

MARIA EMÍLIA BORGES ALVES

**DISPONIBILIDADE E DEMANDA HÍDRICA
NA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO EUCALIPTO**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

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

T

A474d
2009

Alves, Maria Emília Borges, 1970-

Disponibilidade e demanda hídrica na produtividade da cultura do eucalipto / Maria Emília Borges Alves. – Viçosa, MG, 2009.

xvii, 136f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui anexos.

Orientador: Everardo Chartuni Mantovani.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Meteorologia agrícola. 2. Eucalipto - Relações hídricas.
3. Evapotranspiração. 4. Irrigação - Manejo. 5. Polímeros.
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.


CDD 22.ed. 630.2515

MARIA EMÍLIA BORGES ALVES

**DISPONIBILIDADE E DEMANDA HÍDRICA NA PRODUTIVIDADE DA
CULTURA DO EUCALIPTO**

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

APROVADA: 18 de dezembro de 2009.



Gilberto Chohaku Sediyama
(Coorientador)



Júlio César Lima Neves
(Coorientador)



Luis César Dias Drumond



André Luis Teixeira Fernandes



Everardo Chartuni Mantovani
(Orientador)

Ao Senhor Deus, luz e guia;
ao meu amado pai, Vicente Alves Vilaça;
à minha mãe Maria Célia Borges Vilaça (*in memoriam*),
presença constante em minha vida;
e aos meus irmãos e irmãs, Giovanni, Celso, Aldo, Maria Cristina, Lílian e Victor.

OFEREÇO

Aos meus sobrinhos e sobrinhas, amores da minha vida.

DEDICO

“Só se vê bem com o coração. O essencial é invisível aos olhos.”

Antoine de Saint-Exupéry

AGRADECIMENTOS

A Deus por me iluminar, me dar saúde, discernimento, perseverança e força para seguir o meu caminho.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia Agrícola e ao Programa de Pós Graduação em Meteorologia Agrícola e seus professores, pela oportunidade de realizar o curso e contribuírem para a minha formação.

À Fundação de Apoio a Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao meu orientador, professor Everardo Chartuni Mantovani, pela confiança, pela amizade, pelas oportunidades, pelo exemplo de pessoa e pelo dinamismo.

Ao professor Gilberto Chohaku Sedyama, por sua valiosa contribuição para esta tese e por todos os ensinamentos dados ao longo curso, o respeito e a amizade.

Ao professor Júlio César Lima Neves, por sua disponibilidade, sugestões, paciência, por ceder os dados necessários à realização de parte deste trabalho e ter contribuído para que eu conhecesse melhor a cultura do eucalipto. E aos

seus orientados Helton Maycon Lourenço e Jarbas Silva Borges, por compartilharem comigo os dados oriundos de seus trabalhos e pelo auxílio fundamental para a realização desta tese.

À Empresa ArcelorMittal-Florestas, que possibilitou a realização de parte deste trabalho, contribuindo financeiramente e permitindo toda uma vivência quanto ao processo produtivo da cultura do eucalipto, que foi determinante para a compreensão e análise dos resultados obtidos.

À Empresa Hydroplan-EB (Empresa de Base e Distribuidora Ltda.), por financiar parte deste trabalho.

À Empresa Celulose Nipo Brasileira – CENIBRA, por ceder os dados necessários à realização de parte deste trabalho.

À Associação das Siderúrgicas para Fomento Florestal – ASIFLOR e à Sociedade de Investigações Florestais – SIF, na pessoa de João Câncio que contribuiu com idéias e viabilização dos projetos que financiaram este trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, sempre solícitos.

Ao meu amado pai, Vicente Alves Vilaça, meu exemplo de vida, aos meus queridos irmãos e irmãs, cunhados e cunhadas, à Victória, meus sobrinhos e sobrinhas, esta família que sempre me apoiou nas minhas escolhas, todo meu amor.

A toda família Avelar Borges, descendentes do Vovô Tonho (*in memoriam*) e Vovó Maria Emília (*in memoriam*), pela união e amizade eternas, pelos abraços que revigoram e momentos de muita alegria, até quando é triste.

