acum} = graus-dia acumulados, em °C;

Os graus-dia acumulados foram calculados a partir da metodologia proposta por Villa Nova (1972), conforme visualizado por meio das Equações 3.2 a 3.5.

$$GD_{acum} = \sum_{i=1}^n [(T_{min} - T_i) + \frac{(T_{max} - T_{min})}{2}] \quad (3.2)$$

$$GD_{acum} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(T_{max} - T_i)^2}{2(T_{max} - T_{min})} \right] \quad (3.3)$$

$$GD_{acum} = \sum_{i=1}^n [(T_{min} - T_i) + \frac{(T_{max} - T_{min})}{2} - \frac{(T_{max} - T_s)^2}{2 \cdot (T_{max} - T_{min})}] \quad (3.4)$$

$$GD_{acum} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(T_{max} - T_i)^2}{2 \cdot (T_{max} - T_{min})} - \frac{(T_{max} - T_s)^2}{2 \cdot (T_{max} - T_{min})} \right] \quad (3.5)$$

em que,

GD_{acum} = graus-dia acumulados, °C;

n = número de dias, adimensional;

T_{min} = temperatura do ar mínima diária, °C;

T_i = temperatura basal inferior da cultura, °C;

T_{max} = temperatura do ar máxima diária, °C;

T_s = temperatura basal superior da cultura, °C.

A utilização destas equações pelo sistema computacional do minilísímetro foi baseada na comparação entre as temperaturas mínima e máxima ocorridas durante o dia e as temperaturas basais inferior e superior da cultura. Os valores das temperaturas máxima e mínima do dia foram determinados a cada 24 horas, por meio de um termopar do tipo T.

3.2.1.2.2. Massa da bandeja

A bandeja de polipropileno, utilizada para apoio dos tubetes, possuía as dimensões de 435 x 630 x 165 mm (largura x comprimento x altura), com capacidade unitária para 96 tubetes e massa de 1,250 kg.

3.2.1.2.3. Massa do conjunto tubete/substrato/água retida nos microporos

A massa dos tubetes e do substrato foi obtida com o auxílio de uma balança de precisão com resolução de 0,01 g (modelo SA 210, Scientech, EUA).

Os tubetes foram preenchidos com uma mistura de substrato comercial à base de casca de pinus compostada (MecPlant®), fertilizante super simples e fertilizante de liberação lenta Osmocote® (formulação 19-6-10, Scotts, Ohio, EUA).

Para caracterização física do substrato comercial foi efetuada a análise da porosidade total, macroporosidade, microporosidade e densidade. A determinação da porosidade do substrato foi obtida por meio da metodologia descrita por LOPES (2004). Para isso, foram utilizados 10 tubetes de polipropileno, que foram numerados e tiveram sua capacidade volumétrica medida com o auxílio de uma proveta. Após revestir o fundo dos tubetes com uma tela, a fim de evitar a perda de material durante a determinação das características físicas do substrato, os tubetes tiveram suas massas determinadas. O enchimento dos tubetes com o substrato comercial foi realizado manualmente, da seguinte maneira: preencheu-se os tubetes, realizou-se 6 batimentos para acomodação do substrato e a seguir completou-os novamente. Em seguida foram realizados mais 4 batimentos, com posterior complementação com o substrato e por fim mais 2 batimentos e novo preenchimento.

Após esse procedimento os tubetes foram acondicionados em uma caixa de isopor e sofreram absorção de água de baixo para cima até a borda dos tubetes, por 1 hora. Em seguida, procedeu-se a drenagem por 30 minutos. Após a drenagem, realizou-se novamente o preenchimento dos tubetes, devido à acomodação inicial do substrato, com reabsorção de água por mais 1 hora.

Posteriormente à reabsorção, os tubetes tiveram o orifício tampado para não drenar a água existente e a água das paredes externas foram enxugadas com um papel toalha para que então suas massas fossem determinadas em uma balança de precisão com resolução de 0,01 g (modelo SA 210, Scientech, EUA).

Após a determinação da massa dos tubetes com o substrato encharcado, promoveu-se uma primeira drenagem com os tubetes suspensos em uma bandeja, por 1 hora. Posteriormente, com o fundo dos tubetes em contato com uma espuma plástica, promoveu-se uma segunda drenagem, por mais 12 horas.

Depois da segunda drenagem, determinou-se a massa dos tubetes com o substrato drenado. Após esse procedimento, o substrato de cada tubete foi transferido

para cápsulas de alumínio, devidamente numeradas, que também tiveram suas massas determinadas. As cápsulas foram levadas à estufa, a uma temperatura de 75 °C, permanecendo por 24 horas, para a secagem do substrato.

As cápsulas de alumínio contendo o substrato foram retiradas da estufa e tiveram suas massas determinadas na mesma balança.

A macroporosidade e microporosidade foram determinadas a partir das Equações 3.6 e 3.7. A densidade foi obtida pela Equação 3.8.

$$\text{Macroporosidade (\%)} = [(A-B) / C] \times 100 \quad (3.6)$$

$$\text{Microporosidade (\%)} = [(B-D-E) / C] \times 100 \quad (3.7)$$

$$\text{Densidade (g cm}^{-3}\text{)} = [(D-E) / C] \times 100 \quad (3.8)$$

em que,

A = massa do substrato encharcado, em g;

B = massa do substrato drenado, em g;

C = volume do tubete, em ml;

D = massa do substrato seco, em g;

E = massa do tubete e/ou da cápsula de alumínio, em g;

A porosidade total foi obtida somando-se a macroporosidade e a microporosidade.

Após a determinação da microporosidade do substrato, foi possível obter a quantidade de água retida nos microporos.

3.2.1.2.4. Massa da água interceptada pelas folhas e pela bandeja

A massa da água interceptada pelas folhas e pela bandeja foi obtida por meio da diferença entre a massa da bandeja com as mudas antes e após um evento de irrigação. A quantidade de água interceptada foi diferente para as fases de enraizamento/aclimação e crescimento/rustificação.

3.2.2.2. Cálculo da massa atual

A massa atual do minilímetro foi calculada por meio da célula de carga. Este dispositivo gera uma tensão elétrica proporcional à força aplicada, sendo a aquisição dos dados realizada pelo módulo LR-7018.

Para obtenção da massa atual correlacionou-se a tensão gerada pela célula de carga com massas-padrão, obtendo a seguinte equação:

$$M_{\text{Atual}} = - (0,199 \pm 0,0013) + (1,044 T \pm 0,0004) \quad r^2_{\text{ajust}} = 0,9999 \quad (3.9)$$

em que,

M_{Atual} = massa atual do minilímetro, em kg;

T = tensão elétrica, em mV.

É importante ressaltar que M_{Atual} sofre influência das variáveis meteorológicas reinantes, como radiação solar, temperatura, umidade relativa e velocidade do vento. Para isso fez-se necessárias medições destas variáveis, por meio de sensores instalados em uma estação meteorológica localizada próximo ao ambiente protegido no qual o minilímetro foi instalado.

Os dados foram coletados em intervalos de 1 segundo e armazenados em um datalogger (modelo CR10X, Campbell Scientific Instruments, EUA).

Na Tabela 1 são apresentados os sensores utilizados no experimento para medição das variáveis meteorológicas.

Tabela 1 - Especificações dos sensores utilizados para medição das variáveis ambientais

Variável medida	Especificações dos instrumentos meteorológicos
Temperatura e umidade	Termohigrômetro (modelo HPMP45AC, Vaisala, Helsinski, Finland)
Radiação solar	Piranômetro (modelo CM3, Kipp&Zonen, Röntgenweg, The Netherlands)
Velocidade do vento	Anemômetro de conchas (modelo TE525, Campbell Scientific Instruments, Utah, USA)

Após a coleta dos dados de temperatura e umidade, foi realizado o cálculo do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar, conforme mostrado na Equação 3.10, proposta por VIANELLO & ALVES (1991).

$$DPV = \left(0,6108 \exp\left(\frac{17,27 t}{237,3+t}\right) \right) - \left(\frac{0,6108 \exp\left(\frac{17,27 t}{237,3+t}\right)}{100} UR \right) \quad (3.10)$$

em que,

DPV = déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar, em kPa;

t = temperatura do ar, ° C;

UR = umidade relativa do ar, %;

3.2.2. Manejo da irrigação

O controle da irrigação pelo sistema foi realizado com base na variação de M_{Atual} do minilímetro, sendo realizado de forma distinta em cada fase de produção das mudas. O sistema de irrigação foi acionado quando M_{Atual} atingia uma massa-limite, que é o valor de massa mínimo que não interferia no desenvolvimento das plantas. Esses valores variavam de acordo com cada etapa da produção.

Na fase de enraizamento, a massa-limite para acionamento da irrigação ocorria quando aproximadamente 60% da água interceptada pelas folhas e pela bandeja era evaporada.

Na fase de aclimatação, o limite para acionamento ocorria quando a água interceptada pelas folhas e pela bandeja era evaporada e quando ocorria uma redução de 10% da quantidade de água retida nos microporos do substrato.

Na fase de crescimento, o limite para acionamento da irrigação ocorria quando a água interceptada pelas folhas e pela bandeja era evaporada e quando 20% da quantidade de água retida nos microporos do substrato era reduzida.

Na fase de rustificação, a massa-limite para acionamento da bomba de irrigação ocorria quando a água interceptada pelas folhas e pela bandeja era evaporada e também quando ocorria uma redução de 30% da quantidade de água retida nos microporos do substrato.

As porcentagens estipuladas para redução da quantidade de água interceptada pelas folhas e a retida pelos microporos do substrato foram baseadas nas exigências de cada fase de produção, de acordo com os seguintes requisitos: na fase de enraizamento é necessário presença de água sobre as folhas, uma vez que as mudas ainda não possuem raízes para absorção de água do substrato, evitando a morte das estacas por desidratação; nas demais fases foram necessárias presença de água no substrato, sendo que, à medida

em que as fases vão ocorrendo, maior é a capacidade das mudas suportarem mais tempo sem receber irrigação.

