

LUIZ FELIPE PEREIRA FONTES

**IRRIGAÇÃO DO EUCALIPTO NA FASE INICIAL DE DESENVOLVIMENTO  
EM SOLOS DA BACIA DO RIO DOCE**

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  
2013

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

T

F683i  
2013

Fontes, Luiz Felipe Pereira, 1986-  
Irrigação do eucalipto na fase inicial de desenvolvimento em solos da  
bacia do Rio Doce / Luiz Felipe Pereira Fontes. - Viçosa, MG, 2013.  
xiii, 55f : il (algumas color.) ; 29 cm

Inclui anexo.

Orientador: Aristides Ribeiro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.47-53.

1. Meteorologia agrícola. 2. Eucalipto. 3. Evapotranspiração.  
4. Irrigação. 5. Ritchie, Modelo de. 6. Folhas. 7. Balanço hidrológico .  
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.  
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola. II. Título.

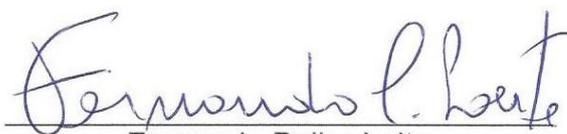
CDD 22. ed. 630.2515

LUIZ FELIPE PEREIRA FONTES

**IRRIGAÇÃO DO EUCALIPTO NA FASE INICIAL DE DESENVOLVIMENTO  
EM SOLOS DA BACIA DO RIO DOCE**

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: 25 de julho de 2013.



Fernando Palha Leite



Williams Pinto Marques Ferreira



Aristides Ribeiro  
(Orientador)

## **DEDICO**

*Aos meus pais Flávio e Maria das Graças,  
que me ensinaram a perseguir meu ideal  
com dedicação e coragem. Minhas  
referências de vida!*

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”*

Madre Teresa de Calcuta

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me amparar nos momentos difíceis, me dar força interior para superar as dificuldades, mostrar os caminhos nas horas incertas e me suprir em todas as minhas necessidades.

Aos meus pais, Flávio e Maria das Graças, meu porto seguro, meu espelho de humildade, ética e caridade. Exemplo de amor a Deus, à igreja e a família. Minhas mais sinceras e profunda gratidão.

Ao meu irmão Fábio, pela amizade e companheirismo.

À Maria Alice, pela ajuda, amor, carinho e por estar sempre ao meu lado.

Aos meus avós, pelos exemplos de superação, fraternidade e humildade durante suas vidas.

À minha família, pelo carinho paciência e incentivo.

Ao professor Aristides Ribeiro, pela orientação, ensinamento, compreensão, confiança e exemplo de profissional que é.

Ao professor Flávio Barbosa Justino, pela confiança e por me ingressar nesta área de pesquisa.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela oportunidade de realização do Curso.

Aos meus amigos, Nívia, João Paulo, Dudu, Isabel, Lucilene, Fernandinha e Mônica, pela imensa amizade de logos anos.

Aos meus amigos de Coimbra e de Viçosa, pela amizade e momentos de alegrias.

Aos meus amigos do Grupo de Pesquisas Biomodel: Aloísio, Aline, Ana Paula, Carla, José Eduardo, Jorge, Julyana, Luciano, Mariana, Robert, Silvano, Valéria, Vitor e Yhasmin.

Aos Secretários do Programa de Pós Graduação em Meteorologia Agrícola, Claudenilson e Graça, pelo apoio e paciência.

À CENIBRA (Celulose Nipo-Brasileira S.A.), por permitir a materialização dessa pesquisa, oferecendo auxílio e recursos, principalmente ao pessoal da área de pesquisa: Anderson, Fernando, Gilson, Guilherme e Maria.

Ao viveiro de Pesquisas pertencente ao Departamento de Engenharia Florestal, pelo auxílio no experimento, principalmente à Geraldo Magela, João e Mauricio.

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

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução dessa dissertação de Mestrado: abraços fraternos a todos.

## **BIOGRAFIA**

LUIZ FELIPE PEREIRA FONTES, filho de Flávio Alberto Fontes e Maria das Graças Pereira Fontes, nasceu em Viçosa/ MG em 17 de dezembro de 1986.

Em julho de 2010, concluiu o curso de graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa - UFV.

Em Agosto de 2010, iniciou os estudos no programa de Meteorologia Agrícola como aluno não vinculado sob orientação do professor Flávio Barbosa Justino.

Em agosto de 2011 iniciou o curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de dissertação em julho de 2013.

## SUMÁRIO

|   |      |
|---|------|
| LISTA DE SÍMBOLOS .....   | viii |
| RESUMO .....  | x    |
| ABSTRACT .....  | xii  |
| 1. INTRODUÇÃO .....   | 1    |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                      | 3    |
| 2.1. O Eucalipto .....  | 3    |
| 2.2. Ecofisiologia e Relações hídricas .....                        | 3    |
| 2.3. Plantio .....  | 5    |
| 2.4. Potencial hídrico foliar .....                                 | 6    |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS .....   | 8    |
| 3.1. Condições experimentais .....                                  | 8    |
| 3.2. Caracterização dos solos .....                                 | 8    |
| 3.3. Coleta do solo e plantio das mudas .....                       | 9    |
| 3.4. Delineamento estatístico e aplicação dos tratamentos .....     | 10   |
| 3.5. Estrutura de cobertura do experimento .....                    | 12   |
| 3.6. Dados meteorológicos .....                                     | 12   |
| 3.7. Determinação da lâmina evaporada .....                         | 13   |
| 3.8. Determinação do IAF .....                                      | 14   |
| 3.9. Evapotranspiração de referência .....                          | 14   |
| 3.10. Albedo .....  | 15   |
| 3.11. Determinação da evapotranspiração pelo método de Ritchie .... | 15   |
| 3.12. Determinação dos parâmetros U e $\alpha$ .....                | 18   |
| 3.13. Determinação do potencial hídrico foliar .....                | 19   |
| 3.14. Medidas fisiológicas .....                                    | 20   |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                     | 21   |
| 4.1. Caracterização física e retenção de água no solo .....         | 21   |
| 4.2. Caracterização microclimática no período do experimento .....  | 22   |
| 4.3. Lâmina evapotranspirada nos tratamentos e campanhas .....      | 25   |
| 4.3.1 Primeira e segunda campanhas de coleta de dados .....         | 25   |
| 4.3.2 Terceira campanha de coleta de dados .....                    | 32   |
| 4.4. Componentes da evapotranspiração segundo modelo de Ritchie.    | 42   |
| 4.4.1. Parametrização .....   | 42   |
| 4.4.2 Calibração .....  | 43   |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES .....                          | 45   |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                 | 47   |
| 7. ANEXOS .....   | 54   |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                 |   |
|-----------------|---|
| ET <sub>c</sub> | Evapotranspiração da cultura                      |
| cm              | Centímetro  |
| $\psi_{fa}$     | Potencial hídrico foliar antemanhã                |
| MPa             | Mega Pascal                                       |
| S               | Sul   |
| W               | Oeste   |
| m               | Metros  |
| mm              | Milímetros  |
| Cwa             | Clima temperado quente-mesotérmico                |
| °C              | Graus Celsius                                     |
| LVwf1           | Latosolo Vermelho acriférrico típico              |
| CXbd1           | Cambissolo Háplico distrófico típico              |
| LAd2            | Latosolo Amarelo distrófico típico                |
| UFV             | Universidade Federal de Viçosa                    |
| CAD             | Capacidade de água disponível                     |
| PVC             | Policloreto de polivinila                         |
| PMP             | Ponto de murcha permanente                        |
| CC              | Capacidade de campo                               |
| Kg              | Quilogramas                                       |
| g               | Gramas  |
| PEBD            | Plástico polietileno de baixa densidade           |
| $\mu\text{m}$   | Micrômetro  |
| EMA             | Estação meteorológica automática                  |
| D               | Diâmetro interno do minilímetro                   |
| E <sub>i</sub>  | Evaporação direta da água no solo                 |
| n               | Número de repetições                              |
| L <sub>ev</sub> | Lâmina evaporada                                  |
| w               | Biomassa final                                    |
| w <sub>0</sub>  | Biomassa Inicial                                  |
| r <sub>m</sub>  | Taxa de crescimento relativa de biomassa          |
| t               | Tempo   |
| $\overline{E}$  | Evaporação média da água no solo                  |
| IAF             | Índice de área foliar                             |
| AF              | Área foliar total                                 |
| r               | Raio da circunferência do recipiente              |
| $\pi$           | Pi  |
| ET <sub>0</sub> | Evapotranspiração de referência                   |
| Rn              | Saldo de radiação                                 |
| G               | Fluxo de calor no solo                            |
| $\Delta$        | Declinação da curva de saturação do vapor da água |
| d               | Dias  |
| s               | Segundos  |
| MJ              | Megajoules  |

|            |   |
|------------|---|
| kPa        | Quilopascal   |
| $\gamma$   | Constante psicrométrica                                 |
| $U_2$      | Velocidade média do vento a 2m da superfície do solo    |
| T          | Temperatura média do ar                                 |
| $e_s$      | Pressão de saturação de vapor                           |
| $e_a$      | Pressão atual de vapor                                  |
| $a_s$      | Albedo do solo  |
| $a_c$      | Albedo da cultura                                       |
| $a_{sc}$   | Albedo da superfície solo-cultura                       |
| U          | Quantidade de água evaporada na fase 1                  |
| $\alpha$   | Constante da difusividade da água na superfície do solo |
| $E_1$      | Evaporação direta da água do solo na fase 1             |
| $ET_p$     | Evaporação potencial                                    |
| E          | Evaporação  |
| EQQ        | Evaporação de equilíbrio                                |
| $R_s$      | Radiação solar  |
| $t_d$      | Temperatura média do período diurno                     |
| $\alpha_1$ | Interferência da temperatura na evaporação potencial    |
| $T_{max}$  | Temperatura máxima                                      |
| $E_2$      | Evaporação da água do solo na fase 2                    |
| T          | Transpiração  |
| hs         | Horas   |
| ECA        | Evaporação do Tanque Classe A                           |
| $r_m$      | Taxa de crescimento                                     |

## RESUMO

FONTES, Luiz Felipe Pereira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2013. **Irrigação do eucalipto na fase inicial de desenvolvimento em solos da bacia do rio doce.** Orientador: Aristides Ribeiro.

O “pegamento”, desenvolvimento e a produtividade final das plantas estão diretamente relacionados à disponibilidade hídrica no solo ao longo do ciclo produtivo. No caso do eucalipto isso não é diferente, principalmente em regiões com totais de chuva reduzidos e em locais com períodos secos prolongados e alta demanda evapotranspirativa. De maneira geral, no passado, as florestas comerciais eram plantadas restritamente nos períodos chuvosos o que garantiam o “pegamento” das plantas. Com o aumento da demanda de madeira, tornou-se necessário a realização do plantio ao longo de todo ano, sendo de suma importância o emprego da irrigação das mudas no pós-plantio e nas primeiras semanas após a implantação. Em plantios comerciais, a morte de mudas implica no aumento do custo de produção com o replantio e, dependendo do nível de mortalidade, na queda da produtividade devido a desuniformidade do plantio promovida (maior competição entre plantas). Este trabalho teve como objetivo determinar a lâmina de água possível de ser evapotranspirada sem comprometer as mudas recém plantadas, parametrizar e calibrar o modelo de Ritchie para tomada de decisão quanto ao momento da irrigação para diferentes tipos de solos da Bacia do Rio Doce (MG). O experimento foi realizado no viveiro de pesquisas pertencente ao Departamento de Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Viçosa (MG). Foram realizadas três campanhas com a utilização de três tipos de solos, sendo um latossolo vermelho acriférrico típico (LVwf1), um cambissolo háplico distrófico típico (CXbd1) e um latossolo amarelo distrófico típico (LAd2), na qual foi avaliado o comportamento da perda de lâmina de água nos minilímetros, o potencial hídrico foliar no período de antemanhã e o monitoramento das medidas ecofisiológicas. Foram utilizados híbrido de mudas de eucalipto (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*) para o plantio nos minilímetros. Verifica-se maior volume de água retida entre o PMP e a CC no LVwf1 quando comparado aos demais (CXbd1 e LAd2). Isso garante um melhor suprimento de água

para as plantas nesse tipo de solo (LVwf1), comprovado pela sobrevivência das plantas por maior tempo em comparação aos demais solos. Observando a curva de retenção, verifica-se que o CXbd1 e o LAd2 apresentam um volume de água retido muito parecido nas tensões próximas a CC. Pode-se estimar que estes dois tipos de solos se diferenciam com o dessecamento, portanto, para uma mesma quantidade de água transpirada, verifica-se uma demanda maior de energia por parte das mudas para o solo CXbd1. Este efeito não fica claro quando se estuda as lâminas evapotranspiradas, podendo ser então explicado pela diferença na capacidade de retenção apresentada por esses dois tipos de solos. De maneira geral, todos os tratamentos com conteúdo de água próximo a CC apresentam evapotranspiração próximas a  $ET_0$  e a ECA, entretanto este último se aproxima mais dos valores absolutos observados dos minilímetros. A maior coincidência nas variações dos valores de  $ET_0$  e ECA comparativamente aos valores de evapotranspiração das mudas de eucalipto no início das campanhas estão na maior contribuição da evaporação do solo no processo. Diferentemente do  $ET_0$ , o ECA não apresenta controle estomático, permanecendo mais próximo ao que se observa nos minilímetros. Verifica-se recuperação das plantas após um dessecamento para irrigação realizadas nos potencial hídricos foliar da antemanhã de - 1,5 e -3,0 MPa para todos os tipos de solos. Esta etapa do estudo foi realizada durante o inverno, período de menor incidência de radiação solar. Na variação da biomassa ao longo das campanhas, foi observada a redução o IAF para ambos os solos. Todavia, verificou-se aumento da massa das raízes, provavelmente devido ao esforço das plantas para adaptar-se ao déficit hídrico através da expansão radicular. O modelo de Ritchie, que é indicado para estimativa da lâmina evapotranspirada em sistema solo-planta cujo dossel não se apresenta fechado e possibilita separar as componentes evaporação e transpiração das muda, não apresentou boas estimativas. Os valores estimados, sistematicamente, superestimam as lâminas para todos os tipos de solos, indicando a limitação deste método quando empregado em sistema sob déficit hídrico acentuado.

## ABSTRACT

FONTES, Luiz Felipe Pereira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2013. **Irrigating eucalyptus at the initial development phase in soils of the Rio Doce watershed.** Adviser: Aristides Ribeiro.

The “establishment”, development and productivity of the plants are directly related to soil water availability throughout the production cycle. In the case of eucalyptus, this is not different mainly in regions where rainfall totals are low and in locations where dry periods are prolonged and evapotranspiration is high. Generally in the past, the commercial forests were strictly planted during the rainy periods in order to ensure the “establishment” of the plants. With the increasing demand for timber, it was necessary to accomplish the planting throughout the year which required the irrigation of the seedlings after planting and the first weeks after implantation. In commercial plantations, the seedling death implies the increased cost of production with replanting and, depending on the level of mortality, the decline in productivity due to uneven planting promoted (greater competition between plants). Therefore, this study was carried out to determine the possible water depth to be transpired without endangering the plantlets recently planted as well as to parameterize and calibrate the Ritchie model for decision making concerning to the timing of irrigation for different types of soils in Rio Doce basin (MG). The experiment was conducted in the research nursery area pertaining to Forest Engineering Department - Universidade Federal de Viçosa (MG). Three campaigns were accomplished by using three types of soils, that is a typical latossolo vermelho acriférico (LVwf1), a typical cambissolo háplico distrófico (CXbd1) and a typical latossolo amarelo distrófico (LAd2) in which the following variables were evaluated: the behavior of the water depth loss in minilysimeters, leaf water potential during predawn and the monitorship of the ecophysiological data. Hybrids of the eucalyptus plantlets (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*) were used for planting in minilysimeters. In LVwf1, a higher water volume retained between PMP and CC was observed, when compared to other ones (CXbd1 and LAd2). This ensures a better water supply for plants in this soil type (LVwf1), as evidenced by survival of the plants for longer time in comparison to other soils. When observing the

retention curve, it is apparent the water volumes retained by CXbd1 and LAd2 to be very similar at tensions near CC. It can be estimated those two soil types to differ with soil desiccation. Thus, for the same amount of transpired water, there is a higher demand for energy on the part of the plantlets to CXbd1 soil. When studying the evapotranspired water depths, this effect is not clear, but it may be explained by the difference in retention capacity presented by these two soil types. In general, all treatments with water content close to CC rather exhibit evapotranspiration near  $ET_0$  and ECA, however the last one is closer to absolute values in the observed minilysimeters. The greatest coincidence in variations of the  $ET_0$  and ECA values comparatively to evapotranspiration values of the eucalyptus plantlets at early campaigns is the greater contribution of the soil evaporation in the process. Unlike  $ET_0$ , the ECA has no stomatal control closer to that seen in minilysimeters. The plants subjected to leaf hydric stress of -1.5 and -3.0 MPa, measured before predawn, recovered after irrigation in all soil types. This phase of the study was conducted during winter season, a period over which the solar radiation is lower. In variation of the biomass over the campaigns, a reduction was observed for IAF in both soils. However, an increase in the root mass occurred, probably due to effort of the plants in order to adapt to hydric stress through root expansion. The Richie model is indicated to estimate the evapotranspired water depth. When the soil-plant system does not present closed canopy, such as in the present study, it also allows to estimate separately the evaporation and transpiration. In the present study, however, the model did not present satisfactory results. The systematically estimated values rather overestimate the water depths for all soil types, as indicating the limitation of this method when used in accentuated water deficit system.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui 480 milhões de hectares de florestas, incluindo biomas naturais e plantados, sendo a segunda maior área florestal do mundo. Atualmente, a área ocupada por plantios florestais de *Eucalyptus* e *Pinus* totalizam 6,5 milhões de hectares, em que 74,8% corresponde à área de plantios de eucalipto, sendo Minas Gerais o estado com maior área plantada, seguido por São Paulo, Paraná e Bahia. O gênero *Eucalyptus* tem significativa importância para o agronegócio florestal brasileiro, com participação de cerca de 4,0% do PIB nacional, quando somadas todas as cadeias produtivas em que participa (ABRAF, 2012).

As vantagens do uso de espécies de eucalipto são: adequação de sua madeira para fins industriais, o rápido crescimento da planta e a facilidade na produção de mudas por estaquia, sendo utilizados tanto em plantios comerciais quanto em pequenas áreas por agricultores familiares (BIZI et al., 2008).

O desenvolvimento e a produtividade das plantas estão diretamente ligados ao suprimento de água. Com o objetivo de implantar novas áreas em regiões que possuem estações com baixo índice pluviométrico nas épocas de estiagem, torna-se necessário o uso da irrigação das mudas durante o plantio e nas primeiras semanas da implantação, influenciando na sobrevivência e desenvolvimento das plantas (BUZETTO et al., 2002).