À família Vilaça, que imprimiu em mim e em todos que descendem do Vovô Bertulino (*in memoriam*) e da Vó (Vovó Maria das Dores - *in memoriam*) o espírito de luta.

Às minhas amigas-irmãs de república, Paula e Dani, que me acompanharam durante este período, apoiando, dividindo e somando nossas lutas, dando boas risadas e chorando, e àquelas que chegam e passam por

nossa casa, compartilhando sempre da amizade e cumplicidade, Fátima, Cássia, Hewlley e Ísis. À amiga Olga, pelo constante bom humor.

Aos meus queridos amigos Marcelo Cid, por tudo, José Luiz (grande Zezão!), Evandro Chaves e Sabrina, Fabiano Palaretti, Michelly, Rochane, Ranieri, Christiane, Evaldo, Flávio Justino, Kelly Portugal, Graça e todos os demais amigos da Meteorologia Agrícola.

Aos colegas do GESAI – Grupo de Estudos e Soluções para a Agricultura Irrigada.

Aos estagiários e amigos, Bruno Ribas Batalha, Eduardo Moreira Costa e David Raskin Casquero, que me ajudaram no trabalho braçal.

À minha amiga, Adriane De Filippo (amiga-irmã desde os tempos da graduação) e sua família, por me acolherem e serem minha família em Viçosa.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a minha formação, profissional e pessoal, amigos antigos e amigos recentes, que me incentivam e reforçam a minha crença em mim mesma.

À minha querida mãe, que nos deixou tão cedo, mas que é presença constante em minha vida, que me orienta e não me deixa fraquejar ante as dificuldades, lembrando-me que devo ter dignidade, humildade e seguir adiante, sempre.

BIOGRAFIA

MARIA EMÍLIA BORGES ALVES, filha de Vicente Alves Vilaça e Maria Célia Borges Vilaça, nasceu em 17 de outubro de 1970, em Belo Horizonte, MG.

Concluiu o curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, MG, em dezembro de 1996, e, nesta mesma instituição, concluiu o mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração Irrigação e Drenagem, em 12 de novembro de 1999.

Entre os anos 2000 e 2004 atuou na área de Irrigação, desenvolvendo projetos de irrigação localizada para grandes culturas na Empresa Netafim Brasil, em Ribeirão Preto, SP, e, posteriormente, elaborando e implantando projetos de irrigação em áreas de paisagismo na Empresa Irricom - Irrigação e Comércio Ltda., em Belo Horizonte, MG.

Concluiu especialização em Meio Ambiente e Gestão de Recursos Hídricos, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, em Belo Horizonte, MG, em agosto de 2004.

Em novembro de 2004, tornou-se bolsista de EMBRAPA Café, participando de projetos na área de cafeicultura irrigada, supervisionados pelo professor Everardo Chartuni Mantovani, na Universidade Federal de Viçosa

(UFV), Viçosa, MG, até agosto de 2005, quando ingressou no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, em nível de doutorado, no Departamento de Engenharia Agrícola da UFRV, submetendo-se a defesa de tese em dezembro de 2009.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	xii
ABSTRACT	xv
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS	7
CAPÍTULO 1 – USO DE POLÍMEROS HIDRORETENTORES EM MUDAS DE EUCALIPTO E SUA RELAÇÃO COM A EVAPOTRANSPIRAÇÃO E CRESCIMENTO DA PLANTA	10
1. INTRODUÇÃO	10
2. MATERIAL E MÉTODOS	15
2.1. Primeira etapa: plantio em casa de vegetação	15
2.2. Segunda fase: plantio em campo aberto	20
2.3. Análise dos dados	22
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23