Para todas as fases, após o acionamento da irrigação, a bomba era desligada quando a M_{Atual} se igualasse à M_{Ideal} do minilímetro.

3.2.3. Rotina de cálculo

A Figura 2 representa o fluxograma da rotina de cálculos realizados pelo sistema para determinação da evapotranspiração e controle da irrigação.

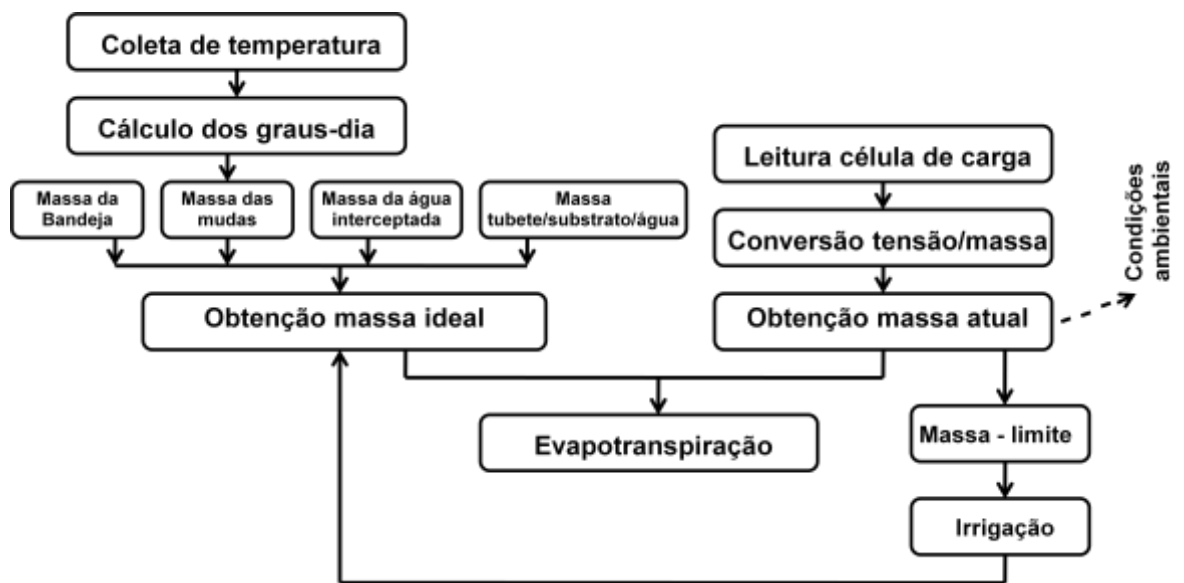


Figura 2. Fluxograma da rotina de cálculos realizada pelo sistema

A fim de verificar se a evapotranspiração obtida pelo uso do minilímetro era representativa para as demais mudas, foram monitoradas em determinados dias as massas de três bandejas escolhidas aleatoriamente, presentes no interior do ambiente protegido. As massas foram medidas com o auxílio de uma balança de precisão com resolução de 0,01 g (modelo SA 210, Scientech, EUA).

Após os eventos de irrigação, o minilímetro teve sua massa inicial anotada e o mesmo procedimento ocorria com as três bandejas utilizadas como repetição. Antes que o próximo evento de irrigação ocorresse, novamente eram anotadas as massas finais do minilímetro e das bandejas. A diferença entre a massa final e a massa inicial fornecia a quantidade de água evapotranspirada.

3.2.4. Estimativa da evapotranspiração a partir de variáveis meteorológicas externas

A estimativa da evapotranspiração das mudas, em cada fase de produção, foi realizada com base em um modelo de regressão linear múltipla, a partir das variáveis meteorológicas externas (temperatura, umidade, radiação solar e velocidade do vento).

A análise estatística foi realizada com o auxílio do software Sigma Plot, versão 11.0.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1. Características físicas do substrato

A Tabela 2 apresenta os resultados da macroporosidade (%), microporosidade (%), porosidade total (%) e densidade aparente do substrato (g cm^{-3}).

Tabela 2. Análise física do substrato utilizado para propagação vegetativa do eucalipto

Características físicas	Macroporosidade (%)	Microporosidade (%)	Porosidade Total (%)	Densidade Aparente (g cm^{-3})
	22,1	50,2	72,2	0,3

Considerando que o volume médio dos tubetes utilizados na determinação das características físicas foi igual a 48,9 ml, conclui-se que a quantidade de água retida nos microporos foi igual a 24,6 ml.

A determinação de características físicas como a macroporosidade e microporosidade é de extrema importância, visto que durante o processo de produção de mudas o substrato deve garantir o suprimento de oxigênio para o sistema radicular (COSTA, 2003).

3.3.2 Consumo hídrico

Os resultados foram apresentados separadamente a fim de verificar a necessidade hídrica das mudas em cada fase de produção.

3.3.2.1. Enraizamento

Conforme descrito na metodologia, o limite para acionamento da irrigação na fase de enraizamento ocorria quando aproximadamente 60% da água interceptada pelas folhas e pela bandeja era evaporada, o que correspondia a uma massa de 50 g de água.

A permanência de água sobre as folhas se justifica no fato de que a ausência de raízes ou a presença de raízes pouco funcionais exige que a frequência de irrigação seja maior para que sempre seja mantida água sobre a superfície das folhas, evitando a morte das estacas por desidratação.

A Figura 3 apresenta a variação diária da evapotranspiração (mm) e da radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), ocorrida no decorrer do experimento. Verifica-se que a evapotranspiração variou de 0,11 a 4,53 mm d^{-1} e a radiação solar de 5,42 a 25,64 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

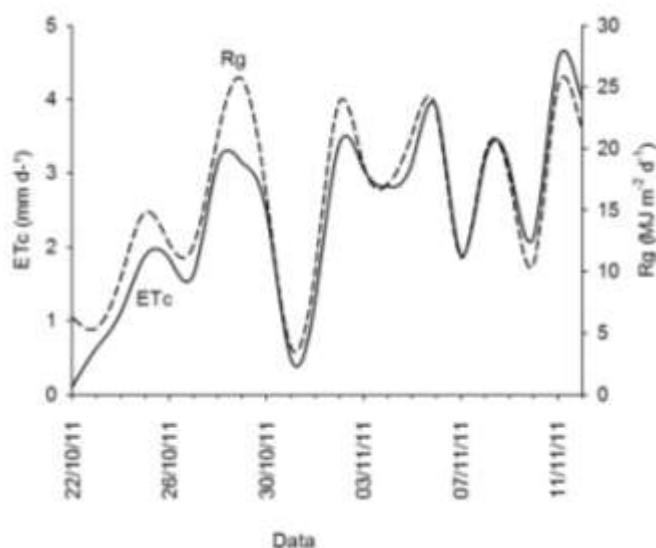


Figura 3. Variação diária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes da radiação solar global (Rg) durante o período de enraizamento

Considerando a variação horária, a Figura 4 mostra o comportamento da evapotranspiração, das 6 às 18 horas, em função da radiação solar. Observa-se que a evapotranspiração atingiu maiores valores (0,34 mm) por volta das 12 horas.

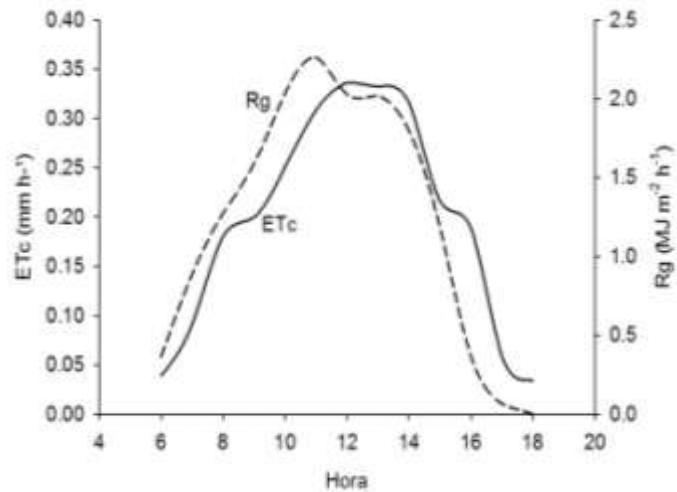


Figura 4. Variação horária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes da radiação solar global (Rg) durante o período de enraizamento

Com relação ao déficit de pressão de vapor, a Figura 5 mostra que a variação foi de 0,07 a 0,75 kPa e que seu aumento provocou aumento da evapotranspiração diária.

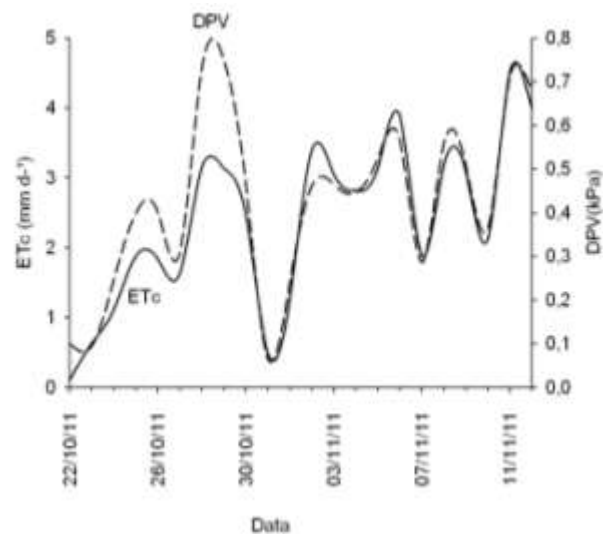


Figura 5. Variação diária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes do déficit de pressão de vapor (DPV) durante o período de enraizamento

A Figura 6 mostra a variação horária da evapotranspiração e do déficit de pressão de vapor, de 6 às 18 horas.