Frequentemente, a perda de água do solo está associada a forte evaporação causada pela baixa umidade relativa do ar e elevados níveis de radiação (LARCHER, 2004). Geralmente, o primeiro sintoma característico de déficit hídrico na planta é a redução do crescimento, sendo a água de suma importância na expansão celular durante o processo de diferenciação das novas células geradas (KRAMER & BOYER, 1995). Outras características de déficit hídrico são observadas nas plantas, como as alterações biofísicas e metabólicas, destacando-se às reduções na fotossíntese, na transpiração, condutância estomática, balanço hídrico da planta e níveis de carboidratos, proteínas dentre outros (KRAMER & BOYER, 1995; SMIRNOFF, 1995).

Segundo Thomas (2008), a incapacidade das mudas se manterem hidratadas é a principal causa de mortalidade de espécies florestais após o transplante. Contudo, a irrigação durante e após o plantio é uma prática utilizada para diminuir o índice de mortalidade das mudas.

Essas irrigações, quando necessárias, tornam-se uma prática de alto custo para as empresas florestais, elevando o valor final da cadeia produtiva, sendo normalmente realizadas por meio de caminhões pipas ou tratores adaptados, os quais depositam determinada quantidade de água por planta.

Existem diversos métodos que realizam o manejo da irrigação, destacando-se aqueles que estimam a evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>), devido a sua operacionalidade e praticidade. A ET<sub>c</sub> corresponde a transferência de água, na forma de vapor, para a atmosfera através do sistema solo-planta, dependendo, principalmente, da quantidade de energia fornecida ao processo de evaporação da água (REICHARDT, 1985).

O método de Ritchie (1972), é uma alternativa ao uso do coeficiente da cultura, e permite o cálculo separado da evaporação direta da água do solo e da transpiração da cultura. Além de variáveis climáticas, esse método também incorpora as propriedades físicas do solo e as características de crescimento da planta para a determinação da ET<sub>c</sub>.

Vale ressaltar que o manejo adequado da irrigação após o plantio é de suma importância, uma vez que o número de irrigações abaixo do adequado pode levar à morte as plantas e, conseqüentemente, à necessidade de replante.

Com o alto custo envolvido nestas práticas faz-se necessário o desenvolvimento de uma ferramenta que permita determinar o momento adequado a serem aplicadas as irrigações.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. O Eucalipto

O eucalipto é natural da Austrália, pertencente à família Myrtaceae. A distribuição das espécies pode variar em função das condições ambientais e climáticas, sendo encontrada em regiões tropicais equatoriais até condições subtropicais e semi-áridas (LIMA, 1996). Apresenta cerca de 600 espécies e subespécies, com ampla adaptação e dispersão mundial, desenvolvendo de forma satisfatória em diferentes situações edafoclimáticas, extrapolando àquelas das regiões de origem (WILLIAMS & WOINARSKI, 1997; RIBEIRO et al., 2009).

O gênero *Eucalyptus* foi introduzido Brasil em 1868 como planta ornamental. Em 1904 teve início seu plantio para fins econômicos, sendo utilizado na produção de dormentes ferroviários e como fonte de energia para as locomotivas (MORA & GARCIA, 2000). A partir de então, vários fatores tornaram o eucalipto uma das espécies florestais mais cultivadas. Com a implantação de leis de incentivos fiscais relacionadas ao reflorestamento a partir de 1965, o plantio multiplicou-se e o crescimento continua até os dias atuais.

Com o melhoramento genético, torna se possível a adaptação de espécies de eucalipto para diferentes fins de produção, como a produção de carvão e na fabricação de celulose. Dentre as espécies, as mais utilizadas comercialmente no Brasil são o *E. grandis* e o *E. urophylla* que além de apresentarem características genéticas favoráveis ao seu plantio, possibilitam seu uso em programa de melhoramento em hibridação.

### 2.2. Ecofisiologia e relações hídricas

A água constitui 80 a 90% do peso verde da maioria das plantas herbáceas e acima de 50% do peso verde de plantas lenhosas (KRAMER & BOYER, 1995).

De acordo com Pereira (2006), dentre os processos fisiológicos a participação da água pode ser citada como:

- Meio de transporte de solutos e gases;
- Atuar como reagentes e produtos da atividade fotossintética;
- Ser fonte de elétrons;
- Interfere na divisão e no crescimento celular
- Influencia na turgescência das raízes;
- Participa dos processos de abertura e fechamento dos estômatos;
- Influencia na viscosidade, na permeabilidade do protoplasma e na atividade das enzimas envolvidas;
- Produto final da atividade respiratória;
- Efeito resfriante, funcionando como tampão de temperatura;
- Influencia na translocação de assimilados.

Floss (2008) afirma que cerca de 98% da água que é absorvida por uma planta durante todo seu ciclo é perdida para a atmosfera. Existem três maneiras diferentes para a perda de água pelos vegetais: na forma de transpiração, considerada a mais importante, na qual a água é perdida na forma de vapor através dos estômatos presentes nas folhas; a gutação ou sudação, em que a água é secretada do interior das folhas para a superfície pelos hidatóides; e a exsudação, que corresponde a perda de líquidos através das paredes celulares externas.

A quantidade de água armazenada no solo varia de acordo com as características deste, como textura, estrutura, porosidade e teor de coloides. Os fenômenos de capilaridade e adsorção são responsáveis pela retenção da água no solo (REICHARDT & TIMM, 2004). O armazenamento ocorre nos espaços porosos, sendo esses altamente dinâmicos e variáveis no tempo e espaço, principalmente em região próxima à superfície do solo, que em presença de alto teor de água, é facilmente evaporada e absorvida pelas raízes (GONZÁLEZ & ALVES, 2005).

A absorção de água pelas plantas só ocorre na presença de um gradiente favorável do potencial da água entre o solo e a raiz. Para um solo na condição de déficit hídrico e com altas taxas de evapotranspiração durante o período diurno, principalmente na fase inicial de desenvolvimento das mudas, as plantas apresentam dificuldades em retirar água do solo para

balancear a transpiração ocorrida, levando a perda de turgescência ou murchamento (KERBAURY, 2009).

Em resposta a demanda da transpiração foliar das plantas, ocorre a absorção de água pelas raízes, sendo influenciada pela disponibilidade de água existente nas proximidades das radículas no solo, provocando a formação de um gradiente, ocasionando um fluxo de água no solo em direção ao sistema radicular (WINTER & VIPOND, 1977).

Quando no solo ocorre a falta de água por algum período prolongado, denominamos de seca. Um estresse causado pela seca quando intensificado, pode ser resultado da absorção inadequada de água pelas plantas que crescem em solos muito rasos, impossibilitando o desenvolvimento adequado do sistema radicular (LARCHER, 2004).

De acordo com Santos e Carlesso (1998), Pimentel (2004) e Taiz e Zeiger (2004), a falta de água promove danos, dependendo da intensidade e da duração da mesma. A primeira resposta ao déficit hídrico, principalmente na fase inicial do desenvolvimento, é a perda da turgescência associada a diminuição do processo de crescimento em expansão da planta, provocando diminuição da área foliar total, menor produção de biomassa, desenvolvimento de sistema radicular mais profundo e fechamento dos estômatos nos horários de maior transpiração.

O movimento estomático é o principal mecanismo de controle das trocas gasosas nas plantas superiores. Uma contribuição para a redução da perda de água durante os períodos de déficit hídrico é o fechamento estomático. Com isso, a abertura e fechamento dos estômatos constitui um processo fisiológico que controla as trocas gasosas, a assimilação de gás carbônico, a redução da transpiração e conseqüentemente, a desidratação (CHAVES, 1991; REIS & REIS, 1997; GONÇALVES & PASSOS, 2000; SILVA et al., 2000; PEAK et al., 2004).

### **2.3. Plantio**

A adaptação da cultura após a implantação no campo deve ocorrer de forma mais rápida possível, pois quanto mais rápido as plantas de eucalipto se adaptarem e sobressaírem às plantas invasoras, menor será a

concorrência as espécies e maior será a eficiência no uso da água, de luz e nutriente (Figueiredo et al. 2011).

Segundo Gomes *et al.* (1996), as empresas florestais se baseiam para fins de classificação da qualidade das mudas de eucalipto em características como: rigidez da haste, relacionado ao estado de desenvolvimento das plantas; altura média, variando entre 15 e 30 cm; sistema radicular desenvolvido e bem formado; número de pares de folhas presente, com no mínimo 3 pares; ausência de sintomas de deficiência nutricional e plantas com resistência a pragas e doenças.

A prática de irrigação do eucalipto no momento e após o plantio é necessária quando se encontra em condições amenas de água no solo, tornando-se fundamental para garantir alto índice de sobrevivência das mudas recém plantadas. Com o passar do tempo, a muda retira água do perfil do solo, sendo que a capacidade e a agilidade para que isto ocorra vai depender tanto do conteúdo de água presente quanto à capacidade de desenvolvimento do sistema radicular (GROSSNICKLE, 2005).

#### **2.4. Potencial hídrico foliar**

O potencial hídrico foliar indica o grau de hidratação de uma planta, cujos gradientes controlam os fluxos da água no sistema solo-planta-atmosfera. Mesmo ocorrendo variação ao longo do dia, esse parâmetro descreve o estado hídrico em que a planta se encontra, sendo utilizado em estudos de relações hídricas dos vegetais (BERGONCI et al., 2000).

A capacidade da água em realizar trabalho e translocação via planta é expressa como potencial hídrico de um sistema aquoso tendo por referência o potencial da água pura, em que, quanto mais negativo for o potencial hídrico foliar, menor será a disponibilidade de água no mesmo (LARCHER, 2004).

O potencial hídrico foliar medido logo antes do nascer do sol ( $\psi_{fa}$ ), ou seja, no período de antemanhã, relacionado a ausência de fluxo de água e quando a planta não estiver transpirando, corresponde no momento ao potencial hídrico do solo, tornando-o, uma ferramenta para avaliação deste

potencial. (KRAMER & BOYER, 1995; LARCHER, 2004; TAIZ & ZEIGER, 2009).

De acordo com Lima (1996) a amplitude de variação do potencial de água na folha pode ser tolerada pelo eucalipto sem que ocorra alteração significativa na condutância estomática (SOUZA et al., 2004).

O valor limite de potencial da água cujo ponto inicia-se o fechamento dos estômatos varia de espécie para espécie (LIMA, 1996; PEAK et al., 2004). Esse fechamento dos estômatos contribui significadamente para a redução de perda de água durante a ocorrência de déficit hídrico (REIS & REIS, 1997; SILVA et al., 2000; PEAK et al., 2004). Sendo considerado um excelente mecanismo de defesa contra a perda de água e consequentemente a dessecação e morte das plantas (KAISER, 1987; SILVA et al., 2000; TAIZ & ZEIGER, 2009).

Alvarenga (1994), estudando o efeito de dois níveis de umidade (um na capacidade de campo e outro com potencial de água no solo de -1,5 MPa) em *E. grandis*, encontrou crescimento superior a 65% nas plantas que foram mantidas próximas a capacidade de campo.

Chaves et al. (2004), estudando clones jovens de eucalipto, observou para o período de antemanhã, uma queda de potencial hídrico foliar ao final de ciclo de seca, submetidos a deficiência hídrica, variando-se de -0,80 a -1,98 MPa. No entanto, para plantas sem deficiência hídrica, foi obtida uma variação de  $\psi_{fa}$  de -0,25 a -0,35 MPa.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Condições experimentais**

A área experimental está localizada na latitude 20°45'45" S, longitude 42°52'04" W, à altitude de 690 m. Segundo 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.

O experimento foi conduzido no viveiro de produção de mudas do Departamento de Engenharia Florestal, pertencente à Universidade Federal de Viçosa, situada na cidade de Viçosa (MG) no período de Novembro de 2012 a Julho de 2013, dividido em campanhas. A primeira campanha ocorreu no período de 22/11/2012 à 14/12/2012 correspondente a época mais quente, a qual teve o intuito de analisar o comportamento da perda de água ao longo do tempo em diferentes solos.

A segunda campanha, ocorreu no período de 28/02/2013 à 27/03/2013 e teve como finalidade analisar o comportamento do potencial hídrico foliar e de medidas ecofisiológicas ao longo do tempo nos solos avaliados, correlacionando-os com a perda de turgescência e a consequente morte das plantas. Para a terceira campanha, ocorrida no período de 11/06/2013 à 10/07/2013 referente a época do ano seca e fria, foi analisado a recuperação das plantas com o restabelecimento do potencial hídrico foliar e de medidas ecofisiológicas sob a aplicação de irrigação quando os solos atingiram determinados potenciais hídricos estabelecidos.

#### **3.2. Caracterização dos solos**

Os solos utilizados foram coletados na região da bacia do Rio Doce, mais especificadamente, nas cidades de Sabinópolis e Belo Oriente, ambas localizadas em regiões do alto e médio-baixo Rio Doce (MG) respectivamente, a quais representam os solos de maior ocorrência para cada região pertencentes a empresa Celulose Nipo-Brasileira CENIBRA.

Para a região de Sabinópolis (MG), localizada a 18°36'38" S e 43°10'25" W, altitude de 860 m, foram coletado solos de classificação Latossolo Vermelho acriférico típico (LVwf1) de horizonte A moderado e textura argilosa, e um Cambissolo Háplico distrófico típico (CXbd1) de horizonte A moderado e textura argilosa. Na região de Belo Oriente (MG), situada a 19°14'20" S e 2°21'28" W, altitude de 250 m, foram coletado solos de classificação Latossolo Amarelo distrófico típico (LAd2) de horizonte A moderado e textura média para argilosa.

As amostras foram levadas ao laboratório de física do solo do departamento de Engenharia Agrícola – UFV onde foi determinada a curva de retenção de água dos três tipos de solo, conforme a metodologia descrita pela EMBRAPA (1997) com o intuito de avaliar a capacidade de água em cada tipo de solo estudado e as determinadas umidades correspondentes a capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente.

Amostras deformadas, previamente peneiradas, e posteriormente saturadas por no mínimo 12 horas, foram levadas à câmara de pressão de Richards com placa porosa para a estabilização posterior e determinação da curva característica de retenção de água no solo, correspondente às tensões de: 0,01; 0,033; 0,1; 0,5 e 1,5 MPa.

O preparo do solo para o plantio comercial adota o revolvimento e escarificação do mesmo, podendo através da curva de retenção da água no solo inferir que as amostras deformadas se assemelham as condições vivenciadas pelas mudas recém plantadas.

Com a curva de retenção de água traçada no gráfico, obteve-se a capacidade de água disponível (CAD), ou seja, a quantidade de água presente no solo disponível para a planta de acordo com o volume de solo presente em cada minilímetro.

### **3.3. Coleta do solo e plantio das mudas**

Foram confeccionados minilímetros de Policloreto de polivinila (PVC) de 200 mm de altura com 150 mm e 250 mm de diâmetro interno conforme a figura 1A. O diâmetro predeterminado de 250 mm teve como finalidade formar uma bordadura no entorno do minilímetro de diâmetro

inferior, de modo a diminuir o efeito de advecção ocasionada pelo vento na direção horizontal (TAGLIAFERRE, et al., 2011; MATERÁN, et al., 2009; PEREIRA, et al., 1996).

Os minilísimetros foram cravados do solo no local de plantio das mudas, em áreas recém preparadas, com auxílio de uma marreta e de uma tábua para minimizar a quebra da estrutura do solo, figura 1B. Depois de cravados, foram retirados e limpos, tendo seus fundos tampados, com a finalidade de evitar a perda de solo. Os minilísimetros (tubo + solo) foram acondicionados e transportados até o local da área experimental na UFV sem que ocorressem danos nas características do perfil.

Em cada minilísimetro, foi plantada uma muda de um clone de *Eucalyptus urograndis* CNB10, estando a muda no ponto de plantio em campo.

Na adubação de plantio, utilizou-se a mesma adubação adotada para plantios comerciais, realizando a conversão da quantidade aplicada em campo em relação ao volume específico do minilísimetro. Na qual se utilizou a formulação 06 – 30 – 06 composta de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, respectivamente.

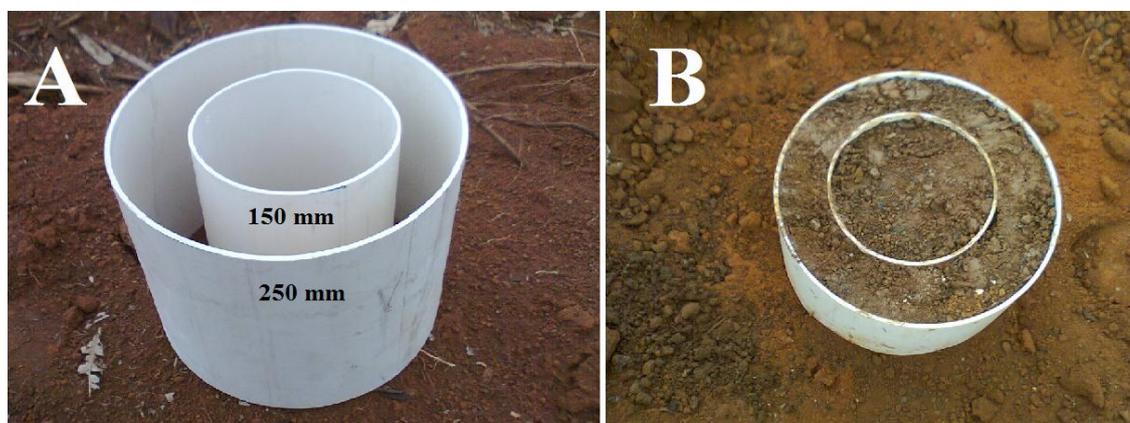


Figura 1 – Instalação dos tubos de PVC de 250 e 150 mm para coleta de solo. Posição para inserção no solo (A) e tubos já totalmente inseridos (B).

### 3.4. Delineamento estatístico e aplicação dos tratamentos

Os tratamentos foram arranjados em delineamento inteiramente casualizado, sendo diferenciados entre si de acordo com o tipo de solo. Na

primeira e segunda campanha, cada tratamento foi composto de 8 repetições, obtendo 24 repetições ao todo, os quais foram distribuídos em uma área experimental de 4 m<sup>2</sup>.

Para a terceira campanha, cada tipo de solo foi subdividido em 2 tratamentos com 4 repetições cada, totalizando 6 tratamentos, sendo estes diferenciados de acordo com os valores estabelecidos de tensões de potenciais hídricos. Os tratamentos 1, 3 e 5 corresponderam aos solos LVwf1, CXbd1 e Lad2 respectivamente, os quais, ao alcançarem o potencial hídrico foliar de ponto de murcha permanente (PMP) à -1,5 MPa, foram irrigados de forma que retornassem a capacidade de campo (CC). Já os tratamentos 2, 4 e 6, corresponderam aos solos LVwf1, CXbd1 e LAd2 respectivamente, porém receberam novamente a reposição de água após atingir valores abaixo do PMP, cujo os potenciais hídricos foliares estavam por volta de -3,0 MPa.