	Página
3.1. Primeira etapa: plantio em casa de vegetação	23
3.2. Segunda fase: plantio em campo aberto	34
4. CONCLUSÕES	42
5. REFERÊNCIAS	43
 CAPÍTULO 2 – ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE CULTURA DO EUCALIPTO CULTIVADO SOB IRRIGAÇÃO NA REGIÃO DO RIO DOCE, MG	47
1. INTRODUÇÃO	47
2. MATERIAL E MÉTODOS	56
2.1. Área experimental	56
2.2. Estimativa do coeficiente de cultura dual (<i>K_c dual</i>)	59
2.2.1. Estimativa do coeficiente basal de cultura (<i>K_{cb}</i>)	59
2.2.2. Estimativa do coeficiente de evaporação do solo (<i>K_e</i>)	63
2.2.3. Determinação do coeficiente de cultura (<i>K_c</i>)	67
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4. CONCLUSÕES	76
5. REFERÊNCIAS	77
 CAPÍTULO 3 – SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO EUCALIPTO SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA	83
1. INTRODUÇÃO	83
2. MATERIAL E MÉTODOS	93
2.1. Dados observados	93

	Página
2.1.1. Características da área experimental	94
2.1.2. Variáveis medidas	99
2.2. Simulação das necessidades hídricas da cultura	99
2.3. Estimativa da produtividade da cultura	102
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	105
3.1. Dados observados	105
3.1.1. Caracterização climática	105
3.1.2. Biomassa da parte aérea	107
3.2. Simulação das necessidades hídricas	109
3.3. Estimativa da produtividade da cultura	114
4. CONCLUSÕES	127
5. REFERÊNCIAS	128
ANEXO	134

RESUMO

ALVES, Maria Emília Borges, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2009. **Disponibilidade e demanda hídrica na produtividade da cultura do eucalipto.** Orientador: Everardo Chartuni Mantovani. Coorientadores: Gilberto Chohaku Sedyama e Júlio César Lima Neves.

O setor de florestas plantadas no Brasil desempenha um papel fundamental no cenário sócio-econômico do país, ao contribuir com a produção de bens e serviços, agregação de valor aos produtos florestais e para a geração de empregos, divisas, tributos e renda. Estabelecer relações entre consumo de água pela cultura do eucalipto e a disponibilidade de água no solo pode contribuir na predição do potencial produtivo dos plantios florestais, tendo em vista que as distintas condições climáticas, às quais a cultura está exposta nas diversas regiões em que é feito seu cultivo, influenciam na sua produtividade e duração do ciclo. Dentro deste contexto, a realização de simulações a fim de avaliar o efeito de maiores suprimentos de água sobre as produtividades obtidas nestas condições pode gerar informações importantes para o manejo da cultura do eucalipto. Porém, são poucas as informações existentes sobre as necessidades hídricas da cultura do eucalipto, necessitando de investigações

quanto a esta demanda. Destaca-se, quanto ao uso da irrigação em florestas plantadas, o suprimento de água para a cultura do eucalipto na fase de plantio e a associação de polímeros hidroretentores (hidrogel) a esta irrigação, com o intuito de elevar a retenção de água e, desta forma, reduzir o número de irrigações e os volumes aplicados, sendo este recurso amplamente utilizado por empresas plantadoras de eucalipto. Em decorrência dos aspectos abordados, o presente estudo teve os seguintes objetivos: estudar as relações entre a cultura do eucalipto e o suprimento de água, avaliar o uso de hidrogel no plantio do eucalipto, estimar as necessidades hídricas da cultura do eucalipto com base na estimativa do coeficiente de cultura (K_c) do eucalipto e estabelecer uma relação entre a produtividade do eucalipto e o suprimento de água por meios de simulações. Desta forma, uma primeira experimentação buscou associar diferentes doses de hidrogel à evapotranspiração da cultura, sob dois diferentes tipos de solo e duas frequências de irrigação. Neste estudo, concluiu-se que o uso de hidrogel teve efeito positivo sobre a sobrevivência e crescimento das mudas de eucalipto em pós-plantio. A redução da evaporação pela adição do hidrogel disponibiliza um maior volume de água às plantas, reduzindo a mortalidade das mesmas. Foram observados benefícios sob as duas condições estudadas, plantio em casa de vegetação e plantio fora da casa de vegetação. Porém, ainda é prematuro o estabelecimento de valores ideais para a utilização do hidrogel. A segunda parte deste trabalho foi estimar o coeficiente de cultura (K_c) do eucalipto utilizando a metodologia do coeficiente dual de cultura (K_c *dual*), proposta por Allen et al. (1998). Esta estimativa se baseou em dados observados de clima e de altura da cultura, de um experimento conduzido na região do Rio Doce, MG, considerando até 1,5 ano após o plantio, as fases inicial e média de desenvolvimento da cultura. Assim, os valores médios para os coeficientes de cultura estimados são de 0,57; 0,13 e 0,70 para K_e (coeficiente de evaporação da água do solo), K_{cb} (coeficiente basal da cultura) e K_c (coeficiente de cultura único), respectivamente, na fase inicial de