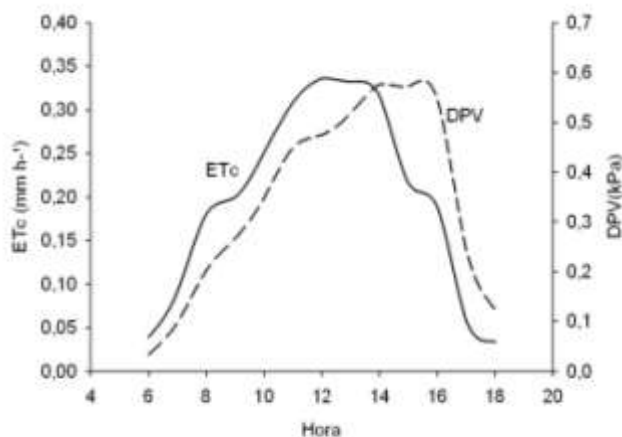


Figura 6. Variação horária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes do déficit de pressão de vapor (DPV) durante o período de enraizamento

Em relação à lâmina aplicada (Figura 7), considerando que no manejo convencional a irrigação é acionada por 12 segundos quando a temperatura está acima de 30 °C ou a umidade está abaixo de 85%, é possível observar que, na maioria dos dias, a lâmina aplicada pelo manejo convencional foi superior ao manejo otimizado, no qual a aplicação de água foi realizada devido à necessidade hídrica das mudas.

A maior lâmina aplicada pelo manejo otimizado, em determinados dias, pode ser explicada pela baixa disponibilidade de radiação solar ocorrida, o que contribuiu para a diminuição da temperatura e aumento da umidade no interior da casa-de-vegetação, impedindo o acionamento da irrigação de acordo com o manejo convencional. Porém, mesmo sob baixa disponibilidade da radiação solar, em determinados momentos, o acionamento da irrigação ocorreu pelo manejo otimizado, contribuindo ainda mais para o aumento da umidade e diminuição da temperatura no interior da casa-de-vegetação.

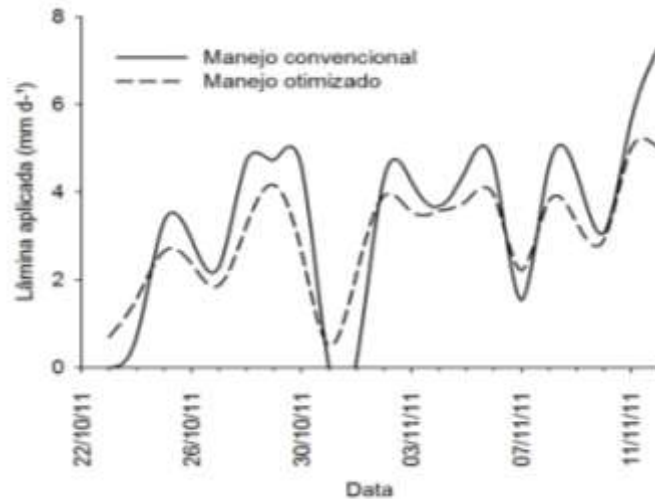


Figura 7. Lâminas de irrigação aplicadas pelo manejo convencional e manejo otimizado, no período de enraizamento

A Tabela 3 apresenta a comparação entre o consumo hídrico diário no decorrer da fase de enraizamento. Verifica-se que a economia hídrica foi igual a 11,9 %.

Tabela 3. Comparação entre a lâmina aplicada no manejo convencional e otimizado

Data	Lâmina aplicada (mm)	
	Manejo convencional	Manejo otimizado
22/10/2011	-	-
23/10/2011	-	0,69
24/10/2011	0,69	1,56
25/10/2011	3,33	2,65
26/10/2011	2,92	2,37
27/10/2011	2,29	1,87
28/10/2011	4,72	3,24
29/10/2011	4,72	4,16
30/10/2011	4,58	2,66
31/10/2011	-	0,50
01/11/2011	0,14	2,11
02/11/2011	4,31	3,91
03/11/2011	4,24	3,55
04/11/2011	3,68	3,57
05/11/2011	4,51	3,79
06/11/2011	4,65	3,94
07/11/2011	1,53	2,21
08/11/2011	4,58	3,79

09/11/2011	4,44	3,32
10/11/2011	3,06	2,90
11/11/2011	5,63	5,00
12/11/2011	7,29	5,01
Total (mm)	71,3	62,8
Economia hídrica (%)	11,9	

Espera-se que a economia hídrica seja ainda maior nessa fase da produção de mudas, pois os altos valores de temperatura (acima de 30 °C) e baixos valores de umidade (abaixo de 85%) foram monitorados no mesmo ambiente em que a irrigação era ativada de acordo com a variação da massa do minilímetro. Nesse caso, o acionamento da irrigação pelo manejo otimizado contribuiu para a diminuição da temperatura e aumento da umidade no interior da casa-de-vegetação, impedindo que a contabilização dos momentos de acionamento pelo manejo convencional fosse realizada.

De acordo com o manejo convencional, foram consumidos, em média, 3,24 mm d-1. Através do manejo otimizado foram consumidos uma média de 2,86 mm dia-1. Durante a fase de enraizamento foram consumidos 2,26 m³ de água.

O modelo de estimativa da evapotranspiração, em escala horária, foi obtido a partir dos dados de temperatura e umidade no interior da casa-de-vegetação e da radiação solar externa (Equação 3.11).

$$ET_c = (0,1011 \pm 0,0039)RS + (0,1399 \pm 0,0100)DPV \quad (3.11)$$

em que,

ET_c = evapotranspiração das mudas, mm h⁻¹;

RS = radiação solar, MJ m⁻²;

DPV = déficit de pressão de vapor, kPa;

A Tabela 4 apresenta os resultados estatísticos referentes ao modelo obtido na fase de enraizamento.

Tabela 4. Parâmetros da regressão múltipla entre a evapotranspiração das mudas de eucalipto e variáveis do ambiente meteorológico (Rg e DPV) no exterior do ambiente protegido para o período de enraizamento

Variáveis meteorológicas	Parâmetros	Percentual de variação da ETc explicada pelas variáveis independentes
Radiação solar (MJ/m ²)	0,1011	72,1%
DPV (kPa)	0,1399	12,2%

O coeficiente de determinação ajustado foi igual a 0,8425, indicando que o modelo demonstra ser satisfatório para a estimativa da evapotranspiração em escala horária.

A Figura 8 mostra a dispersão entre a evapotranspiração medida pelo minilímetro e a estimada pelo modelo. Verifica-se que o modelo apresentou alta precisão ($r = 0,9200$) e exatidão ($d = 0,9776$).

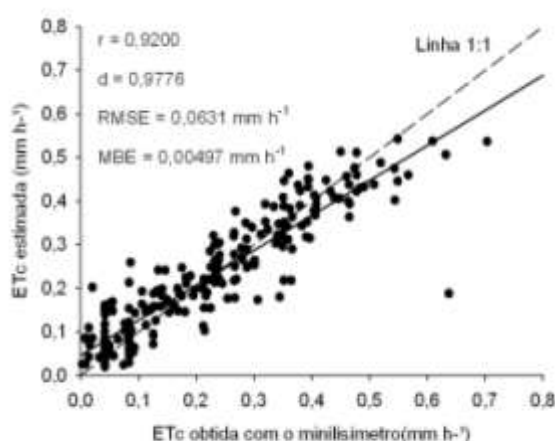


Figura 8. Desempenho estatístico da equação de regressão múltipla (Eq. 3.11) para estimativa da evapotranspiração de mudas de eucalipto durante o período de enraizamento

3.3.2.2. Aclimação

Na fase de aclimação, conforme especificado na metodologia, o limite para acionamento ocorria quando a água interceptada pelas folhas e pela bandeja era evaporada e quando ocorria uma redução de 10% da quantidade de água retida nos microporos do substrato. Diante do exposto, a cada evento de irrigação a quantidade de água perdida era igual a 168,08 ml por bandeja.

A Figura 9 apresenta a variação diária da evapotranspiração (mm) e da radiação solar (MJ m⁻²), ocorrida no decorrer do experimento. Verifica-se que a evapotranspiração variou de 0,67 a 4,23 mm d⁻¹ e a radiação solar de 4,51 a 18,9 MJ m⁻² d⁻¹.

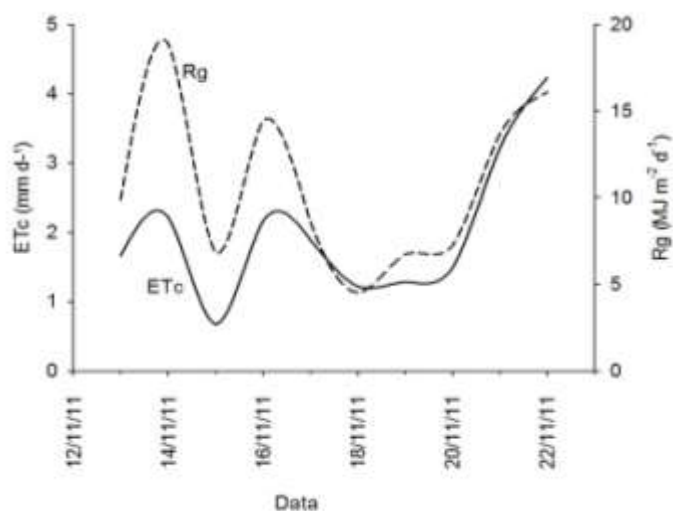


Figura 9. Variação diária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes da radiação solar global (Rg) durante o período de aclimação

Considerando a variação horária, a Figura 10 mostra o comportamento da evapotranspiração, das 6 às 18 horas, em função da radiação solar. Observa-se que os maiores valores da evapotranspiração ocorreram entre 11 e 14 horas.