Os minilísimetros foram pesados diariamente para determinação da lâmina de água perdida. A determinação do peso foi realizada com auxílio de uma balança eletrônica digital (Mark K12) com capacidade de 12 Kg e resolução de 0,1g.

Os dados obtidos ao final do experimento foram submetidos à análise estatística pelo teste de médias Tukey a 5,0% de probabilidade, utilizando o pacote computacional SISVAR Versão 4.0 (FERREIRA, 2000).

O coeficiente de Willmott (d) quantificou 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 conforme a equação 1.

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

Em que:

d = coeficiente de Willmott, adimensional;

P<sub>i</sub> = valor de massa estimado, g recipiente<sup>-1</sup>;

O<sub>i</sub> = valor de massa observado, g recipiente<sup>-1</sup>;

$\bar{O}$  = média dos valores observados, g recipiente<sup>-1</sup>.

### 3.5. Estrutura de cobertura do experimento

A condução do experimento foi realizada em área aberta, no entanto, para impedir a interferência de eventos de chuva, foi construída uma estrutura metálica móvel (Figura 2) com pé direito de 1,5 metros que foi coberta com plástico de polietileno de baixa densidade (PEBD) de espessura 150  $\mu\text{m}$ , para que durante a ocorrência de chuva, a movimentação da mesma fosse realizada manualmente com intuito de cobrir toda área experimental.



Figura 2 – Estrutura utilizada para a cobertura da área experimental nos momentos de ocorrência de precipitação pluviométrica. Posição descoberta (A) e posição coberta (B).

### 3.6. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados foram obtidos a partir de uma estação meteorológica automática (EMA) instalada a 5 metros de distância da área experimental, que era composta pelos seguintes sensores:

- Piranômetro (Kipp & Zonen, Röntgenweg, The Netherlands, CM3);
- Termohigrômetro (Vaisala, Helsinki, Finland, HPMP45AC);
- Anemômetro (Campbell Scientific Instruments, Utah, USA, TE525);
- Pluviômetro (Texas Electronics, Inc. Dallas, Texas, USA, TR-525M);
- Tanque Classe A.

### 3.7. Determinação da lâmina evaporada

Para iniciar cada campanha de medidas, os solos foram saturados, à semelhança do que ocorre em campo, com irrigação logo após em campo. Este procedimento sempre foi realizado no final da tarde mantendo os minilímetros em um local com umidade do ar próxima a saturação durante todo o período noturno. Este procedimento foi realizado para garantir que o solo perdesse água até a nível da capacidade de campo. Na manhã seguinte, os minilímetros eram posicionados ao relento dando início ao experimento.

Estabelecido a capacidade de campo (CC), os minilímetros mais o solo foram pesados (dia  $i$ ) e conduzidos até o local do experimento. No dia seguinte (dia  $i + 1$ ), os solos foram novamente pesados, sendo que a diferença do valor da massa do solo no dia anterior com a massa do dia atual correspondeu à quantidade de água evaporada. Para a determinação da lâmina evapotranspirada, foi descontado a biomassa presente no minilímetro ( $w$ ), sendo considerada a biomassa foliar como representativa da biomassa total, que foi calculada pela equação 4 de acordo com Goudriaan e Laar (1994), a fim de obter a real perda de água diária no solo. Com isso, calculou-se a lâmina evaporada em milímetros (mm) a partir das equações 2 e 3.

$$L_{ev(i,i+1)} = 12,7 \times \frac{\bar{E}}{D^2} \quad (2)$$

Sendo:

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - w)}{n} \quad (3)$$

Sendo:

$$w = w_0 \times e^{(r_m \times t)} \quad (4)$$

Em que:

D = diâmetro interno do minilímetro, cm;

$E_i$  = evaporação direta da água no solo medida no recipiente  $i$ , g;

- $n$  = número de repetições, adimensional;  
 $L_{ev}$  = lâmina evaporada, mm.  
 $w$  = biomassa final, g m<sup>-2</sup>;  
 $w_0$  = biomassa inicial, g m<sup>-2</sup>;  
 $r_m$  = taxa de crescimento relativa de biomassa, g g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>;  
 $t$  = tempo, dias; e  
 $\overline{E}$  = evaporação média da água no solo, g.

### 3.8. Determinação do IAF

O índice de área foliar (IAF) é uma relação de área entre a superfície foliar e a área da projeção da copa no solo. Esse índice foi determinado semanalmente a partir da seleção de três plantas por tratamento, totalizando 12 plantas.

A determinação da área foliar foi realizada de maneira não destrutiva, ou seja, a delimitação de cada folha ocorreu a partir do contorno da mesma sobre uma folha de papel, as quais posteriormente eram recortadas e levadas para avaliação utilizando o equipamento que integra a área foliar, o LI-3100C, (Licor Biosciences, EUA).

O IAF que é o parâmetro biofísico adimensional da planta, foi obtido dividindo-se a área foliar total pela área do minilímetro, representado matematicamente pela equação 5.

$$IAF = \frac{AF}{\pi \times r^2} \quad (5)$$

Em que:

- $AF$  = área foliar total, cm<sup>2</sup>;  
 $r$  = raio da circunferência do recipiente, cm; e  
 $\pi$  = constante (13,1416).

### 3.9. Evapotranspiração de referência

A determinação da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) foi calculada a partir da equação (6) desenvolvida por Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998):

$$ET_0 = \frac{0,408 \times \Delta(Rn - G) + \gamma \left( \frac{900 \times U_2}{T + 273} \right) \times (es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 \times U_2)} \quad (6)$$

Onde:

- ET<sub>0</sub> = evapotranspiração de referência, mm dia<sup>-1</sup>;
- Rn = saldo de radiação, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>;
- G = fluxo de calor no solo, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>;
- Δ = declinação da curva de saturação do vapor da água, kPa °C<sup>-1</sup>;
- γ = constante psicrométrica, kPa °C<sup>-1</sup>;
- U<sub>2</sub> = velocidade média do vento a 2m da superfície do solo, m s<sup>-1</sup>;
- T = temperatura média do ar, °C;
- es = pressão de saturação de vapor, kPa; e
- ea = pressão atual de vapor, kPa.

### 3.10. Albedo

Adotou-se o valor 0,3 para o albedo do solo (a<sub>s</sub>), e 0,1 para o albedo da cultura (a<sub>c</sub>) conforme Vianello (2012). Foi utilizada uma equação empírica em função do índice de área foliar para estimar o albedo da superfície solo-cultura (a<sub>sc</sub>) (Equação 7). Segundo Ritchie (1972), do plantio até a germinação, prevalece o albedo do solo; da germinação até a cobertura total do solo pela planta o albedo da superfície depende da inter-relação de a<sub>s</sub> com a<sub>c</sub>, e após a cobertura total, prevalece o albedo da cultura.

$$a_{sc} = a_c - (a_c - a_s) \times e^{(-0,75IAF)} \quad (7)$$

Em que:

- a<sub>sc</sub> = albedo da superfície solo-cultura, adimensional;
- a<sub>c</sub> = albedo da cultura, adimensional; e
- a<sub>s</sub> = albedo do solo, adimensional.

### 3.11. Determinação da evapotranspiração pelo método de Ritchie

Para a estimativa da evapotranspiração das mudas recém-transplantadas utilizou-se o modelo de Ritchie (1972). Este modelo permite

separar a componente evaporação do solo e a transpiração das plantas.

Uma vantagem do método é a estimativa da evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) a partir de diferentes padrões de irrigações, podendo ser utilizado tanto em tempo real, quanto em simulações na programação de irrigação.

Esse modelo é dividido em três fases. A fase 1 é caracterizada pela evaporação do solo relativamente elevada, sendo esse processo governado pelas condições atmosféricas. O modelo pressupõe que nessa fase o solo seca a uma taxa constante dependendo basicamente da energia disponível e condições aerodinâmicas reinantes. A quantidade de água evaporada nesta fase é representada por  $U$ .

A fase 2 tem início a partir do instante em que a água do solo não pode mais ser transmitida à superfície em velocidade suficiente para satisfazer a demanda evaporativa da atmosfera. Nessa fase, a taxa de transferência da água para a atmosfera sofre restrições, deixando de ser exclusivamente governada pela atmosfera, assim, a retenção de água pela matriz do solo diminui a condutividade hidráulica. A constante representativa da difusividade da água na superfície do solo durante esta fase de secagem é representada por  $\alpha$ . Na terceira fase, o solo se encontra com menor disponibilidade hídrica, a evaporação reduz muito devido a força de adsorção da água e a matriz do solo.

Considerando as duas primeiras fases de secagem do solo descritas por Philip (1957) e os dois parâmetros para representá-las ( $U$  e  $\alpha$ ), Ritchie (1972), apresentou uma descrição matemática para o processo da evaporação ( $E$ ).

Durante a primeira fase de secagem do solo, o cálculo da evaporação direta ( $E_1$ ) é feito a partir das equações 8 ou 9, sendo uma função do índice de área foliar ( $IAF$ ) da cultura.

$$E_1 = ET_p [1 - 0,43 \times (IAF)], \text{ se } IAF < 1 \quad (8)$$

$$E_1 = \left( \frac{ET_p}{1,1} \right) \times e^{-0,4IAF}, \text{ se } IAF \geq 1 \quad (9)$$

Em que:

$E_1$  = evaporação direta da água do solo durante o primeiro estágio de secagem,  $\text{mm dia}^{-1}$ ; e

$ET_p$  = evaporação potencial,  $\text{mm dia}^{-1}$ .

Para o cálculo da evaporação potencial ( $ET_p$ ), segundo a metodologia de Ritchie (1972), o método utiliza o conceito de evaporação de equilíbrio (EEQ) (Equação 10) desenvolvido por Statyer e Mcilroy (1961) e descrita pela metodologia de Jones e Kiniry (1986).

$$EEQ = R_s \times (4,88 \times 10^{-3} - 4,37 \times 10^{-3} a_{sc}) \times (t_d + 29)$$

(10)

Onde:

$R_s$  = radiação solar, em  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ; e

$t_d$  = temperatura média do período diurno, em  $^{\circ}\text{C}$ .

A temperatura média do período diurno foi calculada com base na média dos dados horários da temperatura. Para a correção da interferência da temperatura no cálculo da evaporação potencial, foi utilizado  $\alpha_1$ , de modo que a equação 11 visa compensar o efeito do ar não saturado; a equação 12 o efeito da advecção; e a equação 13, a influência das baixas temperaturas nos estômatos.

$$\alpha_1 = 1,1, \text{ se } 5 < T_{\max} \leq 35 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (11)$$

$$\alpha_1 = [1,1 + 0,05 \times (T_{\max} - 35)], \text{ se } T_{\max} > 35 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (12)$$

$$\alpha_1 = 0,01 \times e^{[0,18 \times (T_{\max} + 20)]}, \text{ se } T_{\max} \leq 5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (13)$$

Desse modo, a  $ET_p$  considera o valor de EEQ obtido na equação 10 e a correção de  $\alpha_1$  por meio da equação 14.

$$ET_p = \alpha_1 \times EEQ \quad (14)$$

A evaporação ( $E_2$ ) para a fase 2 de secagem do solo, é dependente do tempo transcorrido desde a troca de fase, ou seja, é função do parâmetro U do solo. Nessa fase,  $E_2$  é calculado pela equação 15, para valores

individuais ( $E_2$ , mm dia<sup>-1</sup>) ou pela equação 16 para valores acumulados ( $E_{2a}$ , mm dia<sup>-1</sup>) de evaporação.

$$E_2 = \alpha t^{-1/2} \quad (15)$$

$$E_{2a} = \alpha t^{1/2} \quad (16)$$

Em que:

t = tempo transcorrido desde a troca de fase (U), dias;

$\alpha$  = parâmetro que caracteriza a segunda fase de evaporação.

A transpiração (T) ou a evaporação da água da planta é calculada em função da  $ET_p$  e do estágio de desenvolvimento da cultura, representado pelo IAF, utilizando, para isso, as seguintes equações.

$$T = ET_p \left[ 1 - e^{-IAF} \right], \text{ se } IAF \leq 3 \quad (17)$$

$$T = ET_p, \text{ se } IAF > 3 \quad (18)$$

Se  $(E + T) > ET_p$ , o valor de T é recalculado pela equação 19.

$$T = ET_p - E \quad (19)$$

### 3.12. Determinação dos parâmetros U e $\alpha$

O parâmetro U representa, no modelo de Ritchie, a quantidade de água evaporada no primeiro estágio de evaporação. Sua estimativa pode ser feita identificando-se o momento em que tem início a queda na taxa de evaporação (E). O valor acumulado de (E) corresponde ao valor de U, e é obtido na inflexão da curva traçada no gráfico de evaporação acumulada em função do dia após a irrigação.

A taxa de evaporação da água do solo no segundo estágio de evaporação para o modelo de Ritchie é determinada como parâmetro  $\alpha$  (mm dia<sup>-1</sup>), a qual é representada pela variação da (E) no segundo estágio de evaporação ( $E_2$ ). O valor de  $\alpha$  é expresso pela inclinação da reta obtida da regressão linear entre os dados de evaporação acumulados no segundo estágio ( $E_2$ ) e a raiz quadrada do tempo, em dias (RITCHIE, 1972).

### 3.13. Determinação do potencial hídrico foliar

Para a determinação do potencial hídrico foliar, foi utilizada a câmara de pressão tipo Scholander (Scholander et al. 1965), modelo 3115 “Portable Plant Water Status Console”. Esse potencial é relacionado com a pressão de balanceamento, sendo essa pressão aquela necessária para forçar a água do tecido para fora da superfície cortada do pecíolo. Destaca-se a folha da planta e insere-se na bomba de pressão com a extremidade do pecíolo voltada para fora da câmara, envolvida pelo sistema de vedação.

A pressão é aplicada até que se observa a exudação de seiva na superfície do corte (Figura 3). O negativo da pressão necessária para produzir a exsudação é considerado igual ao potencial do tecido, no momento do corte. Para esse método, utiliza-se nitrogênio (N<sub>2</sub>) ou ar atmosférico comprimido para exercer a pressão (Passos, 1996).

Segundo Angelocci (2002), quando uma planta transpira, ela apresenta uma pressão hidrostática negativa (tensão) no xilema e se o pecíolo for cortado em certo ponto, a tensão é despreendida e a coluna líquida retrocede no xilema para o interior da folha. Esse processo pode ser observado se a folha, logo após o corte, for inserida em uma câmara de pressão hermeticamente fechada e pressurizada gradualmente com um gás, conforme a figura 3. Isso fará com que a coluna líquida tenda a retornar para a superfície do pecíolo, podendo assim ser visualizada com auxílio de uma lupa. Nesse momento, a pressão aplicada equilibra-se com a tensão do xilema no momento do corte. O valor negativo encontrado no momento de equilíbrio representa o potencial médio da água na folha.

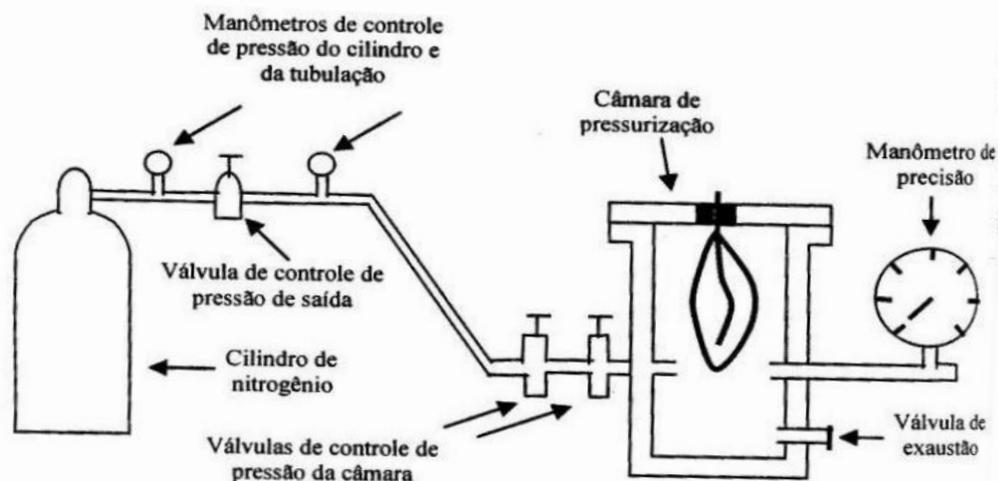


Figura 3 – Esquema detalhado de uma câmara de pressão e seus principais componentes (Angelocci, 2002).

O potencial hídrico foi avaliado com a câmara de pressão no período de antemã (  $\psi_{fa}$  ) (antes do nascer do sol) em folhas totalmente desenvolvidas, obtendo assim o status hídrico em que a planta se encontrava.

### 3.14. Medidas fisiológicas

Para a obtenção das respostas das plantas ao déficit hídrico em cada tipo de solo estudado, foram realizadas medidas fisiológicas semanais no período da manhã (8:00 hs). Para isso, utilizou-se o analisador de gás infravermelho (IRGA - Infra-red Gas Analyzer), modelo LI-6400 XT (LI-COR, Lincoln, Nebraska – USA), a partir do qual foram coletados dados de fotossíntese líquida, condutância estomática e transpiração.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Caracterização física e retenção de água no solo

Na figura 4 pode ser observado a variação da tensão de água para os três tipos de solos estudados. Foram apresentados conteúdos volumétricos (grama de água por grama de solo) para as tensões de 0,01; 0,03; 0,10; 0,50 e 1,50 MPa.

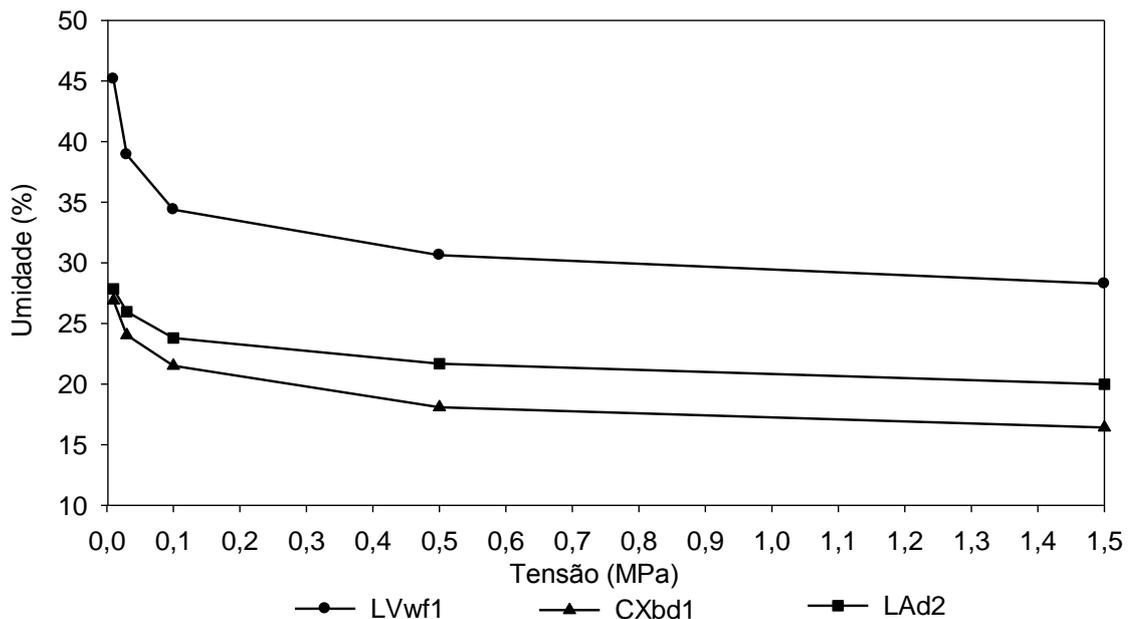


Figura 4 – Curva de retenção de água para amostras deformadas dos solos estudados: Latossolo vermelho acriférico típico (LVwf1), Cambissolo háplico distrófico típico (CXbd1) e Latossolo amarelo distrófico típico (LAd2).