desenvolvimento e de 0,01; 0,81 e 0,82 para K_e , K_{cb} e K_c respectivamente, na fase de média de desenvolvimento da cultura. Os valores estimados não devem ser considerados valores definitivos, pois as estimativas não substituem os valores medidos em campo. Na terceira e última parte, estabeleceu-se uma estimativa a produtividade da cultura do eucalipto sob diversas condições de suprimento de água, tendo como referência os dados observados em experimento conduzido na região do Rio Doce, MG, durante um ciclo completo da cultura do eucalipto, entre os anos de 2001 e 2008. Utilizou-se o ‘software’ IRRIPLUS para se simular a lâmina de irrigação considerada recomendada (*IRRI-1*) e, a partir desta lâmina, foram criados mais dois cenários de disponibilidade hídrica (*IRRI-2* e *IRRI-3*), para estimar as produtividades da cultura por meio do modelo 3-PG, comparando-se com valores reais observados em condições de sequeiro (*NI*) e sob irrigação real aplicada (*IR*). Esta irrigação real aplicada foi inferior à recomendada pelo IRRIPLUS. Assim, observou-se uma estreita correlação com os dados observados de biomassa de parte aérea (*BPA*) nos tratamentos *IR* e *NI*, o que permitiu que as demais variáveis, diâmetro a altura do peito (*DAP*), volume (*V*), altura da planta (H_t) e incremento médio anual (*IMA*) fossem estimadas com segurança, sob as mesmas condições e sob influência das lâminas de irrigação recomendadas pelo ‘software’ IRRIPLUS®. As variáveis avaliadas apresentaram incremento positivo, respondendo linearmente ao acréscimo no suprimento de água, apresentando ganhos relativos proporcionais ao acréscimo nas lâminas aplicadas.

ABSTRACT

ALVES, Maria Emília Borges, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2009. **Availability and demand of water on eucalyptus productivity.** Adviser: Everardo Chartuni Mantovani. Co-advisers: Gilberto Chohaku Sediama and Júlio César Lima Neves.

The planted forest sector in Brazil plays a fundamental role in the socioeconomic scenario of the country, contributing to the production of goods and services, increased value of forestry product and the generation of jobs, foreign investments, taxes and revenue. Establishing relationships between water consumption of the eucalyptus crop and availability of water in the soil may contribute to predicting the production potential of the planted forests, taking into consideration the distinct climatic conditions to which the crop is exposed in the diverse regions in which eucalyptus is grown, influencing productivity and duration of the production cycle. Therefore, simulations performed for evaluation of the effects of greater water supplies on productivity obtained under these conditions may generate important information for management of the eucalyptus crop. However, there is little information available on the water demands of eucalyptus crops, requiring