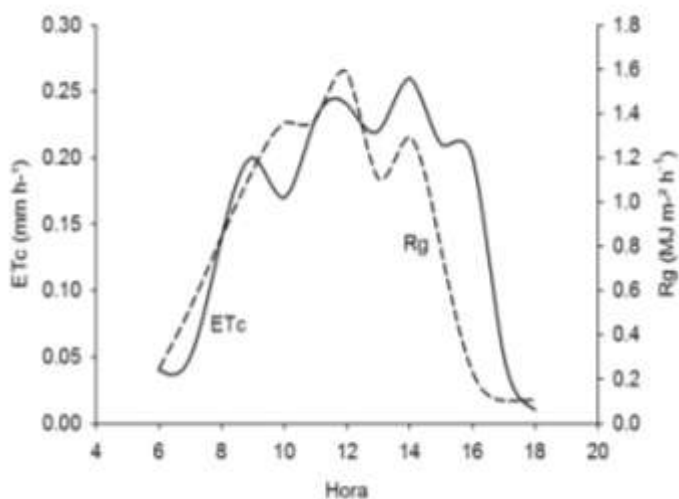


Figura 10. Variação horária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes da radiação solar global (Rg) durante o período de aclimação

Com relação ao déficit de pressão de vapor, a Figura 11 mostra que a variação foi de 0,18 a 1,16 kPa e que seu aumento provocou aumento da evapotranspiração diária.

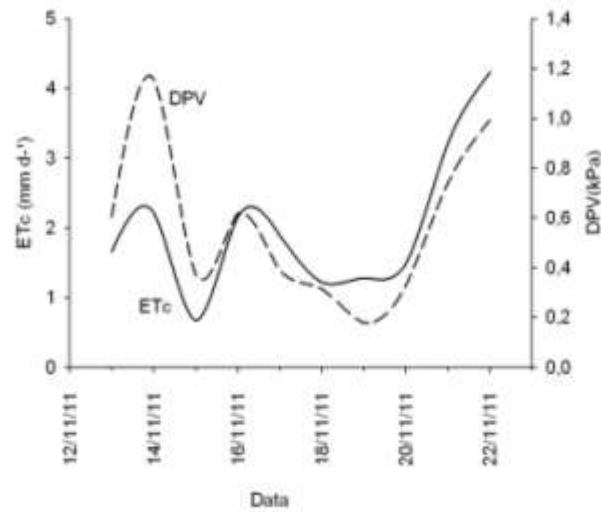


Figura 11. Variação diária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes do déficit de pressão de vapor (DPV) durante o período de aclimação

A Figura 12 mostra a variação horária da evapotranspiração e do déficit de pressão de vapor, de 6 às 18 horas.

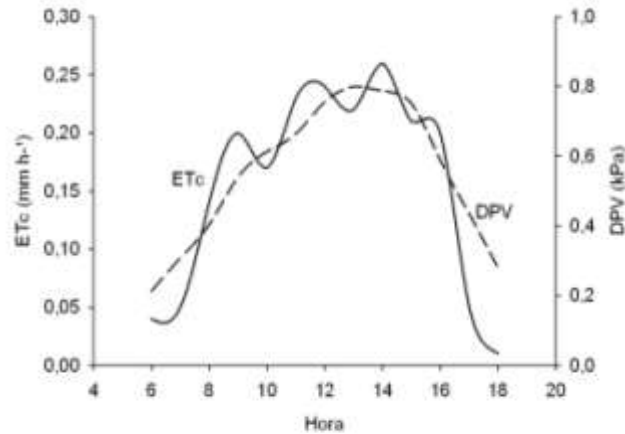


Figura 12. Variação horária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes do déficit de pressão de vapor (DPV) durante o período de aclimação

Quanto à velocidade do vento, a Figura 13 mostra que o aumento da velocidade do vento acarreta em maiores valores de evapotranspiração.

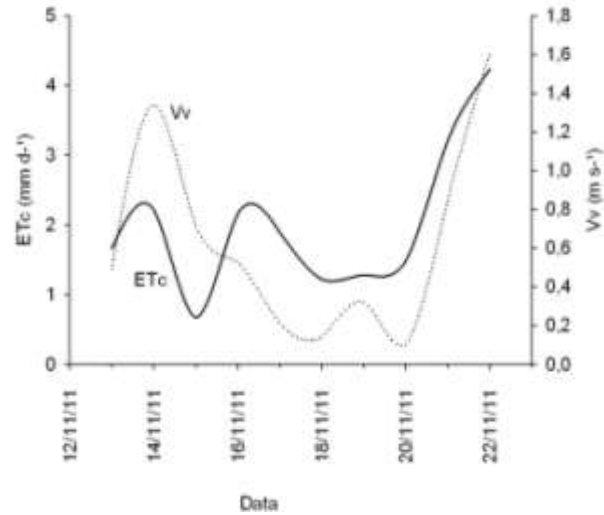


Figura 13. Variação diária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes da velocidade do vento (Vv) durante o período de aclimação

A Figura 14 mostra a variação horária da evapotranspiração e a velocidade do vento, de 6 às 18 horas.

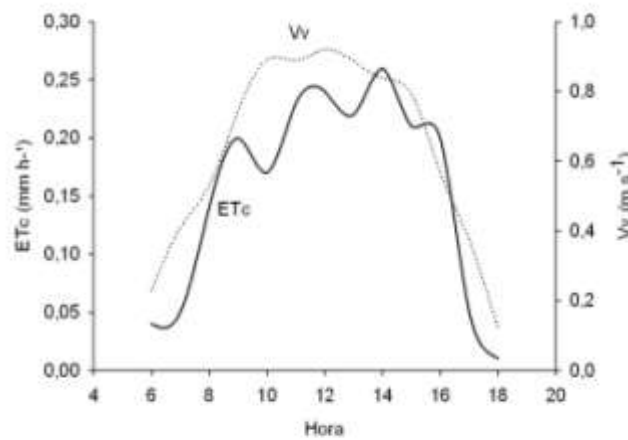


Figura 14. Variação horária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes da velocidade do vento (Vv) durante o período de aclimação

Em relação à lâmina aplicada (Figura 15), considerando que no manejo convencional a irrigação é acionada por 5 minutos às 8h, 10h, 14h e 16h, é possível observar que a lâmina aplicada pelo manejo convencional foi superior ao manejo otimizado, no qual a aplicação de água foi realizada devido à necessidade hídrica das

mudas. Após a permanência das mudas por cinco dias na casa de sombra, a irrigação foi acionada apenas 2 vezes ao dia (8h e 14 h), durante 5 minutos.

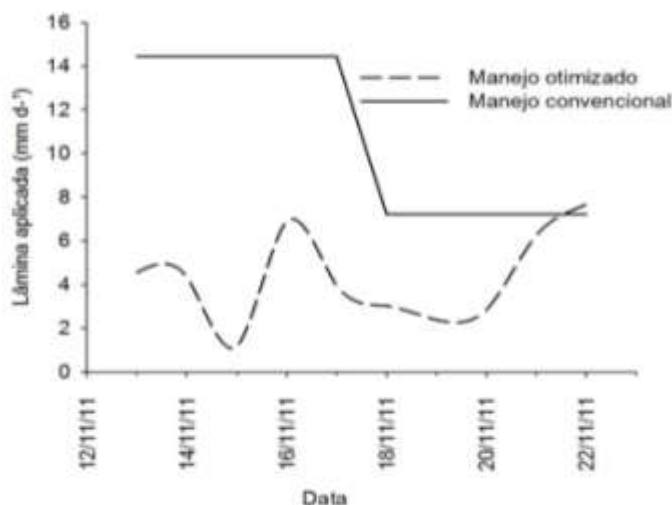


Figura 15. Lâminas de irrigação aplicadas pelo manejo convencional e manejo otimizado, no período de aclimação

A Tabela 5 apresenta a comparação entre o consumo hídrico diário no decorrer da fase de aclimação, na qual verificou-se uma economia hídrica igual a 60,3%.

Tabela 5. Comparação entre a lâmina aplicada no manejo convencional e otimizado, na aclimação

Data	Lâmina aplicada (mm)	
	Manejo convencional	Manejo otimizado
13/11/2011	14,44	4,55
14/11/2011	14,44	4,36
15/11/2011	14,44	1,13
16/11/2011	14,44	6,9
17/11/2011	14,44	3,94
18/11/2011	7,22	3,03
19/11/2011	7,22	2,38
20/11/2011	7,22	2,83
21/11/2011	7,22	6,25
22/11/2011	7,22	7,66
13/11/2011	14,44	4,55
Total (mm)	108,3	43,0
Economia hídrica (%)	60,3	

De acordo com o manejo convencional, em média, foram consumidos 10,83 mm dia⁻¹, enquanto que no manejo otimizado foram consumidos uma média de 4,30 mm dia⁻¹. Durante toda a fase de aclimação foram consumidos 1,55 m³ de água.

Para a estimativa da evapotranspiração na fase de aclimação em escala horária foram consideradas temperatura e umidade do ar (DPV), radiação solar e velocidade do

vento externa ao ambiente protegido. No entanto, apenas o DPV e a radiação solar foram significativas (Equação 3.12).

$$ET_c = 0,00957RS + 0,1680 DPV \quad (3.12)$$

em que,

ETC = evapotranspiração das mudas, mm h⁻¹;

RS = radiação solar, MJ m⁻²;

DPV = déficit de pressão de vapor, kPa;

A Tabela 6 apresenta os resultados estatísticos referentes ao modelo obtido na fase de aclimação.

Tabela 6. Parâmetros da regressão múltipla entre a evapotranspiração das mudas de eucalipto e variáveis do ambiente meteorológico (Rg e DPV) no exterior do ambiente protegido para o período de aclimação

Variáveis meteorológicas	Parâmetros	Percentual de variação da ET _c explicada pelas variáveis independentes
Radiação solar (MJ m ⁻²)	0,00957	44,6 %
Déficit de Pressão de Vapor (kPa)	0,1680	7,3%

O coeficiente de determinação ajustado foi igual a 0,5189, indicando que o modelo foi razoavelmente satisfatório para a estimativa da evapotranspiração em escala horária.

A Figura 16 mostra a dispersão entre a evapotranspiração medida pelo minilímetro e a estimada pelo modelo. Verifica-se que o modelo apresentou média precisão ($r = 0,7221$) e alta exatidão ($d = 0,9241$).