A tensão mínima de retenção de água pelo solo pode variar entre 0,01 e 0,03 MPa, explicado pela composição e principalmente pela estrutura dos solos. A tensão mínima do solo caracteriza o estado hídrico denominado capacidade de campo (CC). A CC pode ser entendida como a quantidade máxima de água contida em determinado volume de solo. Quando esse volume de solo refere-se a camada das raízes é possível inferir sobre a máxima disponibilidade destes recursos para os vegetais.

A menor disponibilidade de água no solo passível de ser absorvida pelas raízes das plantas é conhecida como ponto de murcha permanente

(PMP). Este conceito foi definido pela área do conhecimento de fisiologia vegetal e é observado quando a retenção da água do solo atinge tensão de 1,5 MPa. O intervalo entre a umidade do solo na CC e PMP é denominado de capacidade máxima de armazenamento de água no solo (CAD).

Com base na figura 4, verifica-se que os minilísimos LVwf1 na CC, apresentaram umidade volumétrica entre 38,9 e 45,2%, o que corresponde respectivamente a lâmina total de água de 88,8 e de 103,0 mm. O PMP para esse solo retém 27,5% de umidade, que corresponde a 64,5 mm. Infere-se que a lâmina utilizável pelas plantas é de 38,5 mm, sendo esta denominada “capacidade máxima de água no solo (CAD)”.

Os outros solos estudados (CXbd1 e LAd2), apresentaram capacidade de retenção de água tanto para a CC como para a PMP bem menores. Esses dois solos possuem capacidade de retenção máxima de água a 0,01 MPa praticamente iguais, como aproximadamente 27,4% de umidade, que corresponde cerca de 67,3 mm. Verifica-se que o CXbd1 tem sua capacidade de retenção rapidamente diminuída para a tensão de 0,03 MPa (24,0%; 58,6 mm) em comparação com o LAd2 (26,0%; 64,3 mm). De maneira geral, o LVwf1 apresenta maior quantidade de água no PMP quando comparado ao LAd2, com 20,0% (49,5 mm) e ao CXbd1, com 16,4% (40,0 mm).

A CAD do LVwf1 foi superior em relação aos demais solos estudados, sendo o conteúdo de água retido no PMP e na CC maior que os observados para os outros dois solos. Embora essa CAD do LVwf1 seja maior, também é maior a tensão com que a água fica retida. Contudo, a expressiva capacidade superior de estocar água desse solo pode compensar a maior retenção mencionada.

#### **4.2. Caracterização microclimática no período do experimento**

Na figura 5 está apresentada a variação dos elementos meteorológicos radiação solar incidente, temperatura máxima, mínima, média máxima e média mínima do ar, e umidade relativa média que caracterizam as condições ambientais observadas durante as três campanhas de coleta de dados.

As maiores temperaturas foram registradas nas duas primeiras campanhas, correspondendo a estação mais quente e chuvosas do ano. Em relação à umidade relativa, observou-se que a terceira campanha correspondeu a época mais seca do ano (inverno) com umidade relativa média em torno de 78,0% e a primeira e segunda campanha foram as mais úmidas, apresentando umidade relativa média em torno de 80,0 e 83,0% respectivamente.

Os maiores totais de radiação solar, foram verificados nas duas primeiras campanhas, com valores médios de 17,5 e 17,7 MJm<sup>-2</sup>dia<sup>-1</sup>, respectivamente, e os menores totais foram verificados na terceira campanha, com média de 10,8 MJm<sup>-2</sup>dia<sup>-1</sup>. Apesar de ser esperado maior irradiância solar no verão em comparação ao inverno, fato observado, deve-se destacar que a primeira estação coincide com o período chuvoso do ano no qual se verifica maior nebulosidade.

Xavier (2010), estudando mudas de híbridos de eucalipto (*E. grandis* x *E. urophylla*) para diferentes épocas e condições hídricas do solo, verificou que condições climáticas de elevada temperatura do ar e menores valores de umidade relativa, poderia favorecer a ocorrência de déficit hídrico.

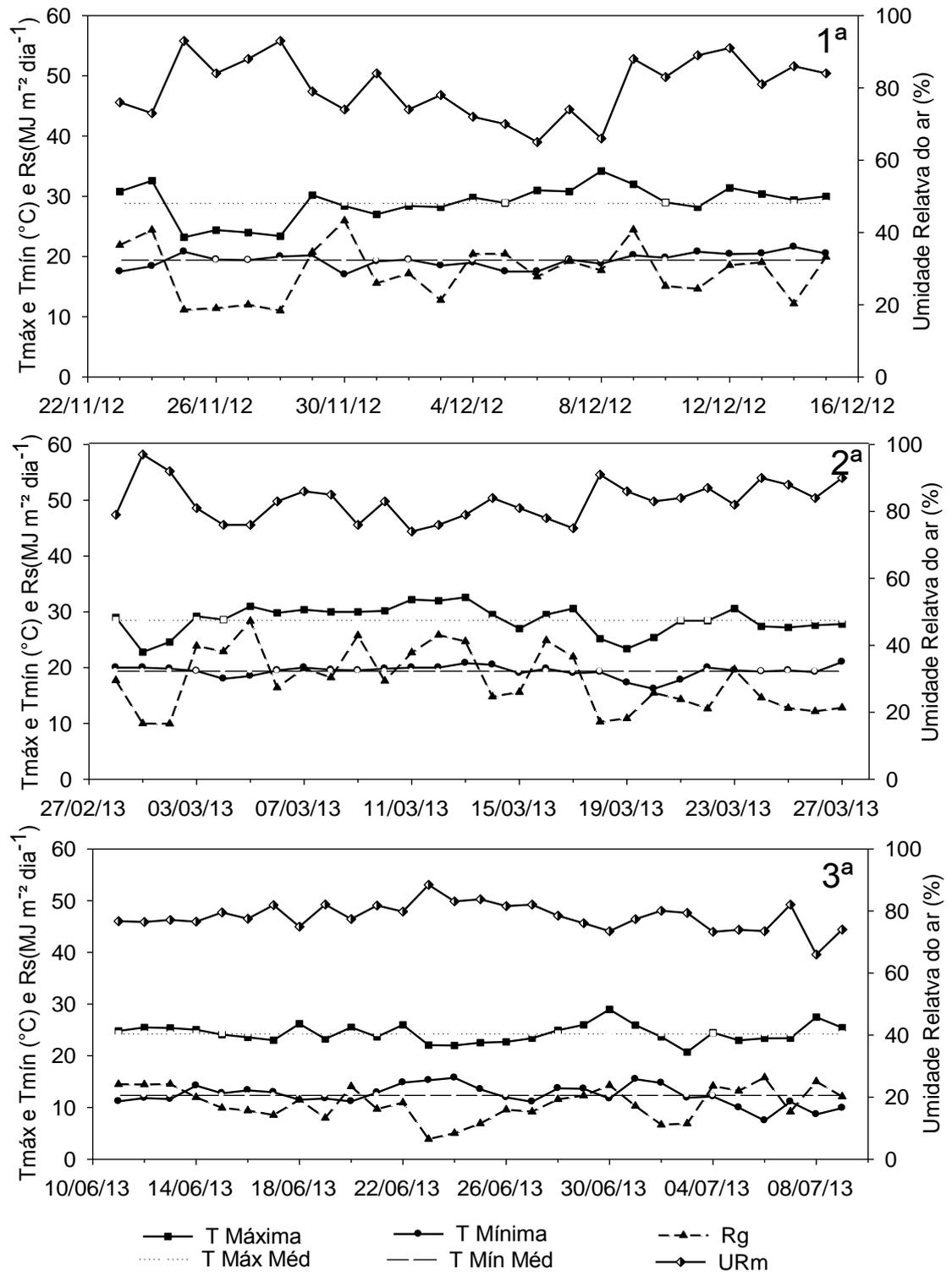


Figura 5 – Valores diários da radiação solar incidente (Rg), temperatura máxima (T Máxima), máxima média (T Máx méd), mínima (T Mínima), mínima média (T Min méd) e umidade relativa média (URm), durante as três campanhas experimentais.

### **4.3. Lâmina evapotranspirada nos tratamentos e campanhas**

#### **4.3.1. Primeira e segunda campanhas de coleta de dados**

Na figura 6 é apresentada a variação da lâmina evapotranspirada durante a primeira e a segunda campanhas nos três tipos de solos estudados. Apresenta-se também a variação da evapotranspiração da cultura de referência ( $ET_0$ ) para os períodos correspondentes.

Comparando-se os valores da evapotranspiração das plantas de eucalipto com a  $ET_0$ , verifica-se existir alta correspondência nos primeiros dias do experimento, ocorrendo depois um desacoplamento dos valores. O mesmo comportamento é verificado quando comparado aos valores de evaporação do tanque classe A (ECA), entretanto este último se aproxima mais dos valores absolutos observados na perda de água pelo eucalipto.

A coincidência nas variações dos valores de  $ET_0$  e ECA com os valores de evapotranspiração das mudas de eucalipto no início das campanhas está no fato de ser verificado maior transferência de água no sistema solo-planta para a atmosfera uma vez que o solo se encontra próximo a CC. A maior correspondência dos valores de ECA com a evapotranspiração das plantas no início do experimento é explicada pela transferência de água ocorre em maior quantidade de origem de evaporação do solo, sendo a  $ET_0$  estimada pelos valores transpirados, portanto, mesmo com o solo na CC, verifica-se o controle estomático.

Após este período, observa-se uma abrupta diminuição da evapotranspiração das plantas resultante da diminuição da condutividade hidráulica da água no solo. Nesta fase ocorre o desacoplamento da ECA e da  $ET_0$ .

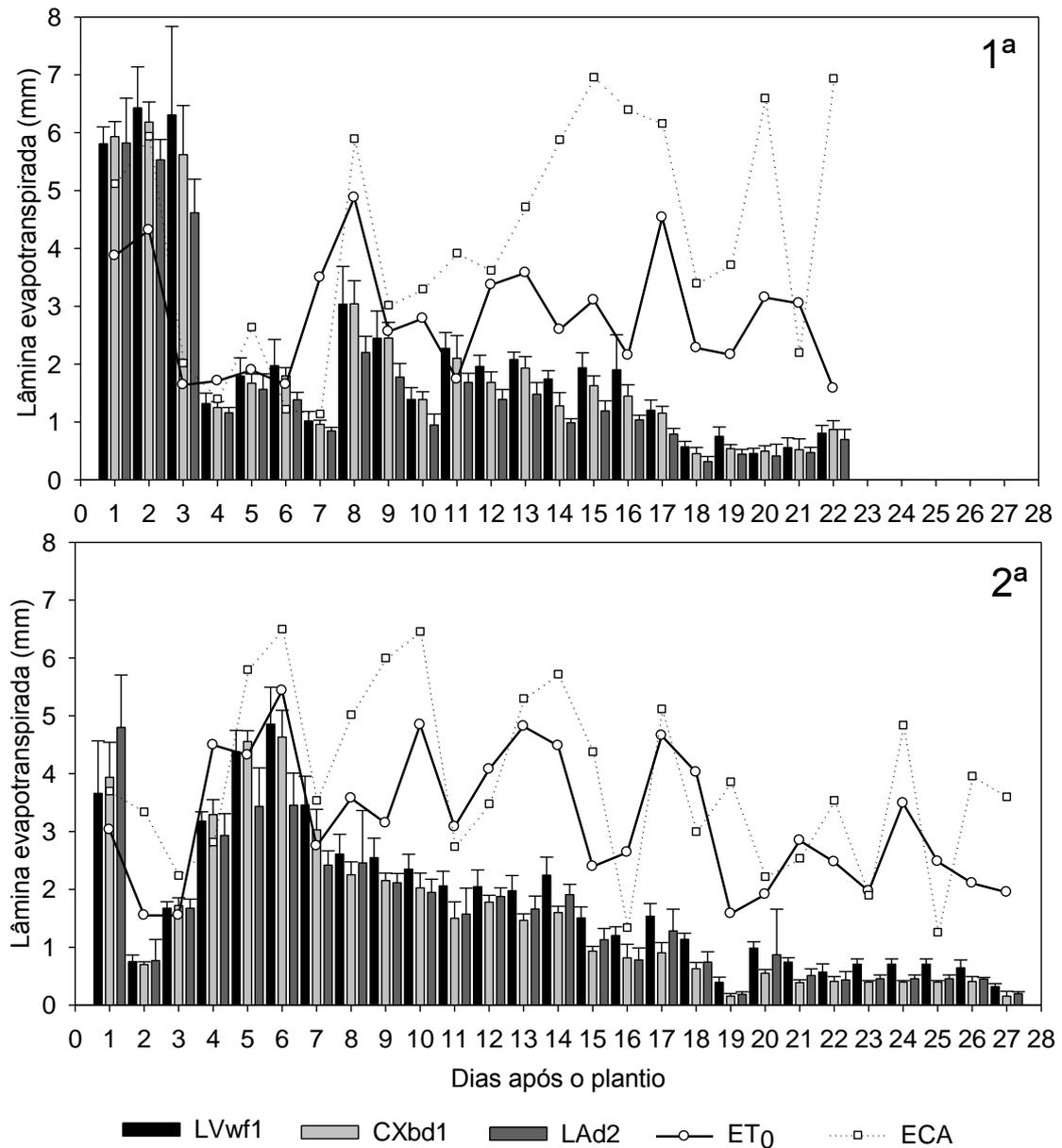


Figura 6 – Variação diária da ET<sub>0</sub>, ECA e da lâmina evapotranspirada para os diferentes tipos de solo ao longo da 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> campanha.

Na figura 7 é apresentada a lâmina evapotranspirada acumulada ao longo dos dias para a primeira e segunda campanhas. Na primeira campanha, o solo LAd2, apresentou diferença estatística em relação aos demais ao nível de 5,0% de significância para o teste Tukey, com totais acumulados durante a campanha de 36,8 mm ( $\pm 2,3$  mm). Os solos LVwf1 e CXbd1 não apresentaram diferença significativas, sendo os seus totais de 47,7 mm ( $\pm 4,1$  mm) e 44,4 mm ( $\pm 2,8$  mm) respectivamente.

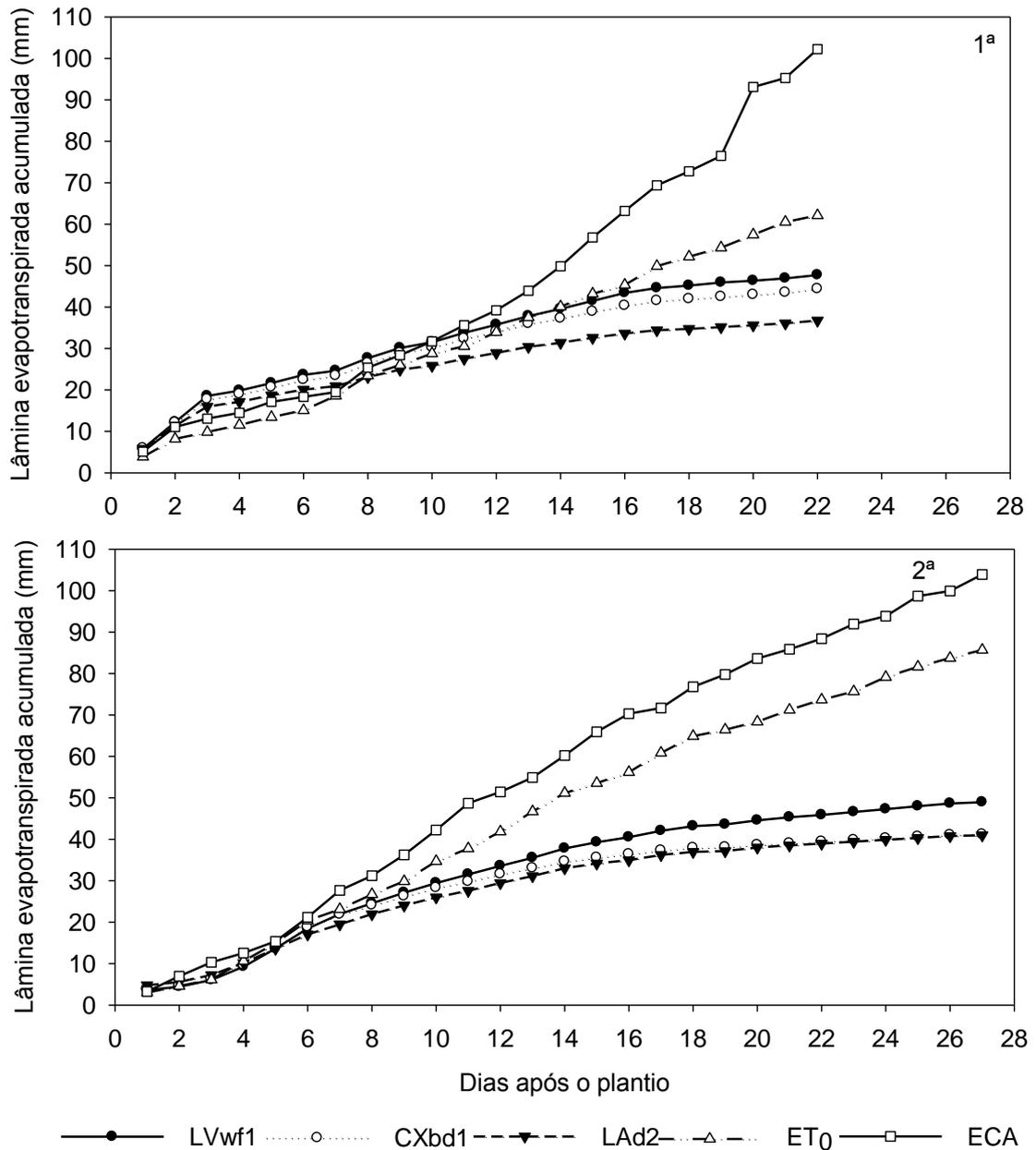


Figura 7 – Variação da lâmina evapotranspirada acumulada em milímetros referente a cada tipo de solo, ET<sub>0</sub> e ECA acumulada ao longo da 1ª e 2ª campanha.