investigations to determine this demand. The use of irrigation in planted forests is highlighted, including the supply of water to the eucalyptus crop in the plating phase and the association of water retention polymers (hydrogel) in irrigation in order to elevate the retention of water and therefore reduce the number of irrigations and volume of water applied, where this resource is amply used by commercial eucalyptus producers. In light of the reported aspects, the objectives of the present study were: to study the relationships between the eucalyptus crop and the water supply, evaluate the use of hydrogel during eucalyptus planting, estimate the water needs of the eucalyptus crop based on an estimate of the crop coefficient (K_c) of eucalyptus and establish a relationship between productivity and water supply by means of simulations. Therefore, an initial experimentation sought to associate different doses of hydrogel to evapotranspiration of the crop with different soil types and two irrigation frequencies. In this study it was concluded that the use of hydrogel had a positive effect on survival and growth of the eucalyptus seedlings after planting. Reduction in evaporation by the addition of the hydrogel made a greater volume of water available to the plants, reducing mortality rates. Under the two studied conditions, benefits were observed for planting both in a green house and outside of the greenhouse. However, the establishment of ideal values for utilization of hydrogel is still premature. The second portion of this work was to estimate the crop coefficient (K_c) of eucalyptus using the dual crop coefficient ($K_c\ dual$) methodology, proposed by Allen et al. (1998). This estimate is based on observed climate and crop height data in an experiment conducted in the region of Rio Doce, MG, Brazil, considering a period of 1.5 years after planting, the initial and middle stages of crop development. Thus, the average values for the estimated crop coefficients are 0.57, 0.13 and 0.60 for K_e (soil water coefficient for evaporation), K_{cb} (basal crop coefficient) and K_c (single crop coefficient), respectfully in the initial phase of development, and 0.01, 0.81, and 0.82 for K_e , K_{cb} and K_c respectfully in the middle stage of crop development. The estimated

values should not be considered definite values since the estimates do not substitute values measured in the field. In the third portion of this work, an estimate of eucalyptus productivity under diverse conditions of water supply was established, using as a reference point data observed in an experiment conducted in the region of Rio Doce, MG, during a complete eucalyptus cycle between the years of 2001 and 2008. The IRRIPLUS software was used to simulate the recommended irrigation depth (*IRRI-1*) and based on this depth two scenarios of water availability were created (*IRRI-2* and *IRRI-3*), to estimate the crop productivities by means of the 3-PG model, comparing the real observed values in dry conditions (*NI*) and those of real applied irrigation (*IR*). This real applied irrigation was inferior to that recommended by IRRIPLUS. Therefore, a close correlation was observed for the aerial biomass portion (*BPA*) in the *IR* and *NI* treatments, which permitted that the other variables, diameter at chest height (*DAP*), volume (*V*), plant height (H_t) and average annual growth (*IMA*) were accurately estimated, under the same conditions and under the influence of the irrigation depths recommended by the IRRIPLUS® software. The evaluated variables presented positive increase, responding linearly to the addition in water supply, presenting relative gains proportional to the increase in applied irrigation depths.

INTRODUÇÃO GERAL

O setor de florestas plantadas no Brasil desempenha um papel fundamental no cenário sócio-econômico do país, ao contribuir com a produção de bens e serviços, agregação de valor aos produtos florestais e para a geração de empregos, divisas, tributos e renda. Em 2005, este setor representou 3,5% do PIB nacional, 8,4% das exportações, 14,2% do superávit da balança comercial e 4,6% das exportações mundiais de produtos florestais (SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA – SBS, 2007). Em 2006, o setor recolheu R\$ 9,2 bilhões de tributos e exportou US\$ 7,4 bilhões, gerando cerca de 4,1 milhões de empregos diretos e indiretos (ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA – AMS, 2007).

De acordo com a Sociedade Brasileira de Silvicultura (SBS, 2007), o Brasil é líder mundial em produção de celulose branqueada de eucalipto, exportação de compensados de pinus e carvão vegetal e está entre os maiores do mundo em diversos outros produtos, como produção de resina (2º) e a exportação de madeira serrada (3º). Setores que dependem de madeira como seu insumo básico conseguem obtê-lo sem causar desmatamento, como é o caso do setor

de papel e celulose, o de painéis reconstituídos e mesmo o de carvão vegetal, que tem boa parte de sua produção oriunda de florestas plantadas.

O Brasil conta com 6.583.074 ha de florestas plantadas, entre áreas com pinus (28,4%), eucalipto (64,7%) e outras espécies (6,9%). Assim, a área plantada com eucalipto corresponde a 4.258.704 ha, tendo sido registrada uma expansão de 7,3% da área plantada de 2007 para 2008. Da área total plantada no país, o Estado de Minas Gerais detém a maior área individual com florestas plantadas, compreendendo 1.423.212 ha (9,8% com pinus e 90,2% com eucaliptos). Em seguida vêm os estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Bahia, com 1.142.199 ha, 857.328 ha, 628.655 ha, e 622.696 ha, respectivamente (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF, 2009).