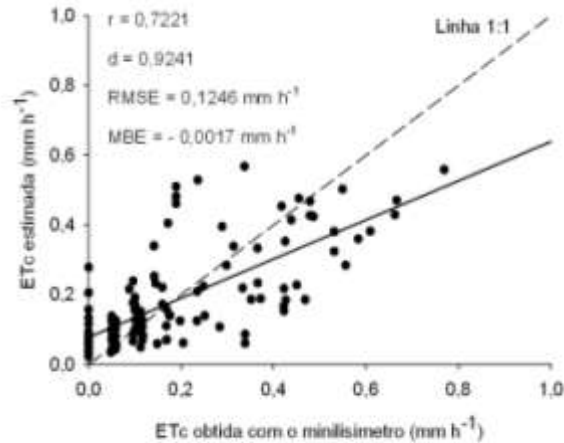


Figura 16. Desempenho estatístico da equação de regressão múltipla (Eq. 3.12) para estimativa da evapotranspiração de mudas de eucalipto durante o período de aclimação

3.3.3.3. Crescimento

Na fase de crescimento, o limite para acionamento ocorria quando a água interceptada pelas folhas e pela bandeja era evaporada e quando ocorria uma redução de 20% da quantidade de água retida nos microporos do substrato. Nesse sentido, a cada evento de irrigação a quantidade de água perdida era igual a 276,2 ml.

A Figura 17 apresenta a variação diária da evapotranspiração (mm) e da radiação solar (MJ m^{-2}), ocorrida no decorrer do experimento. Verifica-se que a evapotranspiração variou de 1,10 a 9,51 mm d^{-1} e a radiação solar de 4,16 a 24,26 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

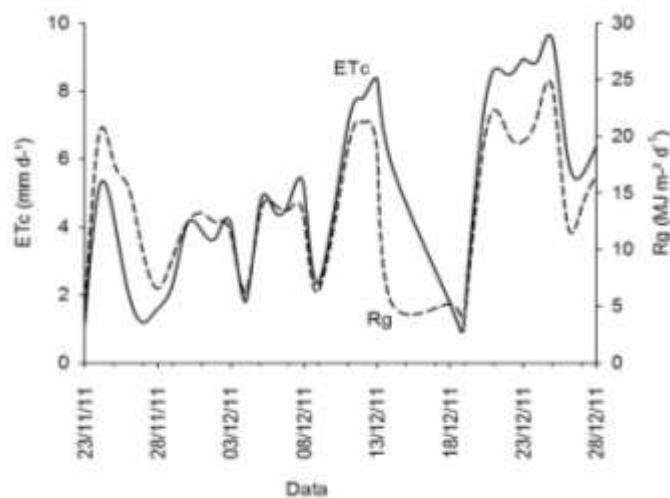


Figura 17. Variação diária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes da radiação solar global (Rg) durante o período de crescimento

Considerando a variação horária, a Figura 18 mostra o comportamento da evapotranspiração, das 6 às 18 horas, em função da radiação solar. Observa-se que o maior valor da evapotranspiração (0,57 mm) ocorreu às 12 horas.

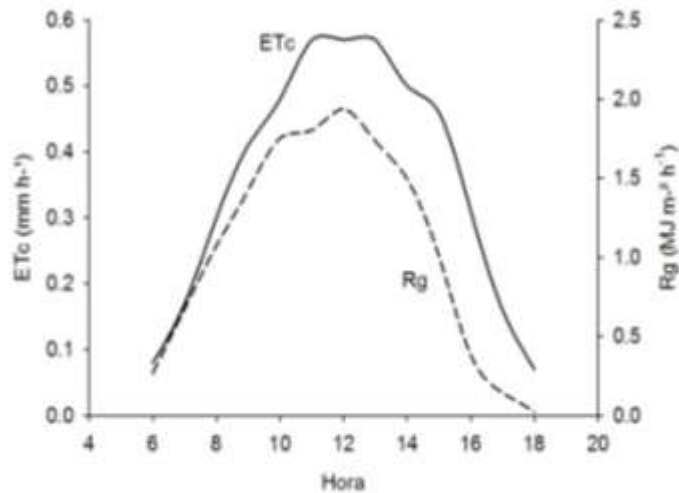


Figura 18. Variação horária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes da radiação solar global (Rg) durante o período de crescimento

Com relação ao déficit de pressão de vapor, a Figura 19 mostra que a variação foi de 0,17 a 1,66 kPa e que seu aumento provocou aumento da evapotranspiração diária.

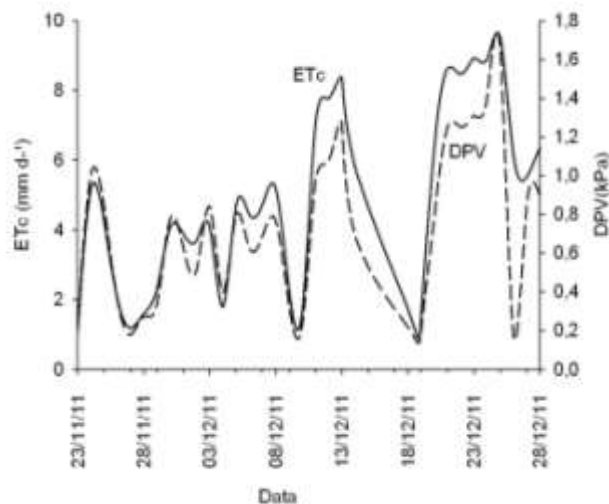


Figura 19. Variação diária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes do déficit de pressão de vapor (DPV) durante o período de crescimento

A Figura 20 mostra a variação horária da evapotranspiração e do déficit de pressão de vapor, de 6 às 18 horas.

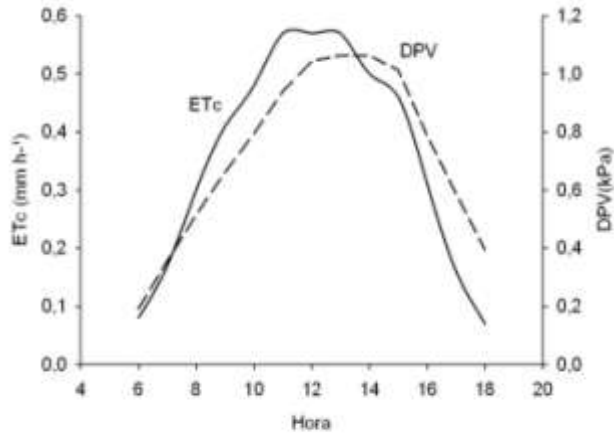


Figura 20. Variação horária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes do déficit de pressão de vapor (DPV) durante o período de crescimento

Quanto à velocidade do vento, a Figura 21 mostra que o aumento da velocidade do vento acarreta em maiores valores de evapotranspiração.

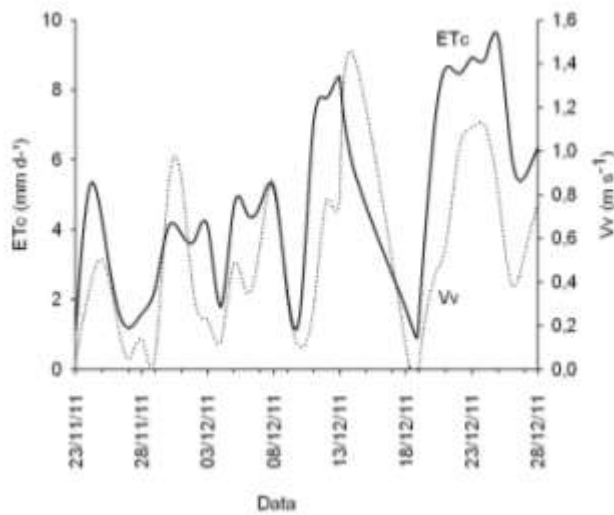


Figura 21. Variação diária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes da velocidade do vento (Vv) durante o período de crescimento

A Figura 22 mostra a variação horária da evapotranspiração e a velocidade do vento, de 6 às 18 horas.

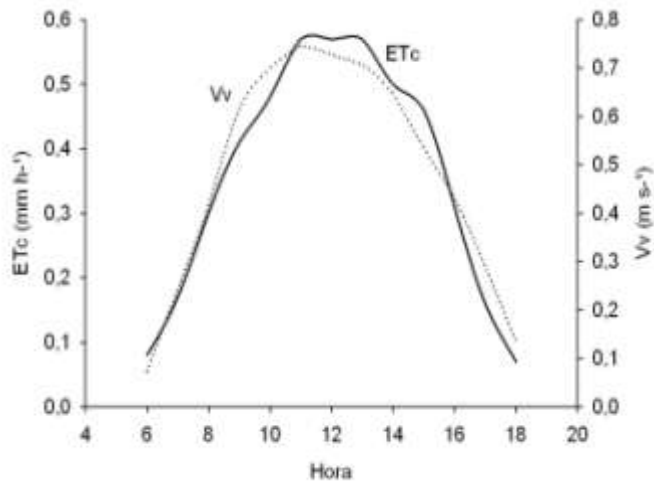


Figura 22. Variação horária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes da velocidade do vento (Vv) durante o período de crescimento

Em relação à lâmina aplicada (Figura 23), considerando que no manejo convencional a irrigação é acionada por 10 minutos às 10h e 15h, é possível observar que a lâmina aplicada pelo manejo convencional foi superior ao manejo otimizado, no qual a aplicação de água foi realizada devido à necessidade hídrica das mudas.