Na segunda campanha, verifica-se que o comportamento da perda de água pelas plantas nos solos LVwf1 e LAd2 foram semelhantes ao verificado na primeira campanha. O CXbd1 entretanto diminuiu a lâmina total perdida se igualando ao LAd2.

Na figura 8 é apresentada a variação do potencial hídrico foliar antemanhã ( $\psi_{fa}$ ) para os diferentes tipos de solos ao longo da segunda

campanha. Dentre os solos analisados, o CXbd1 foi o que alcançou o PMP (-1,5 MPa) primeiro. A partir do início da campanha, este solo sempre apresentou as maiores tensões de água em comparação as demais. A partir da análise física do solo (Figura 4), verifica-se que embora o CXbd1 apresente menor CAD, este demora menos tempo para atingir o PMP. Em outras palavras, seu dessecamento é mais rápido para uma mesma demanda atmosférica em comparação aos solos LVwf1 e LAd2.

Tanto para o solo LVwf1 quanto para o CXbd1 é verificado a coincidência da lâmina total no PMP em relação a quantidade de água nesta tensão dada pela curva de retenção de água no solo. O LAd2 apresentou uma lâmina evapotranspirada aproximadamente 50,0% superior ao estimado pela curva de retenção

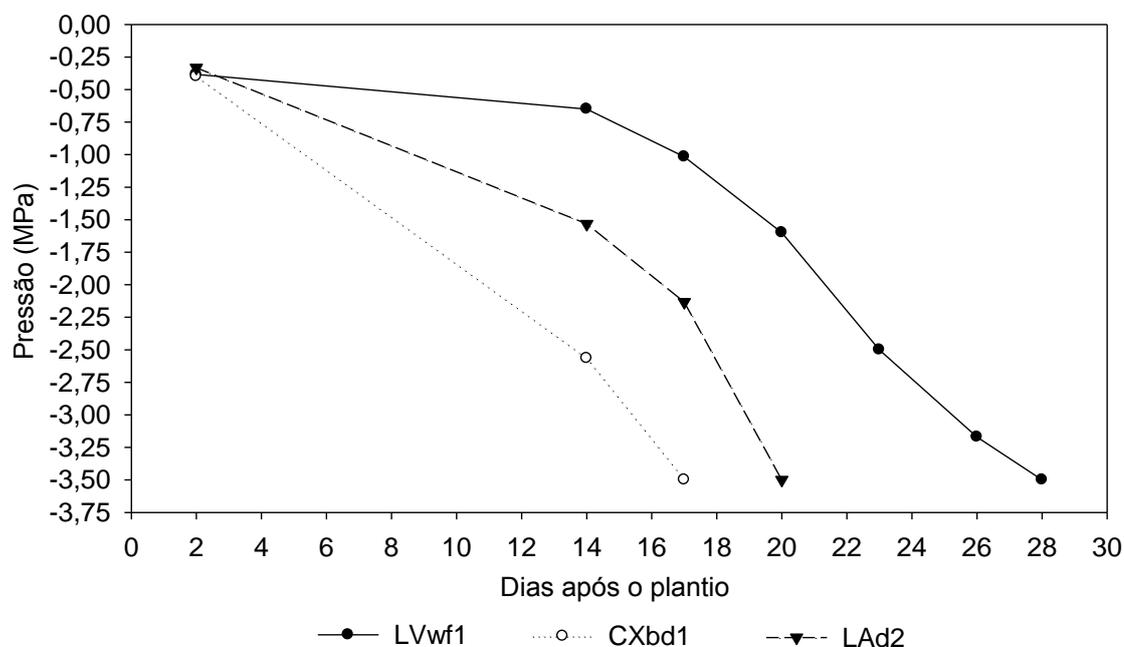


Figura 8 – Variação do potencial hídrico foliar medido no período de antemanhã referente a segunda campanha experimental para os diferentes tipos de solos estudados.

A perda de turgescência das plantas, para os solos LAd2 e CXbd1 foram observadas no mesmo dia para ambas, tendo acumulada uma lâmina até referido momento de 34,2 e 36,4 mm para o LAd2 e CXbd1 respectivamente. Para o solo LVwf1, foi observada a perda de turgescência

somente cinco dias após aos demais solos, possuindo uma lâmina evapotranspirada acumulada de aproximadamente 41,0 mm.

Na figura 9 pode ser observado a variação do índice de área foliar (IAF) ao longo do tempo na segunda campanha de plantio para os diferentes tipos de solos nos minilísimetros. Em nenhum dos solos foi observado variação significativa quando comparados ao nível de significância de 5,0%. No entanto foi observada tendência de que enquanto a planta está com  $\psi_{fa}$  superior a -1,5 MPa (Figura 8), ocorre o aumento do IAF, indicando que a planta ainda está em crescimento. Quando o  $\psi_{fa}$  é inferior a -1,5 MPa, a planta começa a perder biomassa foliar, sendo considerado a partir desse ponto, a paralização do seu crescimento.

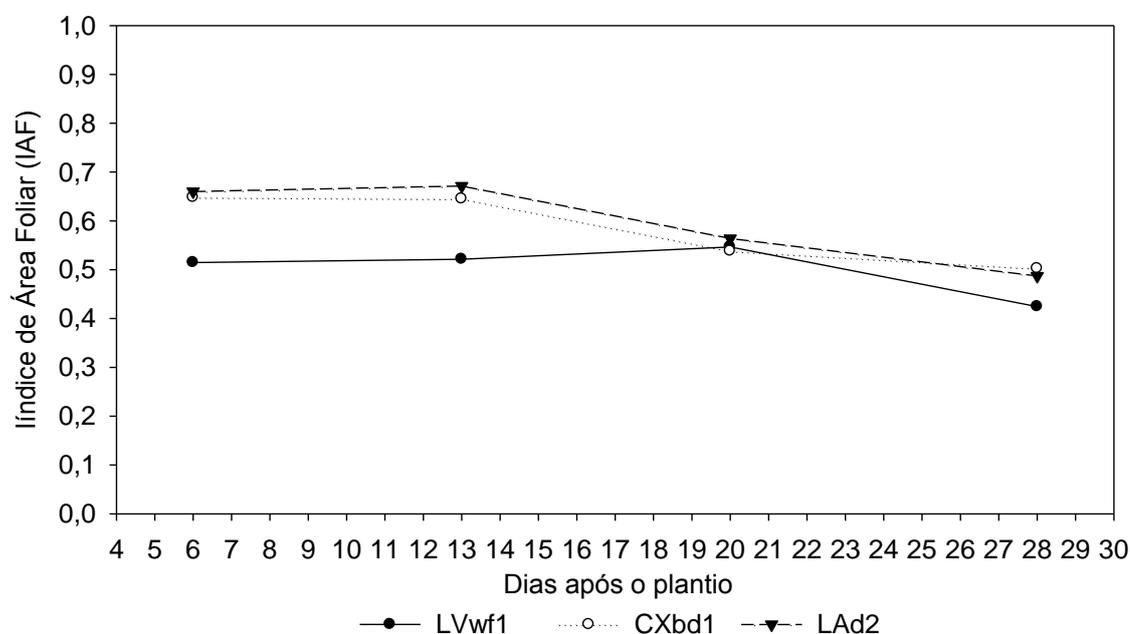


Figura 9 – Variação do índice de área foliar (IAF) para cada tipo de solo ao longo do tempo da segunda campanha.

Durante essa campanha, foi verificado redução do IAF em 17,6%, 22,5% e 26,2%, respectivamente para os solos LVwf1, CXbd1 e LAd2. Contudo, foi verificado aumentos na biomassa de caule 7,1%, 5,3% e 9,0% e de raízes em 25,3%, 27,4% e 29,1%, respectivamente para os solos LVwf1, CXbd1 e LAd2.

Taiz e Zeiger (2004) e Santos e Carlesso (1998), relataram que as principais respostas da planta quando submetidas ao déficit hídrico são:

decréscimo da área foliar, fechamento dos estômatos, aceleração da senescência com a abscisão das folhas, mudanças morfológicas da folha e maior crescimento da raiz pivotante em detrimento das raízes superficiais.

Ajustou-se a equação proposta por Gooudrian et al. (1994) para simular os ganhos diários de biomassa para os diferentes tratamentos. A taxa de crescimento ( $r_m$ ) superior foi observada para o solo LVwf1, com valor de  $0,0030 \text{ g g}^{-1}\text{m}^{-1}$ , quando comparada aos solos CXbd1 e LAd2 que obtiveram valores de  $0,0018 \text{ g g}^{-1}\text{m}^{-1}$  e  $0,0013 \text{ g g}^{-1}\text{m}^{-1}$  respectivamente.

Na figura 10 são apresentadas as variáveis ecofisiológicas medidas ao longo da segunda campanha. Nota-se de maneira geral, redução da fotossíntese, condutância estomática e transpiração para todos os tratamentos à medida que a disponibilidade hídrica do solo diminui.

Iniciou-se as medidas ecofisiológicas apenas à partir do décimo terceiro dia, quando as plantas encontravam-se ainda em bom estado de crescimento, uma vez que o levantamento destas informações tem por objetivo determinar o momento no qual o déficit hídrico imposto acarreta a paralização dessas funções.

Não foi observado variação significativa entre os tratamentos em relação a condutância estomática e a transpiração ao longo dessa campanha. No entanto observa-se para as plantas referentes ao solo CXbd1, que estas possuíam menores valores de condutância desde o início, permitindo menores trocas gasosa com a atmosfera, tendo menores ganho de  $\text{CO}_2$  e perda de água.

Em se tratando da atividade fotossintética, verificou-se a variação significativa entre os tratamentos, sendo o LVwf1 com maior média fotossintética ao longo de toda a campanha, em torno de  $4,66 \mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , quando relacionada ao solo LAd2 e CXbd1 que obtiveram valores médios de  $3,07 \mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e  $1,11 \mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  respectivamente conforme a figura 9. Essa paralização ocorreu quando se obteve uma lâmina evapotranspirada acumulada de aproximadamente 47,0 mm e 39,7 mm para o LVwf1 e CXbd1 respectivamente.

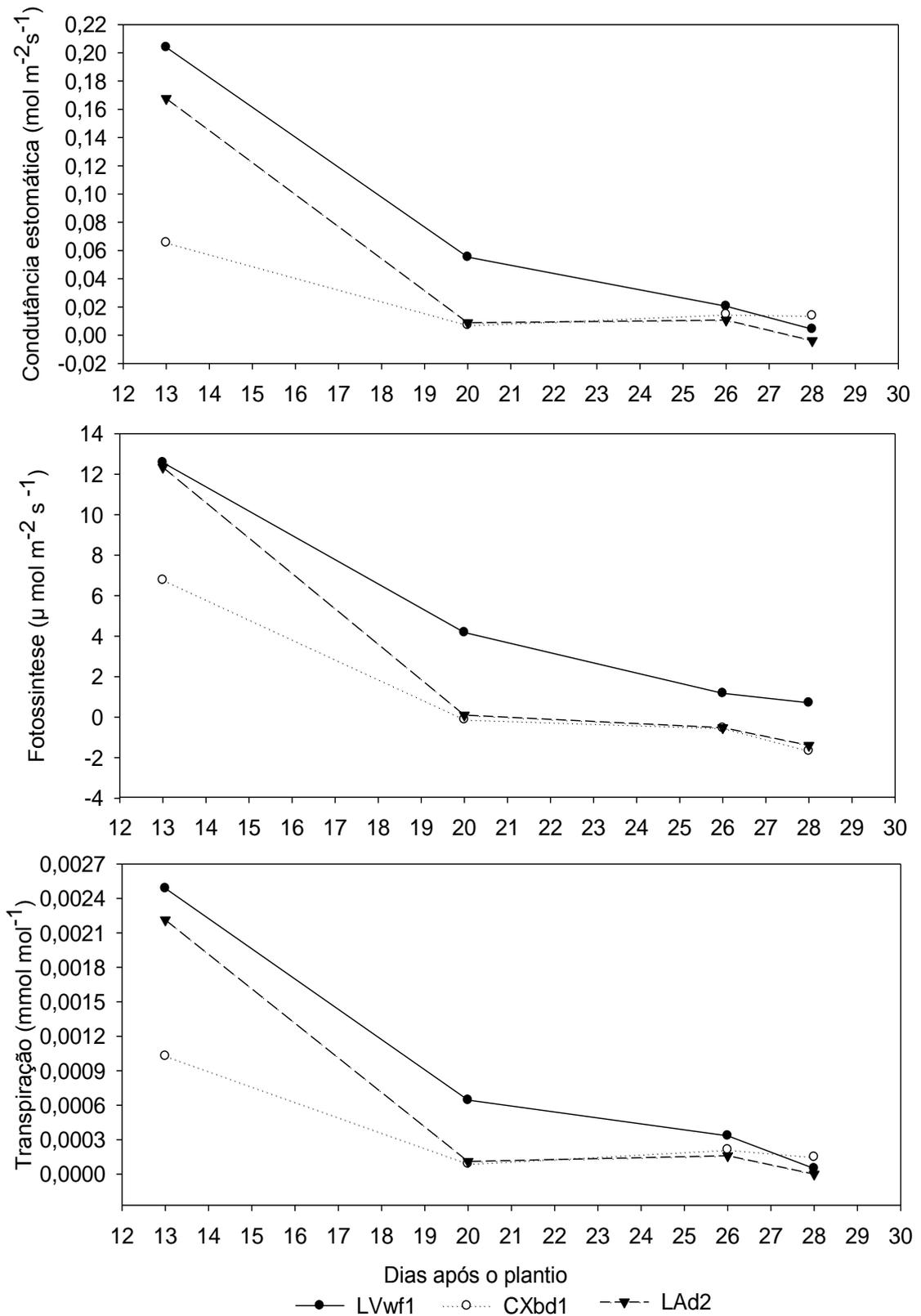


Figura 10 – Variação da condutância estomática, fotossíntese e transpiração ao longo da segunda campanha sob os diferentes tipos de solos analisados.

### 4.3.2. Terceira campanha de coleta de dados

A terceira campanha se destinou a avaliar o comportamento da perda de água dos minilísimetros no período de inverno, quando se verifica baixas temperaturas devido a menor irradiância solar e diminuição da umidade do ar. Nesta campanha, uma vez que se conheciam as respostas ecofisiológicas, foi possível testar dois momentos para a reposição de água nos diferentes solos e inferir a recomposição da capacidade produtiva das plantas.

Na figura 11 é apresentada a variação da lâmina evapotranspirada durante a terceira campanha nos três tipos de solos estudados. Apresenta-se também a variação da evapotranspiração da cultura de referência ( $ET_0$ ) para os períodos correspondentes.

À semelhança do que foi verificado nas campanhas 1 e 2, na fase inicial a  $ET_0$  também apresentou valores menores que os observados pelas mudas. Neste período do ano, observa-se menor disponibilidade de energia para os processos biofísicos, verificando-se redução na evapotranspiração quando comparado aos outros períodos.

A variação dos valores de ECA são mais próximas aos da evapotranspiração das plantas na fase inicial, explicado pela maior disponibilidade de água no solo, portanto maior condutividade hidráulica, sendo este processo pouco dependente do controle osmótico da planta.

Na figura 11A são apresentados os momentos de irrigação em que o potencial hídrico da folha no período de antemanhã ( $\psi_{fa}$ ) atinge -1,5 MPa para os três tipos de solos. Verifica-se que isso ocorreu primeiro para o solo LAd2 ocorrida a irrigação treze dias após o plantio. O CXbd1, atingiu o  $\psi_{fa}$  de -1,5 MPa no décimo sétimo dia após o plantio, sendo realizada a irrigação. Uma menor perda de água pelas plantas é vista entre o 13º e 17º dia, caracterizado por um desacoplamento da evapotranspiração das plantas em relação a  $ET_0$ . O mesmo acontece para o solo LVwf1 no período dos dias 18 a 21, sendo verificado maior perda de água em função de maior demanda atmosférica expressa pelos valores de  $ET_0$ .

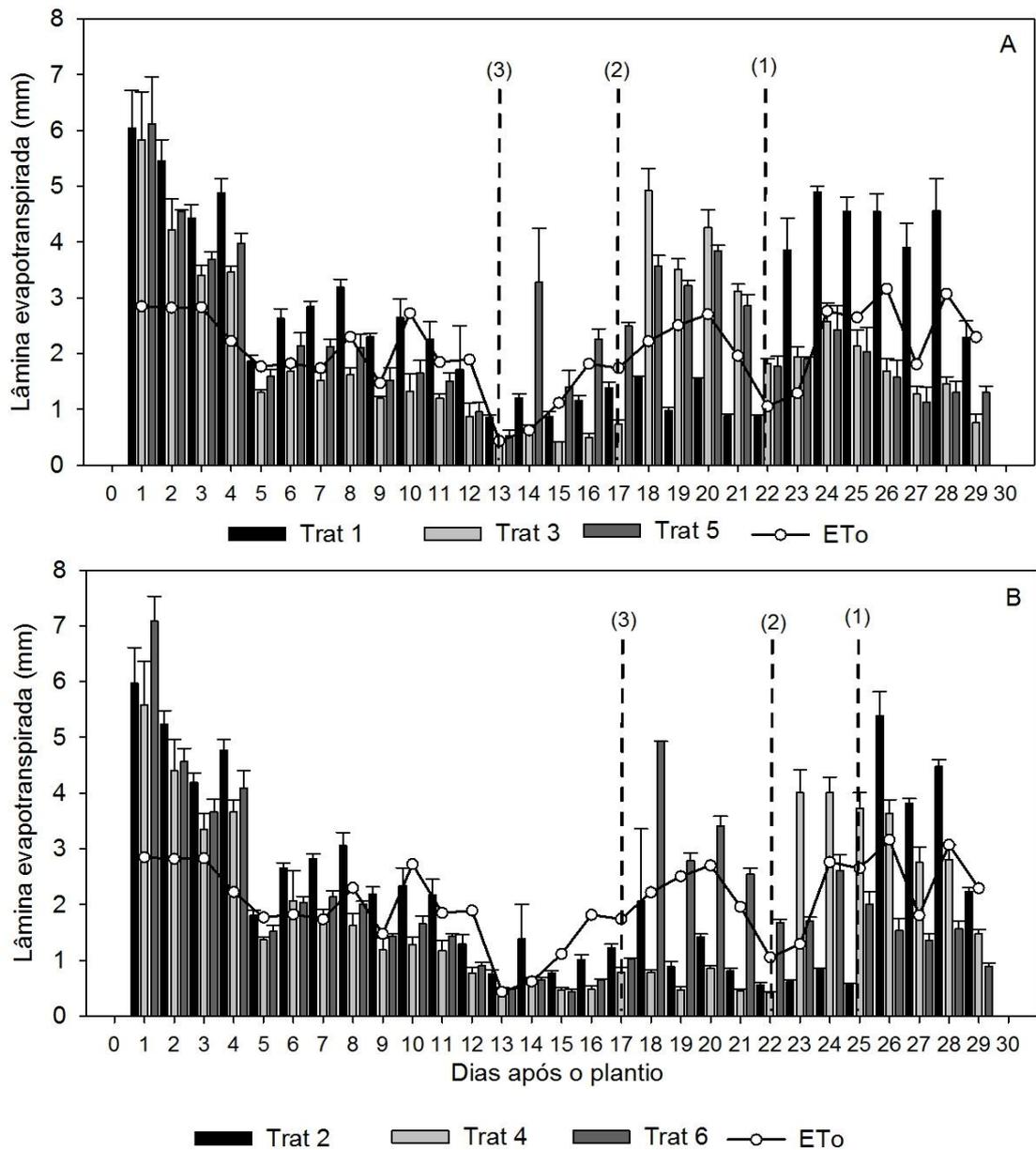


Figura 11 – Variação diária da lâmina evapotranspirada e ET<sub>0</sub> ao longo da terceira campanha para os diferentes tratamentos. Os tratamentos 1, 3 e 5 (A) referem-se as que receberam reposição de água quando o  $\psi_{fa}$  atingia -1,5 MPa para os solos LVwf1, CXbd1 e LAd2, respectivamente. Os tratamentos 2, 4 e 6 (B) receberam reposição de água quando o  $\psi_{fa}$  atingia -3,0 MPa para os solos LVwf1, CXbd1 e LAd2 respectivamente. As barras pontilhadas na vertical correspondem aos momentos de irrigação para cada tipo de solo: Solo LVwf1 (1), solo CXbd1 (2) e solo LAd2 (3).