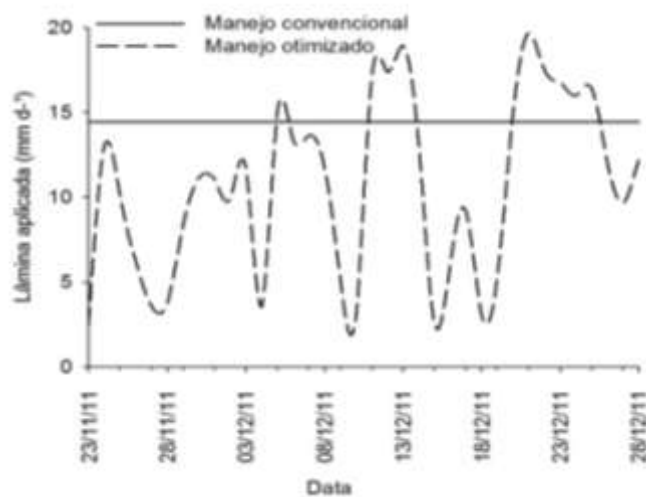


Figura 23. Lâminas de irrigação aplicadas pelo manejo convencional e manejo otimizado, no período de crescimento

A Tabela 7 apresenta a comparação entre o consumo hídrico diário no decorrer da fase de crescimento. Verifica-se que a economia hídrica foi igual a 25,6%.

Tabela 7. Comparação entre a lâmina aplicada no manejo convencional e otimizado, no crescimento

Data	Lâmina aplicada (mm)	
	Manejo convencional	Manejo otimizado
23/11/2011	14,44	2,44
24/11/2011	14,44	13,02
25/11/2011	14,44	10,11
26/11/2011	14,44	6,21
27/11/2011	14,44	3,55
28/11/2011	14,44	3,76
29/11/2011	14,44	8,31
30/11/2011	14,44	11,12
01/12/2011	14,44	11,06
02/12/2011	14,44	9,87
03/12/2011	14,44	11,74
04/12/2011	14,44	3,51
05/12/2011	14,44	15,03
06/12/2011	14,44	13,39
07/12/2011	14,44	13,66
08/12/2011	14,44	11,76
09/12/2011	14,44	5,25
10/12/2011	14,44	2,95
11/12/2011	14,44	17,06
12/12/2011	14,44	17,38
13/12/2011	14,44	18,93
14/12/2011	14,44	13,17
15/12/2011	14,44	2,55
16/12/2011	14,44	6,02
17/12/2011	14,44	9,15
18/12/2011	14,44	3,03
19/12/2011	14,44	5,33
20/12/2011	14,44	14,95
21/12/2011	14,44	19,68
22/12/2011	14,44	17,49
23/12/2011	14,44	16,80
24/12/2011	14,44	15,99
25/12/2011	14,44	18,51
26/12/2011	14,44	12,04
27/12/2011	14,44	9,65
28/12/2011	14,44	12,24
Total (mm)	519,8	386,6
Economia hídrica (%)	25,6	

De acordo com o manejo convencional, em média, foram consumidos 14,4 mm d⁻¹. Através do manejo otimizado foram consumidos uma média de 10,74 mm d⁻¹. Durante a fase de crescimento foram consumidos 13,91 m³ de água.

O modelo de estimativa da evapotranspiração na fase de crescimento foi obtido a partir da temperatura e umidade (DPV), radiação solar e velocidade do vento externa (Equação 3.13).

$$ETc = (0,1529 \pm 0,0093) RS + (0,2035 \pm 0,0144) DPV + (0,1200 \pm 0,0178) VV \quad (3.13)$$

em que,

ETc = evapotranspiração das mudas, mm h⁻¹;

RS = radiação solar, MJ m⁻²;

DPV = déficit de pressão de vapor, kPa;

VV = velocidade do vento, m s⁻¹.

A Tabela 8 apresenta os resultados estatísticos referentes ao modelo obtido na fase de crescimento.

Tabela 8. Parâmetros da regressão múltipla entre a evapotranspiração das mudas de eucalipto e variáveis do ambiente meteorológico (Rg e DPV) no exterior do ambiente protegido para o período de crescimento

Variáveis meteorológicas	Parâmetros	Percentual de variação da ETc explicada pelas variáveis independentes
Radiação solar (MJ m ⁻²)	0,1529	70,3%
Déficit de Pressão de Vapor (kPa)	0,2035	8,9%
Velocidade do vento (ms ⁻¹)	0,1200	6,2%

O coeficiente de determinação ajustado foi igual a 0,854, indicando que o modelo demonstra ser satisfatório para a estimativa da evapotranspiração em escala horária.

A Figura 24 mostra a dispersão entre a evapotranspiração observada e a estimada pelo modelo. Verifica-se que o modelo apresentou alta precisão ($r = 0,9290$) e exatidão ($d = 0,9630$).

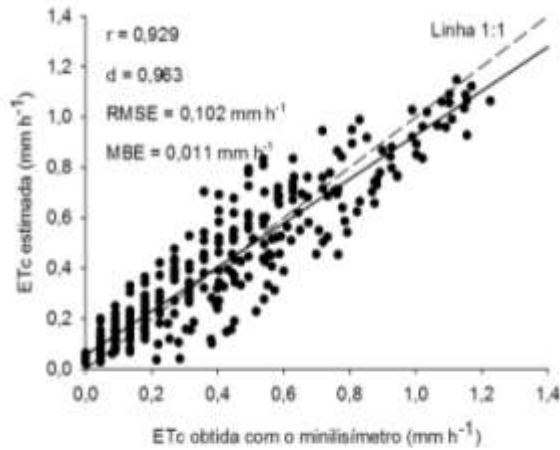


Figura 24. Desempenho estatístico da equação de regressão múltipla (Eq. 3.13) para estimativa da evapotranspiração de mudas de eucalipto durante o período de crescimento

3.3.3.4. Rustificação

Na fase de rustificação, o limite para acionamento ocorria quando a água interceptada pelas folhas e pela bandeja era evaporada e quando ocorria uma redução de 30% da quantidade de água retida nos microporos do substrato, o que correspondia a 394,2 ml.

A Figura 25 apresenta a variação diária da evapotranspiração (mm) e da radiação solar (MJ m^{-2}), ocorrida no decorrer do experimento. Verifica-se que a evapotranspiração variou de 0,72 a 6,37 mm d^{-1} e a radiação solar de 2,64 a 18,14 $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$.

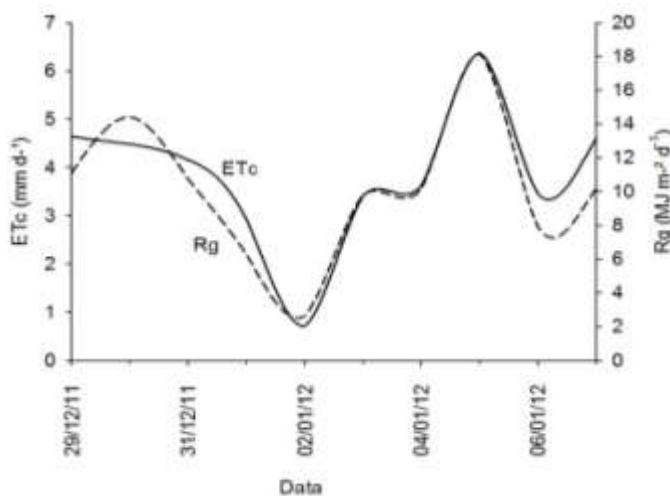


Figura 25. Variação diária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes da radiação solar global (Rg) durante o período de rustificação

Considerando a variação horária, a Figura 29 mostra o comportamento da evapotranspiração, das 6 às 18 horas, em função da radiação solar. Observa-se que o maior valor da evapotranspiração (0,55 mm) ocorreu às 11 horas.

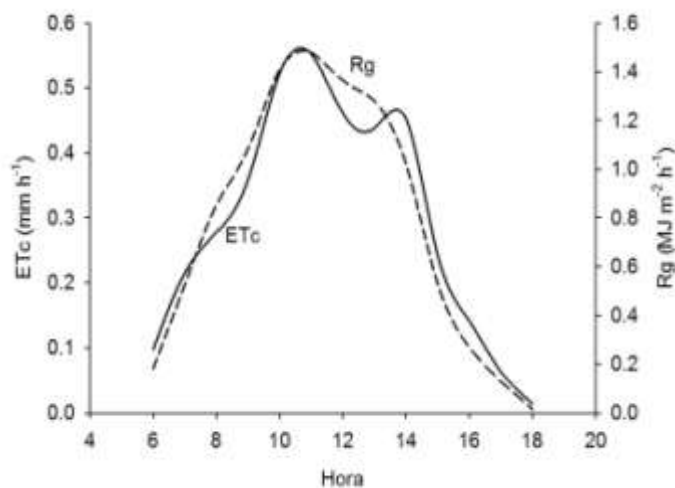


Figura 26. Variação horária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes da radiação solar global (Rg) durante o período de rustificação

Com relação ao déficit de pressão de vapor, a Figura 27 mostra que a variação foi de 0,14 a 0,77 kPa e que seu aumento provocou aumento da evapotranspiração diária.

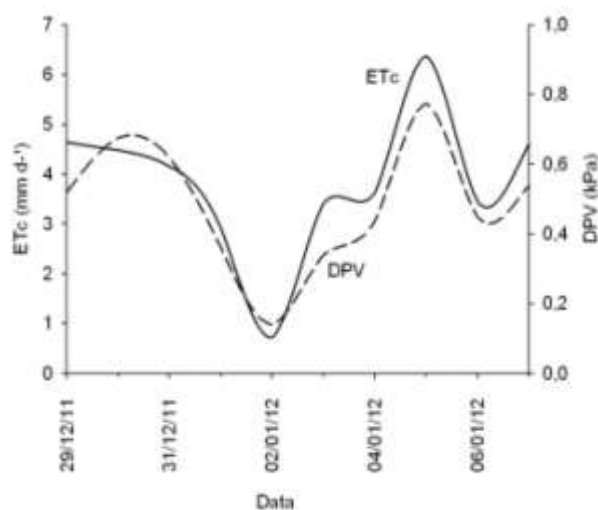


Figura 27. Variação diária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes do déficit de pressão de vapor (DPV) durante o período de rustificação

A Figura 28 mostra a variação horária da evapotranspiração e do déficit de pressão de vapor, de 6 às 18 horas.