Na figura 11B são apresentados os momentos de irrigação em que o potencial hídrico da folha no período de antemanhã ( $\psi_{fa}$ ) atinge -3,0 MPa para os três tipos de solos. Verifica-se que o solo LVwf1 manteve-se acoplado com a demanda atmosférica por mais tempo devido a sua maior capacidade de armazenamento de água. A irrigação foi realizada no dia 25 após o plantio. Os solos LAd2 e CXbd1 foram irrigados nos dias 17 e 22, respectivamente após o plantio, sendo explicado pela capacidade diferencial de armazenamento de água e pelo potencial de retenção de água (Figura 4).

A retenção de água no solo para o LVwf1 é maior que todos os outros, entretanto o conteúdo de água neste mesmo intervalo é menor. Tanto os tratamentos irrigados a -1,5 MPa como para os -3,0 MPa foram capazes de retornar a capacidade de evapotranspiração do início do experimento. Este comentário, todavia, deve ser interpretado com cuidado, uma vez que o processo de transferência para solos próximos a CC é governado principalmente pela demanda atmosférica, restando a contribuição reduzida da transferência via transpiração.

Na figura 12 A e B é apresentada a variação da lâmina acumulada durante a terceira campanha para os tratamentos com irrigação à  $\psi_{fa}$  igual a -1,5 MPa e -3,0 MPa respectivamente. Verifica-se que as campanhas anteriores realizadas no verão apresentaram demanda atmosférica que pode ser caracterizada por uma  $ET_0$  maior que a observada na terceira campanha, que foi realizada no período de inverno. A  $ET_0$  medida no verão teve médias diárias de 3,0 mm dia<sup>-1</sup>, e no inverno, médias de 2,1 mm dia<sup>-1</sup>.

Em geral, na maior parte do tempo e para os diferentes tratamentos, a evapotranspiração durante o inverno foi maior que a  $ET_0$ . De maneira inversa, observa-se (Figura 7) que os valores são menores que a  $ET_0$ . Isso pode ser explicado pelas irrigações realizadas. Para os  $\psi_{fa}$  de -1,5 MPa, isto é mais evidenciado, pois em geral o solo se manteve próximo a CC, sendo a evaporação do solo a principal componente da evapotranspiração. Nas campanhas de verão, as plantas em boa parte do tempo, tiveram expressiva contribuição na evapotranspiração pelo processo transpirativo.

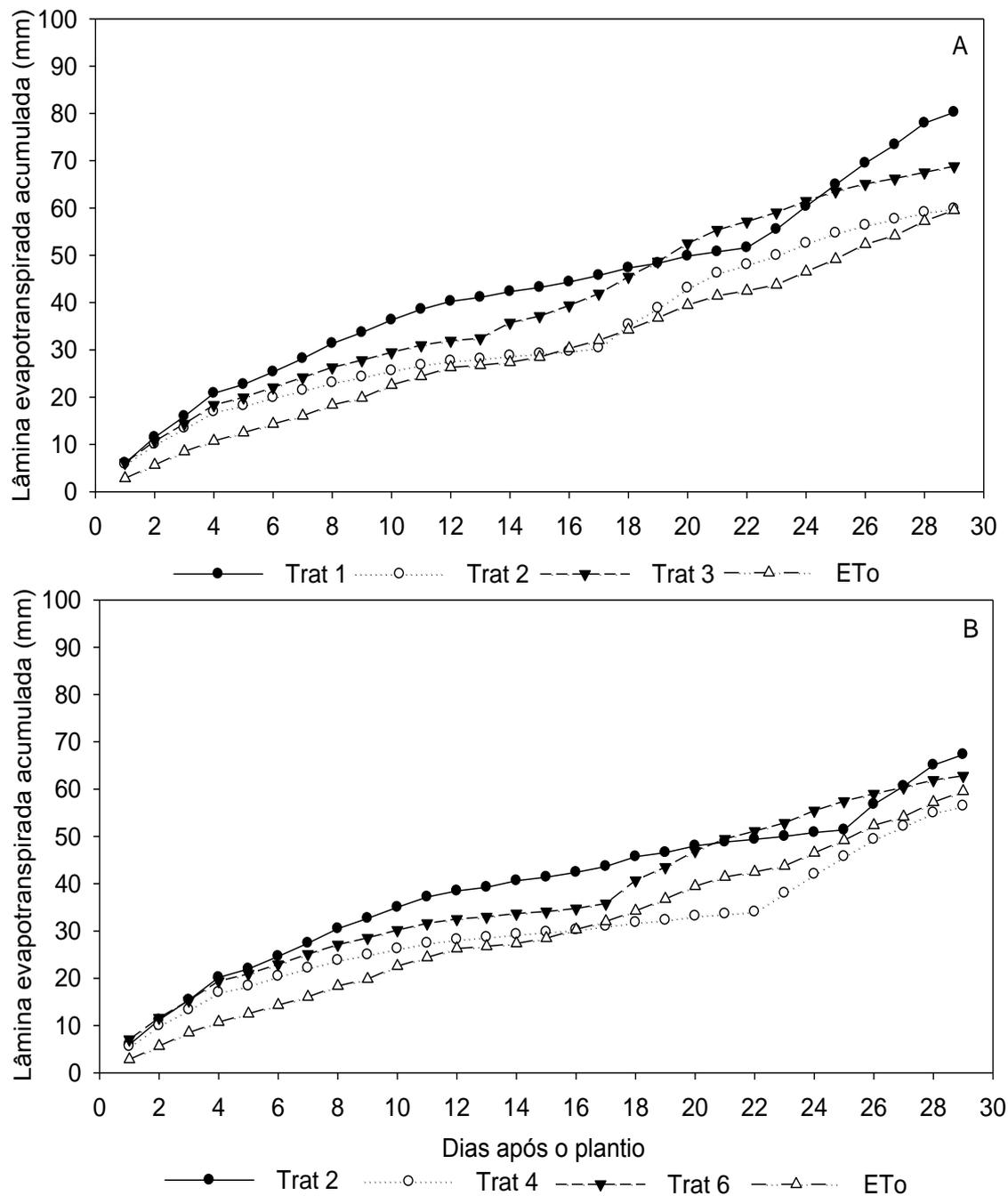


Figura 12 – Variação diária da lâmina evapotranspirada acumulada e  $ET_0$  ao longo da terceira campanha para os diferentes tratamentos. Os tratamentos 1, 3 e 5 (A) referem-se as que receberam reposição de água quando o  $\psi_{fa}$  atingia -1,5 MPa para os solos LVwf1, CXbd1 e LAd2 respectivamente. Os tratamentos 2, 4 e 6 (B) receberam reposição de água quando o  $\psi_{fa}$  atingia -3,0 MPa para os solos LVwf1, CXbd1 e LAd2.

Na figura 13 está apresentada a variação do  $\psi_{fa}$  para os diferentes tipos de tratamentos ao longo da campanha. Na figura 13A pode-se identificar o tempo necessário para que a umidade do solo reduza da CC até o PMP. No solo LAd2 este estado hídrico foi observado 13 dias após o plantio (32,5 mm), no solo CXbd1, à 17 dias (30,0 mm) e para o solo LVwf1, 22 dias (51,6 mm). Já para os demais tratamentos (Figura 13B), o estado hídrico referente à reposição de água foi observado 17 dias (35,8 mm) após o plantio para o solo LAd2; para o solo CXbd1, com 22 dias (34,0 mm); e para o solo LVwf1, com 25 dias (51,4 mm).

Quando se analisa a reposição do estado hídrico das plantas irrigadas no PMP e em  $\psi_{fa}$  de -3,0 MPa, verifica-se que para os tratamentos 1, 3 e 5 após a irrigação, as plantas para todos os solos reestabelecem seu estado hídrico do início da campanha (CC). Os demais tratamentos em que as plantas foram submetidas a um maior estresse hídrico ( $\psi_{fa} = -3,0$  MPa), foi observado a recuperação das plantas somente nos solos LVwf1 e CXbd1 a um potencial muito semelhante a CC. As plantas do solo LAd2 (Tratamento 6) apresentaram comprometimento fisiológico irreversível.

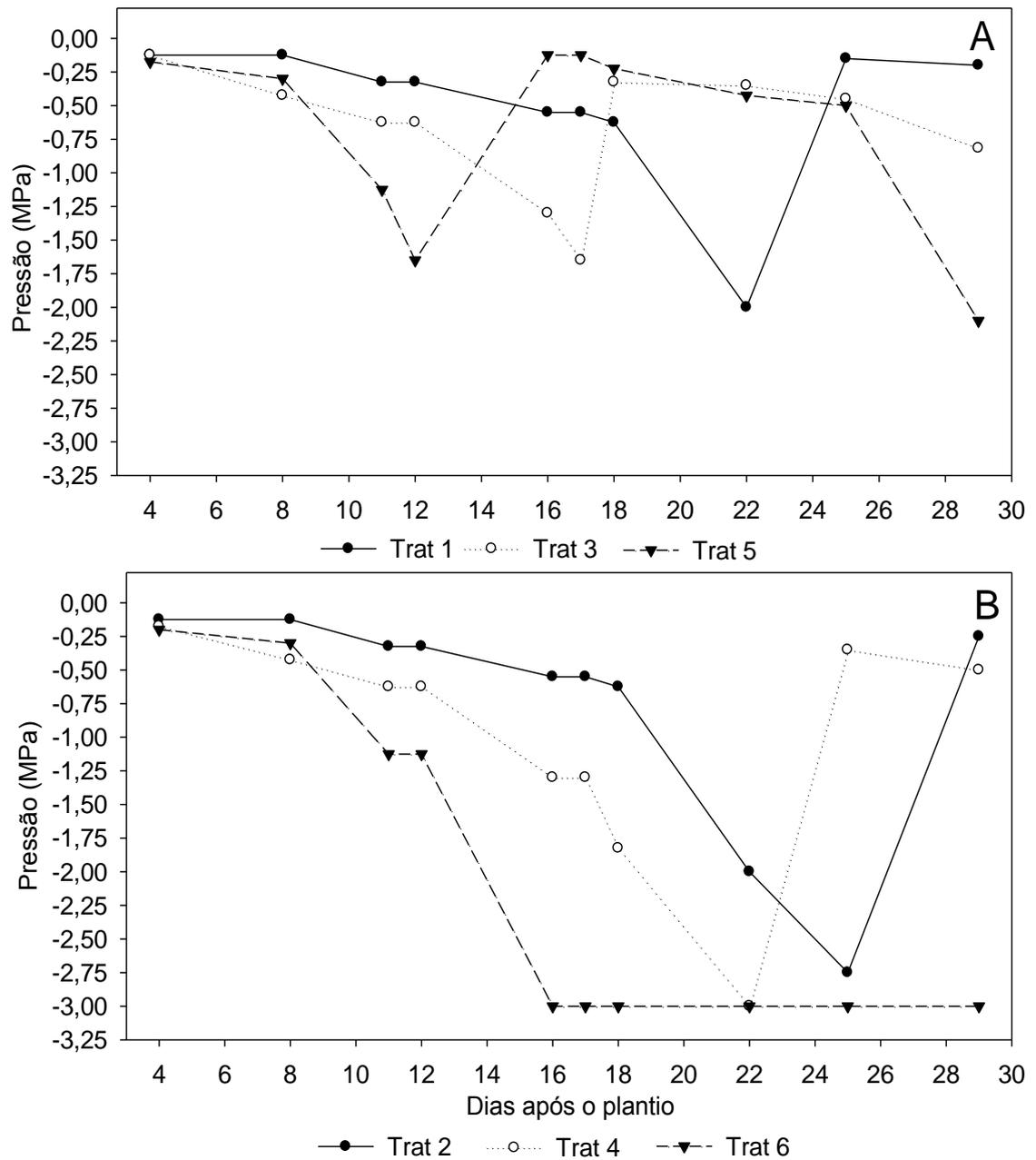


Figura 13 – Variação do potencial hídrico foliar ( $\psi_{fa}$ ) em MPa ao longo da terceira campanha para os diferentes tratamentos. Os tratamentos 1, 3 e 5 (A) referem-se as que receberam reposição de água quando o  $\psi_{fa}$  atingia -1,5 MPa para os solos LVwf1, CXbd1 e LAd2 respectivamente. Os tratamentos 2, 4 e 6 (B) receberam reposição de água quando o  $\psi_{fa}$  atingia -3,0 MPa para os solos LVwf1, CXbd1 e LAd2, respectivamente.

O comportamento do potencial hídrico no sistema solo-planta para os diferentes tratamentos é corroborado pelas medidas da condutância estomática, fotossíntese e transpiração (Figura 14 A e B).

O solo LVwf1 apresenta melhores respostas ecofisiológicas, com maiores valores de condutância estomática e, conseqüentemente, fotossíntese e transpiração. Após os momentos de irrigação, os tratamentos restabeleceram suas atividades com exceção do tratamento 6. Neste último tratamento a taxa fotossintética líquida cessa com valores nulos de absorção de fótons permanecendo neste estado após a irrigação.

A sobrevivência das plantas de eucalipto abaixo do ponto de murcha permanente pode ser explicada pela eficiência do seu ajuste osmótico. Em resposta a desidratação do tecido, ocasionado pelo déficit hídrico, esse ajuste osmótico é desenvolvido lentamente. As folhas que são capazes de realizar esse ajuste, podem permanecer com o turgor sob potenciais hídricos mais baixos, possibilitando a continuação do alongamento celular e facilitando a condutância estomática mais alta. Com isso, observa-se que esse ajuste osmótico seja devido a aclimatação com o aumento a tolerância à desidratação da planta (Taiz e Zeiger, 2004).

O tratamento com solo LVwf1 de reposição de água em potencial -1,5 MPa, diferenciou estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5,0% de significância com maiores médias acumuladas fotossintética ao longo de todo a campanha, obtendo valores em torno de  $7,98 \mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , seguido também do solo LVwf1 com reposição de água em potencial -3,0 MPa, com médias fotossintéticas aproximadas de  $6,66 \mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . No tratamento 6, referente ao LAd2, a reposição de água em potencial -3,0 MPa, apresentou menores médias fotossintéticas, com valores próximos a  $1,88 \mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

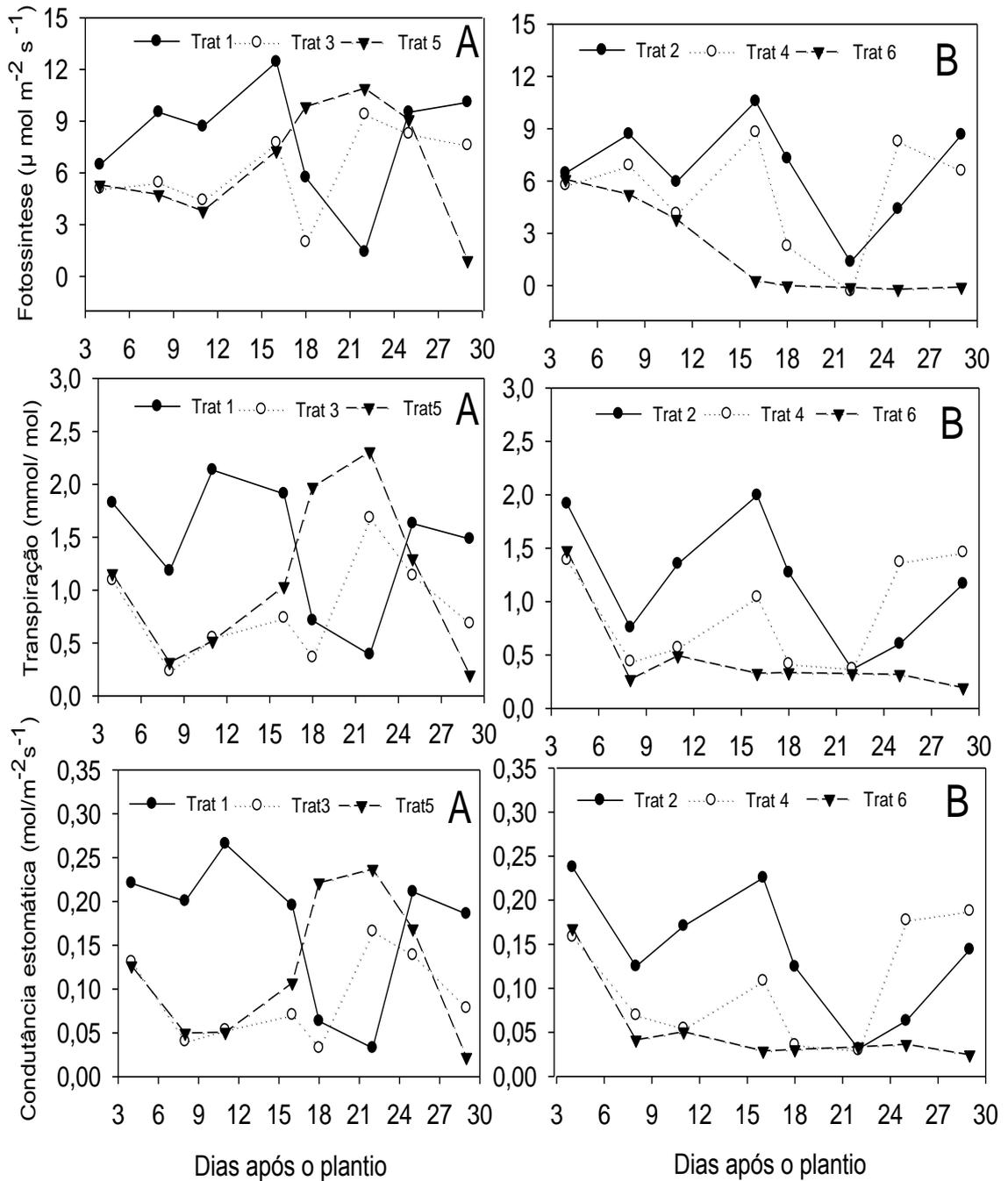


Figura 14 – Variação da fotossíntese, transpiração e condutância estomática ao longo da terceira campanha para os diferentes tratamentos. Os tratamentos 1, 3 e 5 (A) referem-se as que receberam reposição de água quando o  $\psi_{fa}$  atingia -1,5 MPa para os solos LVwf1, CXbd1 e LAd2 respectivamente. Os tratamentos 2, 4 e 6 (B) receberam reposição de água quando o  $\psi_{fa}$  atingia -3,0 MPa para os solos LVwf1, CXbd1 e LAd2.