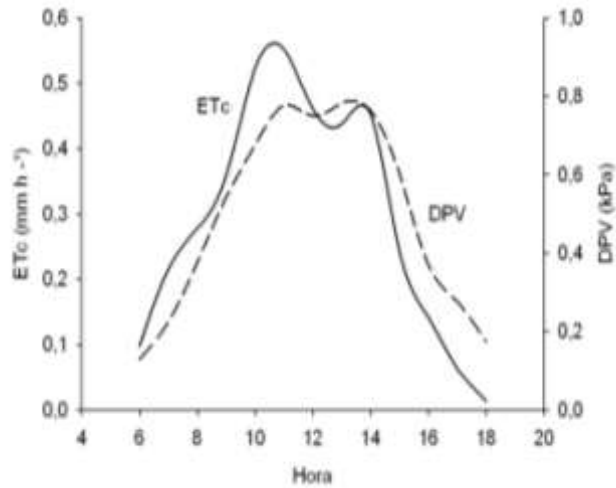


Figura 28. Variação horária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes do déficit de pressão de vapor (DPV) durante o período de rustificação

Quanto à velocidade do vento, a Figura 29 mostra que o aumento da velocidade do vento acarreta em maiores valores de evapotranspiração.

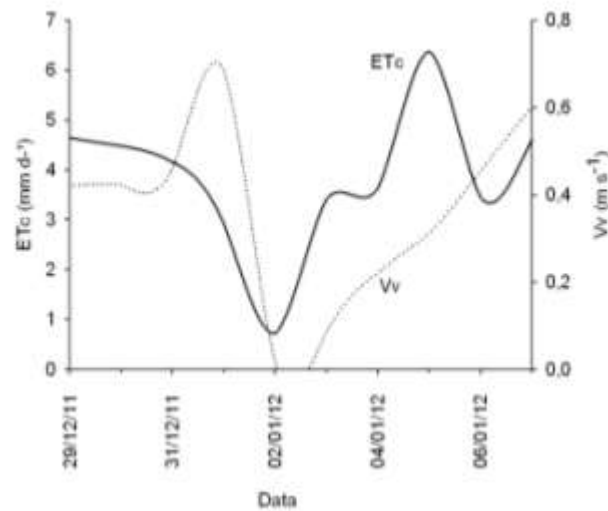


Figura 29. Variação diária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes da velocidade do vento (Vv) durante o período de rustificação

A Figura 30 mostra a variação horária da evapotranspiração e a velocidade do vento, de 6 às 18 horas.

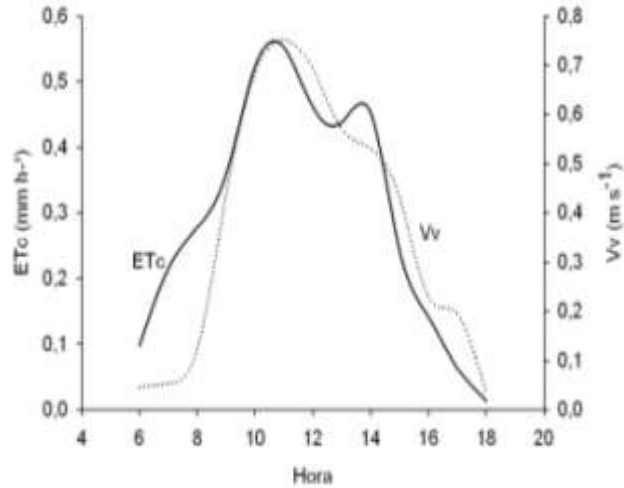


Figura 30. Variação horária da evapotranspiração de mudas de eucalipto (ETc) sob ambiente protegido e alterações correspondentes da velocidade do vento (Vv) durante o período de rustificação

Em relação à lâmina aplicada (Figura 31), considerando que no manejo convencional a irrigação é acionada por 8 minutos às 10h e 15h, é possível observar que este foi superior ao manejo otimizado, no qual a aplicação de água foi realizada devido à necessidade hídrica das mudas.

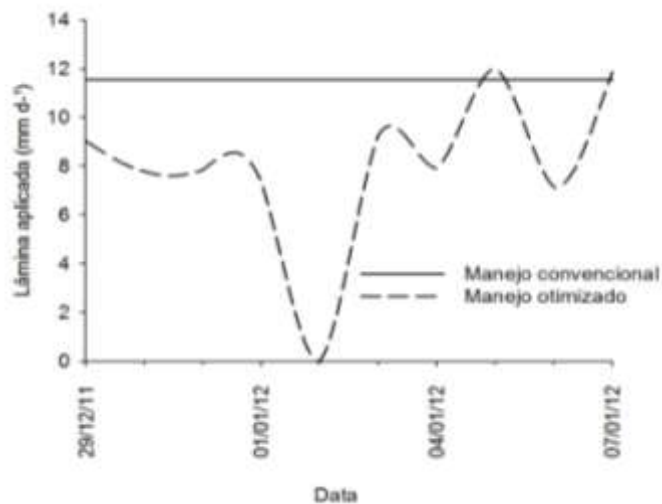


Figura 31. Lâminas de irrigação aplicadas pelo manejo convencional e manejo otimizado, no período de rustificação

A Tabela 9 apresenta a comparação entre o consumo hídrico diário no decorrer da fase de rustificação. Verifica-se que a economia hídrica foi igual a 30,6%.

Tabela 9. Comparação entre a lâmina aplicada no manejo convencional e otimizado, na rustificação

Data	Lâmina aplicada (mm)	
	Manejo convencional	Manejo otimizado
29/12/2011	11,56	9,04
30/12/2011	11,56	7,80
31/12/2011	11,56	7,85
01/01/2012	11,56	7,37
02/01/2012	11,56	-
03/01/2012	11,56	9,26
04/01/2012	11,56	7,91
05/01/2012	11,56	12,03
06/01/2012	11,56	7,15
07/01/2012	11,56	11,86
Total (mm)	115,6	80,3
Economia hídrica (%)	30,6	

De acordo com o manejo convencional, em média, foram consumidos 11,56 mm d-1. Através do manejo otimizado foram consumidos uma média de 8,02 mm d-1. LOPES et. al (2007) concluíram que as lâminas de irrigação de 12 e 14 mm d-1 foram as que mais contribuíram para o desenvolvimento de mudas de *Eucalyptus grandis*, aos 108 dias após a semeadura. Segundo RODRIGUES et. al (2011), a aplicação de lâminas de aproximadamente 8,58 mm d-1 proporcionou desenvolvimento semelhante das mudas de eucalipto expostas ao tratamento de 12 mm d-1.

Durante a fase de rustificação foram consumidos 2,89 m³ de água.

O modelo de estimativa da evapotranspiração, em escala horária, foi obtido a partir dos dados de temperatura, umidade, radiação solar e velocidade do vento externa (Equação 3.14).

$$ET_c = (0,2222 \pm 0,0208) RS + (0,1465 \pm 0,0400) DPV + (0,0613 \pm 0,0277) VV \quad (3.14)$$

em que,

ET_c = evapotranspiração das mudas, em mm hora⁻¹;

RS = radiação solar, em MJ m⁻²;

DPV = déficit de pressão de vapor, kPa;

VV = velocidade do vento, ms⁻¹

A Tabela 10 apresenta os resultados estatísticos referentes ao modelo obtido na fase de rustificação.

Tabela 10. Parâmetros da regressão múltipla entre a evapotranspiração das mudas de eucalipto e variáveis do ambiente meteorológico (Rg e DPV) no exterior do ambiente protegido para o período de rustificação

Variáveis meteorológicas	Parâmetros	Percentual de variação da ET _c explicada pelas variáveis independentes
Radiação solar (MJ m ⁻²)	0,2222	78,6%
Déficit de Pressão de Vapor (kPa)	0,1465	3,0%
Velocidade do vento (ms ⁻¹)	0,0613	1,4%

O coeficiente de determinação ajustado foi igual a 0,8303, indicando que o modelo demonstra ser satisfatório para a estimativa da evapotranspiração em escala horária.

A Figura 32 mostra a dispersão entre a evapotranspiração medida pelo minilímetro e a estimada pelo modelo. Verifica-se que o modelo apresentou alta precisão ($r = 0,9105$) e exatidão ($d = 0,9543$).

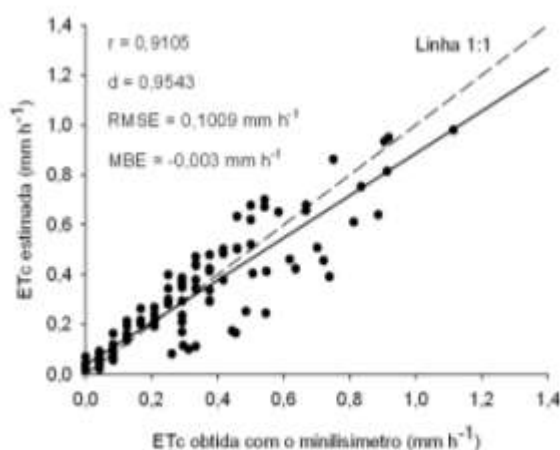


Figura 32. Desempenho estatístico da equação de regressão múltipla (Eq. 3.14) para estimativa da evapotranspiração de mudas de eucalipto durante o período de rustificação

Com relação à repetição da evapotranspiração, a Tabela 11 apresenta os valores apresentados pelo minilímetro e pelas três bandejas utilizadas como repetição, alcançada pela balança de precisão.

Tabela 11. Comparação da evapotranspiração obtida pelo minilímetro e pelas demais bandejas

Fase	Bandeja	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Evapotranspiração (mm)	Coefficiente de variação (%)
Enraizamento	Minilímetro	4438,3	4408,2	0,126	3,74
	1	4546,7	4518,1	0,119	
	2	4706,4	4677,9	0,119	
	3	4804,8	4777,3	0,115	
Aclimatação	Minilímetro	2209,7	2149,7	0,250	8,86
	1	2113,4	2062,9	0,211	
	2	2430,6	2381,1	0,206	
	3	2166,3	2112,4	0,225	
Crescimento	Minilímetro	2419,6	2269,6	0,626	7,07
	1	2458,7	2297,1	0,674	
	2	2413,7	2276,4	0,573	
	3	2458,8	2315,8	0,596	
Rustificação	Minilímetro	2339,6	2189,7	0,625	9,74
	1	2192,4	2035,3	0,655	
	2	2352,3	2194	0,660	
	3	2335,4	2208,2	0,530	

Pode-se verificar que o coeficiente de variação entre as bandejas foi menor que 10%, indicando baixa variabilidade entre as evapotranspirações.