Durante a perda de água no solo via evapotranspiração, em todas as campanhas e para os diferentes tipos de solos estudados, o PMP foi ultrapassado sem que fosse observado a perda de funções produtivas permanentes das plantas, chegando a alcançar valores de retenção da água no solo superiores a -3,5 MPa.

Metcalf et al. (1989) reporta valores de potenciais hídricos das folhas de eucalipto *globulus* de -3,9 ( $\pm 0,12$ ) MPa para tratamentos de plantas jovens de eucalipto em condições de campo.

Na figura 15A está apresentada a variação do índice de área foliar (IAF) ao longo da terceira campanha para os plantios irrigados quando o  $\psi_{fa}$  atinge -1,5 MPa. O solo LVwf1, diferenciou estatisticamente dos demais quando comparado pelo teste de médias (Tukey) a 5,0% de significância, obtendo a maior área foliar, sendo explicado pela maior taxa fotossintética (Figura 14 B). De maneira geral, como nas outras campanhas, o IAF não aumenta, tendo uma tendência a diminuir mesmo com o suprimento de água. Isso pode ser explicado pela participação da fotossíntese primária líquida ocorrer predominantemente para a raiz e caule em detrimento das folhas, comportamento também verificado nas outras campanhas.

Na figura 15B são mostrados os tratamentos que foram irrigados quando o  $\psi_{fa}$  atingisse -3,0 MPa. Observa-se também a tendência de redução do IAF ao longo dos dias após o plantio. Sendo essa redução observada em torno de 11,5%, 7,5% e 38,3% para os tratamentos 1, 3 e 5 respectivamente. Para os tratamentos 2, 4 e 6 obteve-se a redução do IAF respectivamente próximo de 16,1%, 14,1% e 33,5%.

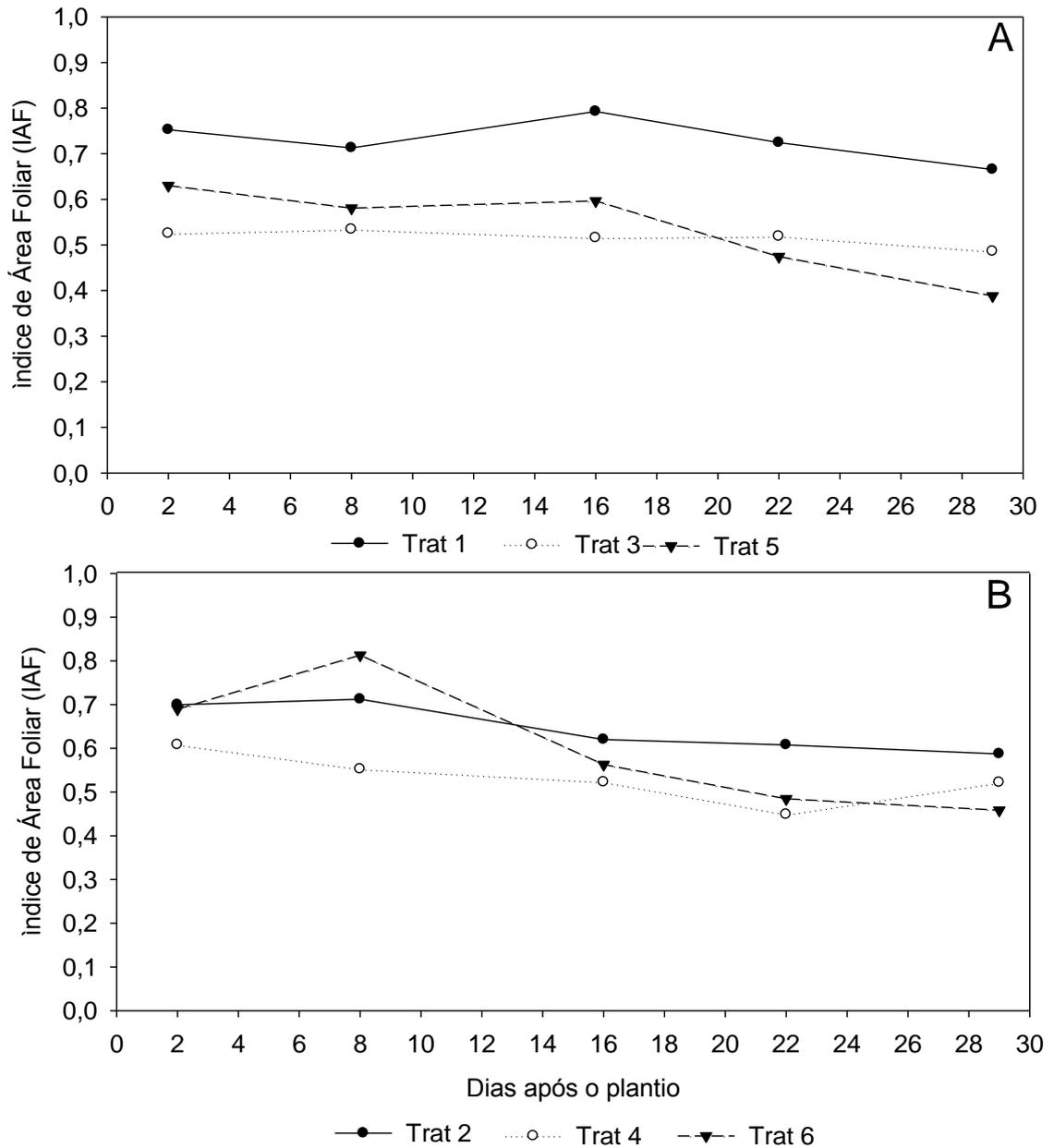


Figura 15 – Variação do índice de área foliar (IAF) ao longo da terceira campanha para os diferentes tratamentos. Os tratamentos 1, 3 e 5 (A) referem-se as que receberam reposição de água quando o  $\psi_{fa}$  atingia -1,5 MPa para os solos LVwf1, CXbd1 e LAd2 respectivamente. Os tratamentos 2, 4 e 6 (B) receberam reposição de água quando o  $\psi_{fa}$  atingia -3,0 MPa para os solos LVwf1, CXbd1 e LAd2, respectivamente.

## 4.4. Componentes da evapotranspiração segundo o modelo de Ritchie

### 4.4.1. Parametrização

Os valores de  $U$  nos diferentes tipos de solos estudados, determinado por meio do momento da inflexão da curva da lâmina acumulada, foram obtidos no quinto dia após o plantio para todos os solos, com valores observados de 13,6 mm, 14,2 mm e 13,6 mm referentes os tipos de solos LVwf1, CXbd1 e LAd2 respectivamente.

Rodrigues (2005) estudando a modelagem da evapotranspiração pelo método de Ritchie para a cultura da cevada encontrou valor de  $U$  igual a 13,6 mm quando analisado em um solo do tipo latossolo vermelho escuro.

Os valores de  $\alpha$  encontrado referente a fase 2 da evaporação do solo foi de 8,6 para os solos LVwf1, 6,1 para os CXbd1 e 6,8 para o LAd2, mostrando que para a segunda fase da evaporação no solo, os solos CXbd1 perderam água em uma taxa inferior aos demais solos.

Na figura 16 é apresentada a correlação da lâmina acumulada com a raiz quadrada do tempo ( $\alpha$ ) dado em dias à partir da mudança de fase 1 ( $U$ ).

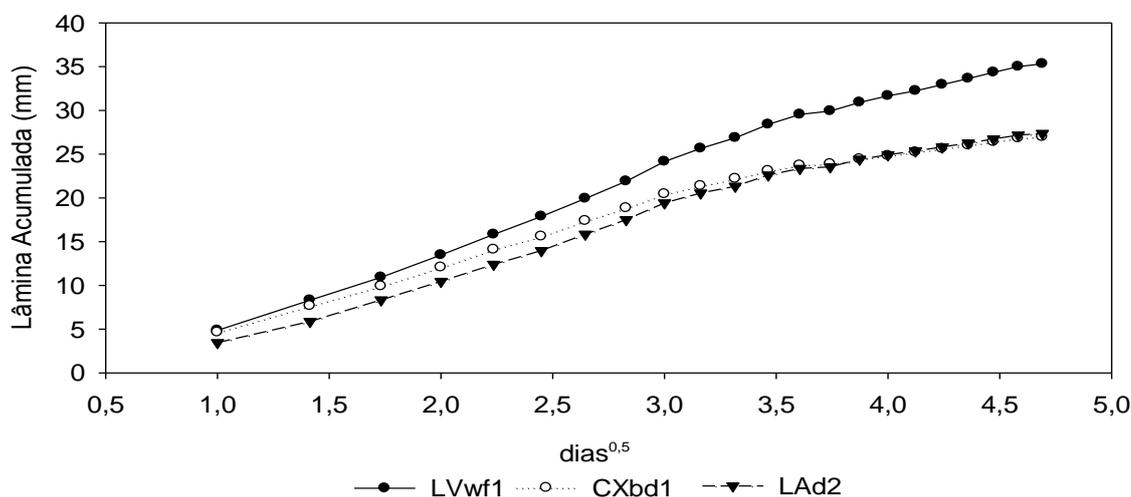


Figura 16 – Valores encontrados de  $\alpha$  correspondendo a inclinação da reta de regressão linear com a raiz quadrada do tempo em dias da lâmina acumulada para os diferentes solos estudados.

#### 4.4.2 Calibração

Na figura 17 está representada o comportamento da evapotranspiração pelo método de Ritchie relacionado com a evapotranspiração real, obtida através da determinação da lâmina evapotranspirada.

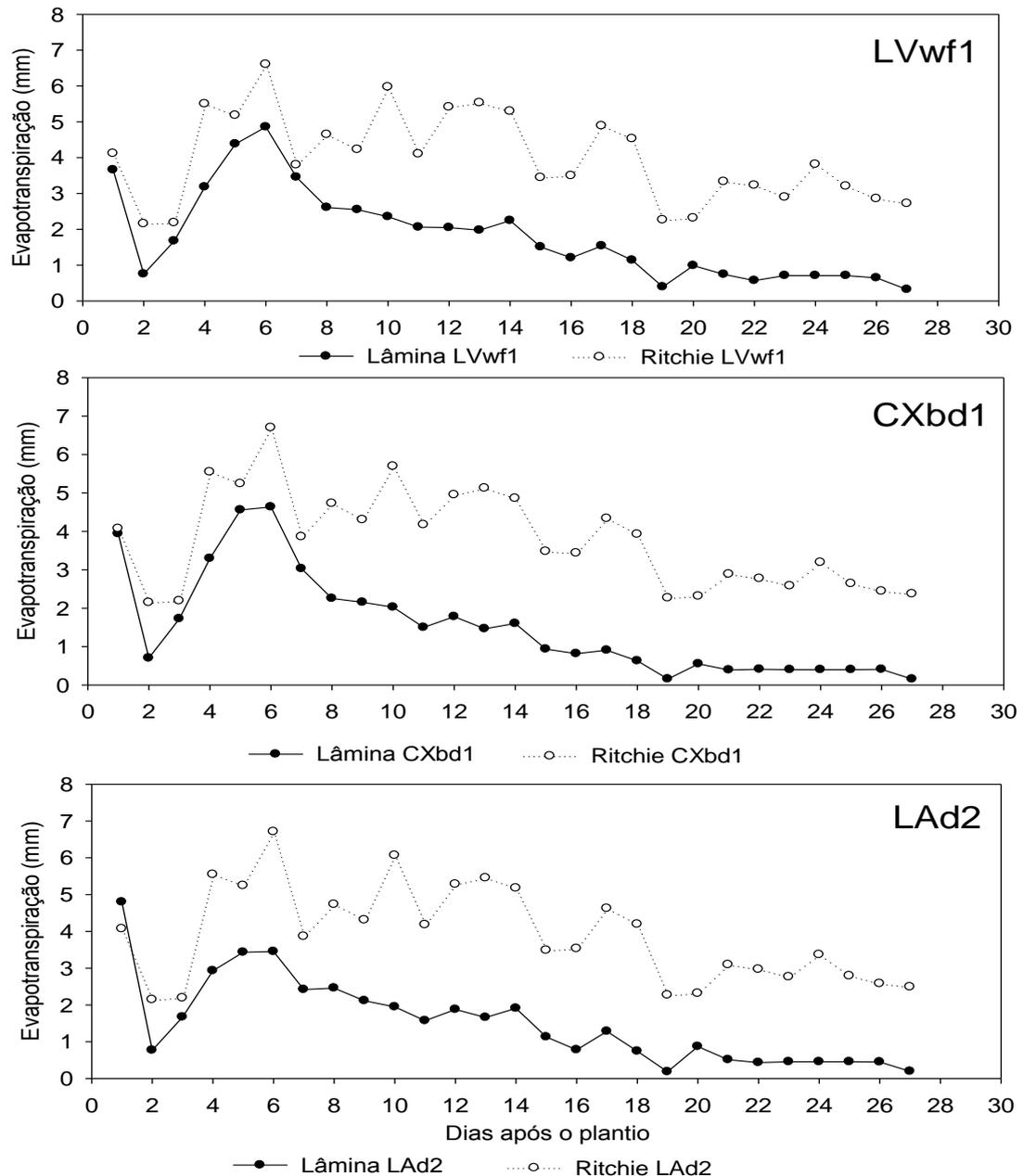


Figura 17 – Valores modelados de evapotranspiração (método de Ritchie) e observados (lâmina evapotranspirada) para os tipos de solos estudados.

Na figura 18 é apresentada a correlação entre a lâmina real evapotranspirada e a evapotranspiração pelo método de Ritchie, referente aos diferentes tipos de solos estudados.

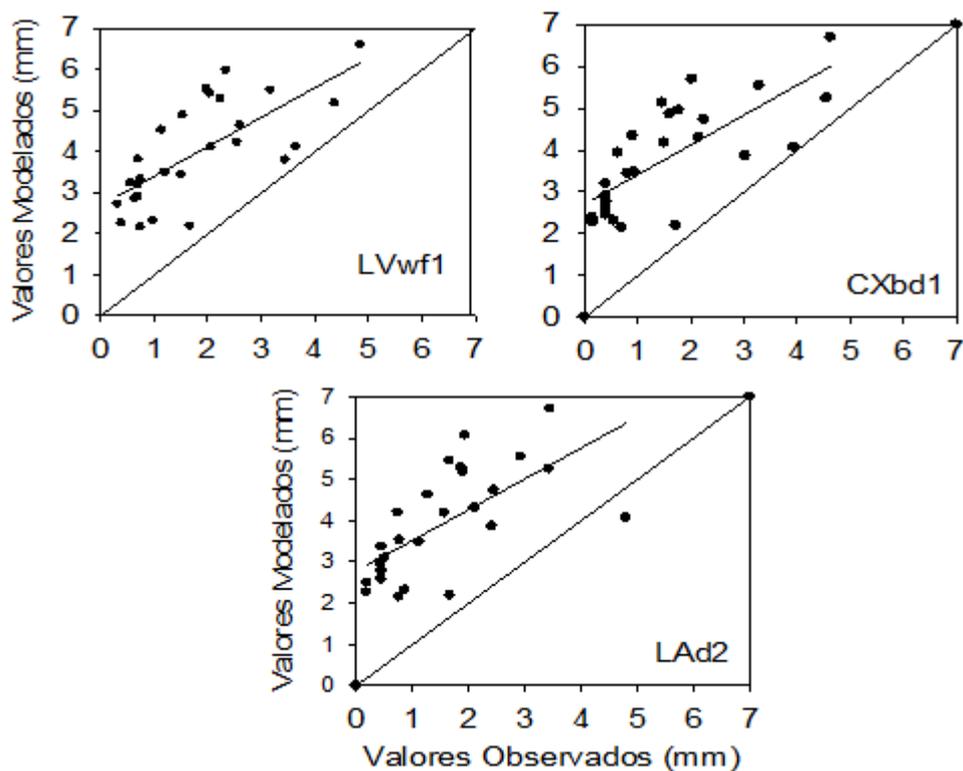


Figura 18 – Correlação entre os valores de evapotranspiração modelados (Ritchie) e observados (Lâmina) para os diferentes tipos de solos estudados, LVwf1, CXbd1 e LAd2 respectivamente.

Observa-se um deslocamento positivo da evapotranspiração em todos os solos, tendo a melhor correlação com a evapotranspiração real para o solo LAd2 ( $a = 0,74$ ), seguido do solo LVwf1 ( $a = 0,72$ ) e do solo CXbd1 ( $a = 0,71$ ). O coeficiente de Willmott encontrado para os três tipos de solos estudados, na qual foi comparado a lâmina real com o modelo de Ritchie, obteve-se um valor médio de 0,53.

A superestimação, em geral, do modelo foi observada também por Rodrigues et al. (1997) que utilizaram a cultura de feijoeiro para estudo, aspecto levantado por Ritchie (1972), em que afirma limitações no uso do método para culturas em condições de restrição hídrica.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Verifica-se maior volume de água retida entre o PMP e a CC no LVwf1 quando comparado aos demais (CXbd1 e LAd2). Isso garante melhor suprimento de água para as plantas nesse tipo de solo (LVwf1), comprovado pela sobrevivência das plantas por maior tempo em comparação aos demais solos. Observando a curva de retenção, verifica-se que o CXbd1 e o LAd2 apresentam volume de água retido muito parecido nas tensões próximas a CC. Pode-se estimar que estes dois tipos de solos se diferenciam com o dessecamento, de maneira que para uma mesma quantidade de água transpirada, se verifica uma demanda maior de energia por parte das mudas para o solo CXbd1. Este efeito não fica claro quando se estuda as lâminas evapotranspiradas, podendo ser então explicado pela diferença na capacidade de retenção apresentada por esses dois tipos de solos.

De maneira geral, todos os tratamentos com conteúdo de água próximo a CC apresentam evapotranspiração próximas a  $ET_0$  e a ECA, entretanto este último se aproxima mais dos valores absolutos observados dos minilímetros. A maior coincidência nas variações dos valores de  $ET_0$  e ECA com os valores de evapotranspiração das mudas de eucalipto no início das campanhas está relacionado a maior contribuição da evaporação do solo no processo. Diferentemente do  $ET_0$ , o ECA não apresenta controle estomático, apresentando nesta fase valores mais próximos aos observados nos minilímetros.

No experimento conduzido para verificar a capacidade das plantas em se recuperar do estresse induzido, foram realizadas irrigações para retornar o teor de água no solo para a capacidade de campo quando o potencial hídrico foliar de antemanhã atingisse -1,5 MPa e -3,0 MPa, de maneira geral, as mudas para os diferentes tipos de solos recuperaram à capacidade fotossintética e transpiratória. A única exceção foi para o solo LAd2 que não conseguiu retornar sua atividade fotossintética quando submetidas à déficit hídrico maiores que ( $\psi_{fa} = -1,5$  MPa).

Na variação da biomassa ao longo das campanhas, foi observado a redução o IAF para todos os solos, no entanto ocorreu aumento de massa de raízes, fazendo com que a planta após determinado déficit hídrico tente

recuperar a sua condição hídrica através do crescimento radicular para suprir a necessidade de água.

O modelo de Ritchie embora seja indicado para estimativa da lâmina evapotranspirada deste tipo de sistema, solo-planta, em que o dossel não se apresenta fechado e possibilita separar os componentes evaporação e transpiração das mudas, não apresentou boas estimativas, no entanto, se mostrou útil para estimar a  $ET_0$  quando os solos estudados apresentavam armazenamento de água próximo a CC, fase essa com maior reserva de água no solo. Os valores estimados sistematicamente superestimam as lâminas para todos os tipos de solos, podendo ser explicado pela limitação deste método quando empregado em sistema sob déficit hídrico acentuado.

O solo LAd2 apresentou maior correlação com o modelo de Ritchie ( $a=0,74$ ) quando comparado com os demais tipos de solos estudados.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF. *Anuário Estatístico da Associação Brasileira de Florestas Plantadas 2012*. Ano Base 2011. Brasília, 2012, 150 p. Disponível em: <[www.abraflor.org.br](http://www.abraflor.org.br)>. Acesso em: 25 de Outubro de 2012.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements**. Roma: FAO, 1998. 301 p.

ALVARENGA, R. C. BARROS, N. F., SOUZA DANTAS, C. E., LOBÃO, D. E. V. P. Efeitos do conteúdo de água no solo e da poda de raízes sobre o crescimento de mudas de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 18, n. 2, p. 107-114, 1994.

ANGELOCCI, L. R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera**: Introdução ao tratamento biofísico: Piracicaba - SP, 2002. 272p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. *Anuário Estatístico da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas 2012*, Ano Base 2011. Disponível em: <[www.abraflor.org.br](http://www.abraflor.org.br)>. Acesso em: 25 de Outubro de 2012.

BERGONCI J. I. et al. Potencial da água na folha como um indicador de déficit hídrico em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 8, p. 1531- 1540, ago. 2000.

BIZI, R. M.; GRIGOLETTI JUNIOR, A.; AUER, C. G.; MAY-DE MIO, L. L. Produtos alternativos no controle do oídio em mudas de eucalipto. **Summa phytopathol.** [online], v.34, n.2, p.144-148, 2008.

BUZETTO, F.A.; BIZON, J. M. C.; SEIXAS, F. Avaliação de polímero absorvente à base de acrílica no fornecimento de água para mudas de *Eucalyptus urophylla* em pós-plantio. Piracicaba, IPEF. 8p. (Circular técnica, 192), 2002.

CHAVES, J.H.; REIS, G.G.; R, M.G.F. *et al.* Early selection of eucalypt clones to be planted in environments with varying soil water availability: water relations of plants in 16 small size plastic tubes. **Revista Árvore**, Viçosa, v.28, n.3, p.333-341, 2004.

CHAVES, M. M. Effects of water deficits on carbon assimilation. **Journal of Experimental Botany**, v. 42. p. 1-16. 1991.

EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro, EMBRAPA/CNPS, 2 ed, 1997.212 p.

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do SISVAR para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DE REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos, SP. Anais... São Carlos: UFSCar, 2000. p. 255-258.

FIGUEIREDO, F. A. M. M de. A.; CARNEIRO, J. G de. A.; PENCHEL, R. M.; BARROSO, D. G.; DAHER, R. F. Efeito das variações biométricas de mudas clonais de eucalipto sobre o crescimento no campo. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n.1, p.01-11, 2011.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas**: o estudo do que está por traz do que se vê. 4. ed. rev. Passo Fundo: Editora da Universidade de Passo Fundo, 2008. 733 p.

GOMES, J.M.; PAIVA, H.N.; COUTO, L. Produção de mudas de eucalipto. In: **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.18, n.185, p.15 - 22, 1996.

GONÇALVES, M. R., PASSOS, C. A. M. Crescimento de cinco espécies de eucalipto submetidas a déficit hídrico em dois níveis de fósforo, **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 10. n. 2.p. 145-161, 2000.

GONZÁLES, A. P.; ALVES, M. C. Armazenamento de água e densidade do solo sob três condições de superfície, em um Cambissolo gleico de Lugo, Espanha. **Revista Brasileira de engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n. 1, p, 45-50, 2005.

GOUDRIAN, J.; VAN LAAR, H. H. **Modelling Potential Crop Growth Processes. Textbook with Exercises.** Kluwer Academic Publishers. Production ecology. Volume 2. 1994.

GROSSNICKLE, S. C Importance of root growth in overcoming planting stress. **New Forests**, n.30, p. 273-294, 2005.

JONES, C. A.; KINIRY, J. R. **CERES-Maize:** Simulation model of maize growth and development. College Station: Texas A M University Press, 1986.

KAISER, W. M. Effects of Water deficit on photosynthetic capacity. **Physiologia Plantarum**, v. 71. p. 142-149, 1987.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal.** Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2009. 452 p.

KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water relations of plants and soils.** San Diego: Academic Press. 1995. 495 p.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal.** São Carlos: Rima, 2004. 531 p.

LIMA, W. P. **Impacto Ambiental do Eucalipto.** São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1996.

METCALFE, J.C., DAVIES, W.J. PEREIRA, J. S. **Leaf growth of *Eucalyptus globulus* seedlings under water deficit.** Tree Physiology. 6: 221– 227. 1990.

MATERÁN, F. J. V.; OLIVEIRA, R. A.; SEDIYAMA, G. C. Minilímetro com lençol freático constante operando com Irrigâmetro® para medida da evapotranspiração de referência. Revista UDO Agrícola 9 (1): 243 – 258. 2009.

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A Cultura do Eucalipto no Brasil – Eucalypt Cultivation in Brazil.** Sociedade Brasileira de Silvicultura. São Paulo. 2000. 112p.

PASSOS, L. P. **Métodos analíticos e laboratoriais em fisiologia vegetal.** Coronel Pacheco: EMBRAPA-CNPGL, 1996. 223p.

PEAK. D. et al. Evidence for complex, collective dynamics and emergent, distributed computation in plants. **PNAS**, v. 101, N. 4, p. 918-922, 2004.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1996. 183 p.

PEREIRA, M. R. R. **Comportamento fisiológico e morfológico de clones de *Eucalyptus* sp. w. (hill ex. maiden) submetidos a diferentes níveis de água no solo.** 2006. 69p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu – SP.

PHILIP, J. C. Evaporation, and moisture and heat fields in the soil. **Journal of Meteorology**, Washington, DC, v. 14, p. 354-366, 1957.

PIMENTEL, C. **A relação da planta com a água.** Seropédica: Edur, 2004. 191p.

REICHARDT, K. **Processo de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. Campinas: Fundação Cargil, 1985. 466 p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478p.

REIS, G. G; REIS, M. G. F. Fisiologia da brotação de eucalipto com ênfase nas suas relações hídricas. **IPEF**, v. 11, n. 30, p. 9-22, 1997.

RIBEIRO, A.; PAIVA, Y. G.; EVANGELISTA, R. C.; ALMEIDA, A. Q.; OLIVEIRA, A. S.; OLIVEIRA, R. A.; HAMAKAWA, P. J.; SILVA, M. P. **Eucalipto**. In: MONTEIRO, J.E.B.A. (Org.). Agrometeorologia dos Cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. 1. ed. Brasília, DF: INMET, 2009. p.407-424.

RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with an incomplete cover. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 8, n. 5, p. 1204-1213, 1972.

RODRIGUES, L. N.; AZEVEDO, J. A.; SOCCOL, O. J.; SILVA, E. M. **Modelo de Ritchie: descrição e aplicação**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005. 29p.

RODRIGUES, L. N.; MANTOVANI, E.C.; RAMOS, M.M.; SEDIYAMA, G.C. O modelo de Ritchie na determinação da evapotranspiração do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 44, p.191-204, 1997.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SCHOLANDER, P. F.; HAMMEL, E. D.; HEMMINGSEN, E. A. Sap pressure in vascular plant. *Science*, v. 148, p. 339-346, 1965.

SILVA, W.; FERREIRA, L. R.; SILVA, A. A.; FIRMINO, L. E. Taxa transpiratória de mudas de eucalipto em resposta a níveis de água no solo e à convivência com braquiária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 5, p. 923-928, 2000.

SMIRNOFF N. Antioxidant systems and plant response to the environment. In: SMIRNOFF N. (Ed.). **Environment and plant metabolism: flexibility and acclimation**. Oxford: BIOS Scientific Publishers, 1995. p. 217–243.

SOUZA, G. M. et al. Functional Groups of Forest Succession as Dissipate Structures: an applied study. **Brazilian Journal of Biology**, v. 64. p. 707-718, 2004.

STATYER, R. O.; MCILROY, I. G. **Practical micro-climatology with special reference to water in soil-plant-atmospheric relationships**. Australia: CSIRO, 1961. P. 1-296.

TAGLIAFERRE, Cristiano et al. **Influência da Presença da bordadura e dos níveis de Água na evaporação obtida nos minievaporímetros**. *Rev.Ceres (Impr.)* [online]. 2011, vol.58, n.2, pp 161-167. ISSN 0034-737X.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Piracicaba: Ed. Artmed, 3. ed., 2004. 719p.

THOMAS, D. S Hydrogel applied to the root plug of subtropical eucalypt seedlings halves transplant death following planting. **Forest Ecology and Management**, n.255, p. 1305-1314, 2008.

VIANELLO, R. L; ALVES, A. R. Meteorologia básica e aplicações. 2 ed. Ver. Ampl. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2012. 1991. 449 p.

WILLIAMS, J.; WOINARSKI, J. **Eucalypt Ecology: Individuals to Ecosystems**. Cambridge University Press. 1997. 430p.

WINTER, B.; VIPOND, S. **Irrigação projeto e prática**. São Paulo: EPU, 1977. 339 p.

XAVIER, T. M. T. **Efeito da restrição hídrica no crescimento de mudas de Eucalipto**. 2010. 80f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Programa de Pós Graduação em Produção Vegetal. Universidade Federal do Espírito Santo, 2010.

## 7. ANEXO

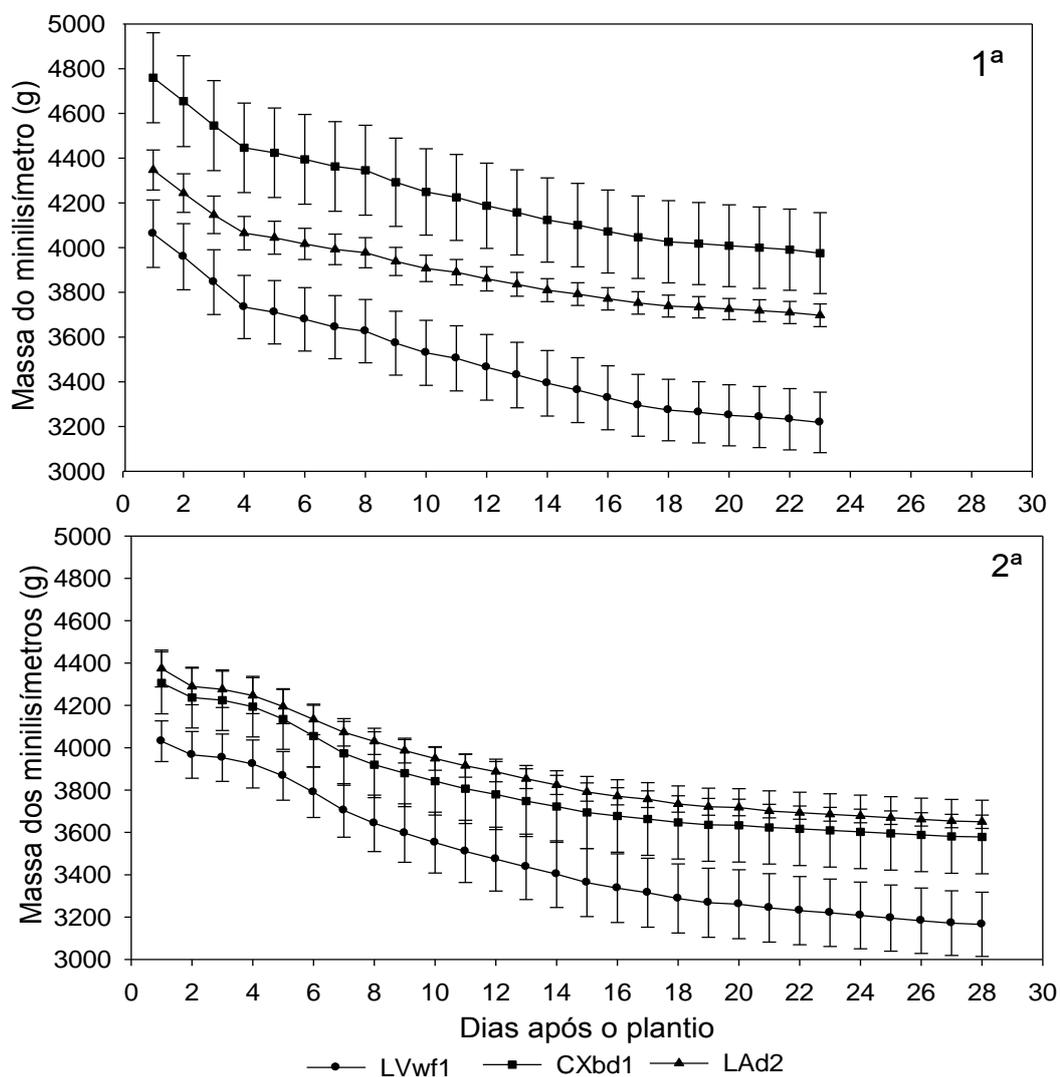


Figura 19 – Variação diária das massas dos minilímetros em (g) após o transplante e seus respectivos desvios padrões para cada tipo de solo compreendendo as 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> campanhas realizadas nos períodos de 22/11/2012 à 14/12/2012 e 28/02/2013 à 27/03/2013, respectivamente.

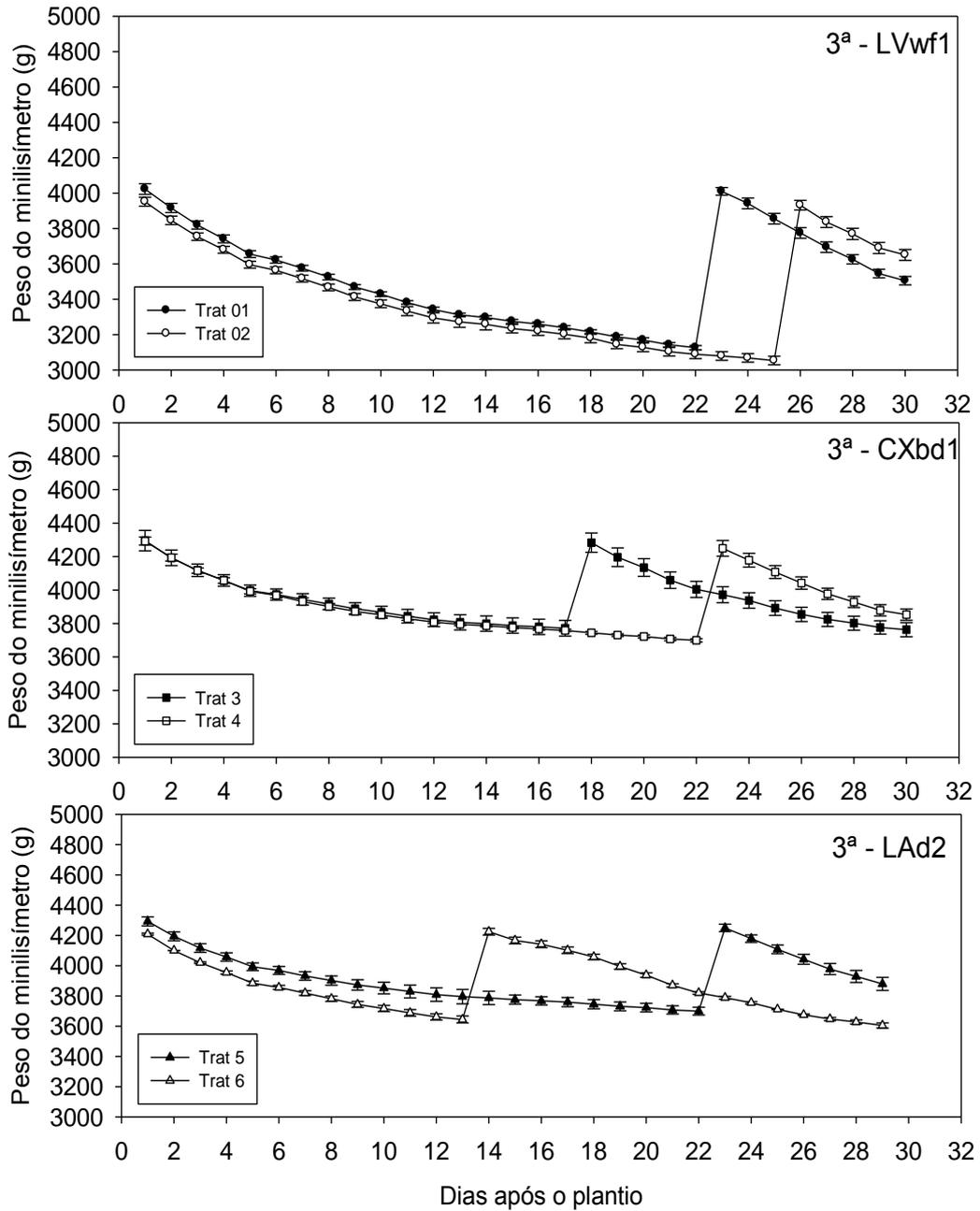


Figura 20 – Variação diária das massas dos minilímetros em (g) após o transplante e desvios padrões ao longo da terceira campanha para os diferentes tratamentos. Os tratamentos 1, 3 e 5 (A) referem-se as que receberam reposição de água quando o  $\psi_{fa}$  atingia -1,5 MPa para os solos LVwf1, CXbd1 e LAd2 respectivamente. Os tratamentos 2, 4 e 6 (B) receberam reposição de água quando o  $\psi_{fa}$  atingia -3,0 MPa para os solos LVwf1, CXbd1 e LAd2.