Na maioria dos valores apresentados, percebe-se que a evapotranspiração obtida pelo minilímetro foi superior à das demais bandejas. Isso pode ser explicado pelo fato de que o movimento de retirada das bandejas do interior do ambiente protegido pode ter causado queda de água interceptada pelas folhas e pela bandeja, fazendo com que a evapotranspiração fosse inferior.

Considerando a influência das variáveis meteorológicas na ocorrência da evapotranspiração, verifica-se que em todas as fases de produção foi possível observar que o aumento da radiação solar ocasionou no aumento da evapotranspiração. Isso é explicado pelo fato de que a radiação solar é a maior fonte de energia responsável pela mudança da água da fase líquida para a gasosa, permitindo a transferência de água do solo para atmosfera, caracterizando a evapotranspiração.

Quanto ao déficit de pressão de vapor (DPV), que está relacionado à variação da temperatura e umidade do ambiente, semelhantemente ao ocorrido com a radiação solar, também foi observado maiores valores de evapotranspiração em função de um maior

déficit de pressão de vapor. O aumento da temperatura permite que o ar contido no interior do ambiente protegido contenha mais vapor de água, portanto, quanto maior a temperatura, maior é a demanda pela água no estado gasoso, e maior é a evapotranspiração. Com relação à umidade, verifica-se que quanto menor seu valor, mais facilitado é o fluxo de vapor de água para a atmosfera, favorecendo a perda de água pelo processo de evapotranspiração.

O efeito do vento sobre a evapotranspiração está relacionado à espessura da camada-limite, isto é, da camada de ar estacionada ao redor da superfície de uma folha. Em condições de baixa velocidade de vento a camada-limite é mais espessa devido ao acúmulo de vapor de água, diminuindo a diferença de concentração de vapor de água entre o interior da planta e a camada de ar próximo às folhas e conseqüentemente diminuindo a evapotranspiração. Por outro lado, nos dias em que a velocidade do vento estão maiores, a espessura da camada de ar circundante à folha é menor, fazendo com que rapidamente as moléculas de vapor de água sejam removidas, aumentando a demanda evapotranspirativa.

Em escala horária, o aumento da radiação solar está relacionado à variação da elevação solar, sendo máxima ao meio-dia. Sabendo-se que a radiação solar fornece energia para o aquecimento do ar, maiores valores de DPV são observados por volta das 12 horas. Quanto à variação da velocidade do vento, o aumento da radiação solar acarreta no aquecimento diferenciado da atmosfera, promovendo ascendência do ar quente e deslocamento das massas de ar, ocasionando na formação dos ventos.

Considerando que no decorrer do experimento a umidade do substrato não foi um fator limitante, o controle estomático aparentemente não foi exercido, passando a evapotranspiração a ser influenciada pela disponibilidade de energia e pelo déficit de pressão de vapor (SOUZA, 2006).

O maior consumo de água observado nas fases de crescimento e rustificação pode ser explicado pelo aumento da área foliar e do sistema radicular contido no substrato, acarretando em maior evapotranspiração das mudas.

3.4. CONCLUSÕES

Em média, a evapotranspiração das mudas de eucalipto na fase de enraizamento, aclimatação, crescimento e rustificação foram, respectivamente, iguais a 2,40 mm d⁻¹; 2,00 mm d⁻¹; 4,82 mm d⁻¹ e 3,84 mm d⁻¹.

O minilímetro desenvolvido se mostrou eficiente na determinação da evapotranspiração das mudas de eucalipto, no ambiente protegido avaliado.

Com relação à lâmina aplicada, comparando a aplicação de água pelo manejo convencional e otimizado, verificou-se uma economia de água pelo manejo otimizado de 11,9 % na fase de enraizamento; 60,3 % na fase de aclimatação; 25,6 % na fase de crescimento e 30,6 % na fase de rustificação.

Diante dos resultados apresentados, verifica-se que as equações de regressão múltipla obtidas para determinação da evapotranspiração das mudas de eucalipto, em todas as fases de produção, mostraram-se satisfatórios, podendo ser recomendado a utilização das variáveis meteorológicas externas para estimativa da evapotranspiração em ambiente protegido.

3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEZERRA, B. G. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM- Landsat5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.3, p. 305-317, 2008.

CARDOSO, G. B.; VIANA, T. V. A.; AZEVEDO, B. M.; SOUSA, V. F.; SOUZA, F. Determinação da ET de referência pela razão de Bowen com psicrômetros instalados a diferentes alturas. **Revista Ciência Agronômica**, v.36, n.1, p. 16-23, 2005.

COSTA, P. C. **Produção do tomateiro em diferentes substratos**. 2003. 119f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal - Horticultura) –Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

CUNHA, A. R.; VOLPE, C. A.; ESCOBEDO, F. J. Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith (FAO-56) com saldo de radiação medido por diferentes sensores. **Agronomía Tropical**, v.58, n.1, p.81-84, 2008.

FREITAG, A. S. **Frequências de irrigação para *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* em viveiro**. 2007. 60f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, RS.

GUEDES FILHO, D. H.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; COSTA FILHO, J. F.; FRANCISCO, P. R. M.; Campos, V. B. Estimativa da evapotranspiração de referência para a cidade de Areia, Paraíba. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.5, n.1, p.37-47, 2011.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima,2000, 531 p.

LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOARES, W. A.; SILVA, I. F. Estimativa da evapotranspiração do feijão caupi utilizando o modelo de Penman-Monteith. **Irriga, Botucatu**, v.11, n.4, p. 477-491, 2006.

LOPES, J. L. W. **Produção de mudas de *Eucalyptus grandis* W. (Hill ex. Maiden) em diferentes substratos e lâminas de irrigação**. 2004. 100 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2004.

LOPES, J. L. W.; GUERRINI, I. A.; SAAD, J. C. C. Qualidade de mudas de eucalipto produzidas sob diferentes lâminas de irrigação e dois tipos de substrato. **Revista Árvore**, v.31, n.5, p. 835-843, 2007.

MENDONÇA,R. **Como cuidar de seu meio ambiente**. São Paulo: Bei 2004.

REIS, L. S.; SOUZA, J. L.; AZEVEDO, C. A. V. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do tomate caqui cultivado em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.3, p.289-296, 2009.

RODRIGUES, S. B. S. **Análise do uso da água em unidades de produção de mudas de eucalipto**. 2007. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2007.

RODRIGUES, S. B. S.; MANTOVANI, E. C.; OLIVEIRA, R. A.; PAIVA, H. N.; ALVES, M. E. B. Necessidades hídricas de mudas de eucalipto na região Centro-Oeste de Minas Gerais. **Irriga, Botucatu**, v. 16, n. 2, p. 212-223, 2011.

SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; VILLA NOVA, N. A. Evapotranspiração do capim tanzânia obtida pelo método da razão de Bowen e lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.25, n.3, p. 705-712, 2005.

SOUSA, I. F.; NETTO, A. O. A.; CAMPECHE, L. F. M. S.; BARROS, A. C.; SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte II: Consumo hídrico do coqueiro anão verde irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.5, p.526-532, 2011.

SOUZA, W. G. **Modelagem da evapotranspiração em plantios de eucalipto em fase inicial de desenvolvimento com cobertura parcial do solo**. 2006. 56 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Versão digital 2. Recife, 2006. 449 p.

VIANELLO, R. L.; Alves, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Imprensa Universitária, 1991, 449 p.

VILLA NOVA, N. A. A. et al. **Estimativa de graus dia acumulados acima de qualquer temperatura base, em função das temperaturas máxima e mínima**. São Paulo: Instituto de Geografia, USP, 1972. 8p. (Caderno de ciência da terra, n.30).

CONCLUSÕES GERAIS

De acordo com os capítulos apresentados, foi possível verificar que a não redução da área foliar no momento de preparo das estacas influenciou positivamente no acúmulo da biomassa das raízes das mudas clonais de eucalipto. No entanto, ao final do processo de produção, o acúmulo de biomassa no ciclo em que não houve redução foliar foi semelhante ao ocorrido no ciclo no qual as estacas sofreram redução de 40% da área foliar.

Com relação ao tempo térmico, verificou-se que foram necessários aproximadamente 1045 graus-dia acumulados para todo o processo de produção das mudas de eucalipto. A utilização do conceito de tempo térmico é de grande importância para o planejamento das atividades florestais e indicação do potencial climático da região para a produção.

O minilímetro de pesagem desenvolvido e calibrado nessa pesquisa para determinação da evapotranspiração das mudas apresentou alta relação linear entre as massas-padrão e a tensão elétrica aplicada nos terminais da célula de carga. Além disso, não foi observado efeito significativo da temperatura do ar no sinal elétrico da célula de carga, permitindo sua utilização em ambientes protegidos para determinação da evapotranspiração.

A evapotranspiração das mudas de eucalipto na fase de enraizamento foi, em média, de 2,40 mm d⁻¹; na aclimação, foi igual a 2,00 mm d⁻¹, no crescimento de 4,82 mm d⁻¹ e na rustificação igual a 3,84 mm d⁻¹.

Com relação à lâmina aplicada, verificou-se uma economia hídrica no ciclo em que a aplicação de água ocorreu em função da necessidade hídrica das mudas. Na fase de enraizamento, o consumo hídrico foi 11,9% inferior ao ciclo em que a irrigação ocorreu de acordo com o manejo convencionalmente utilizado pelo viveiro. Na fase de aclimação, a economia hídrica foi de 60,3%; no crescimento de 25,6% e na fase de rustificação de 30,6%.