De acordo com Leite (2005), a expansão da área cultivada tem sido impulsionada pelo aumento da demanda de madeira que passará de 145 para 220 milhões de $m^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ até 2020.

Considerando a alta disponibilidade energética e a possibilidade de ciclos culturais florestais em torno dos sete anos, bem menores do que em regiões temperadas, a região tropical é apontada como um dos principais fornecedores de madeira no futuro (HUNTER, 2001). Desta forma, o Brasil poderá tornar-se, em curto prazo, o maior produtor mundial de madeira e subprodutos oriundos de florestas plantadas. O clima tropical predominante, que contribui para que as plantações florestais apresentem altas taxas de crescimento vegetativo, a grande extensão territorial, a disponibilidade de mão-de-obra e de técnicas inovadoras são fatores que favorecem a expansão do setor, gerando emprego e renda ao país (GATTO, 2005).

Além disto, um grande esforço científico e tecnológico possibilitou ao Brasil expressivos aumentos na produtividade quantitativa e qualitativa das florestas plantadas. O eucalipto, que em 1965 produzia cerca de $10 m^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, passou para uma produtividade média de $38 m^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ em 2006,

chegando, em alguns casos, a $50 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$. Da mesma forma, a madeira de pinus também alcançou níveis de excelência e o salto da produtividade média no período foi de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ para $28 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ (SBS, 2006).

Das espécies florestais, as do gênero *Eucalyptus* têm sido as mais plantadas nas diversas regiões brasileiras, devido ao seu rápido crescimento e à alta capacidade de produção de madeira, oriundas da grande adaptação a uma diversidade de condições ecológicas e ao número expressivo de espécies (AMARAL, 2000). Atualmente, grande parcela das florestas plantadas de eucalipto é originária de plantios clonais de alta produtividade com adaptação e tolerância a fatores adversos de clima, solo, água, entre outros (ABRAF, 2006), ressaltando-se, diante disto, a influência da disponibilidade hídrica no solo sobre desenvolvimento das florestas.

Melo (1994) e Leite (1996) afirmam que variações na produtividade do eucalipto estão relacionadas às diferenças de suprimento de água, aeração do solo, restrição mecânica ao crescimento de raízes e suprimento de nutrientes, sendo que, entre estas, a água é considerada um dos fatores que mais influencia o crescimento das árvores.

Souza et al. (2006) afirmaram que a relação entre a disponibilidade hídrica e a produtividade florestal é concernente aos efeitos diretos e indiretos da deficiência de água no crescimento das árvores. Em trabalho desenvolvido na região do Vale do Rio Doce, no estado de Minas Gerais, estes autores encontraram que a produtividade de madeira foi influenciada pelo total precipitado durante a estação chuvosa; sendo os menores valores de incremento periódico mensal (IPM) observados nos anos precedidos de estações chuvosas, classificadas como secas ou muito secas, enquanto os maiores valores de IPM foram verificados nos anos precedidos de estação chuvosa classificada como chuvosa ou muito chuvosa.

Estabelecer relações entre consumo de água pela cultura do eucalipto e a disponibilidade de água no solo pode contribuir na predição do potencial

produtivo dos plantios florestais. Soares et al. (1997) constataram que a transpiração depende substancialmente da disponibilidade de água, que em última instância controla a condutância estomática, visto que o potencial de água na folha reflete uma condição de equilíbrio entre a folha e o solo (na antemanhã). Em outras palavras, quando a umidade do solo é reduzida, a condutância estomática e o potencial hídrico foliar diminuem e, conseqüentemente, a transpiração.

As distintas condições climáticas, às quais a cultura está exposta nas diversas regiões em que é feito seu cultivo, influenciam na sua produtividade e duração do ciclo. Considerando esta observação, Calder (1998) relata que o uso de água pelas florestas varia sensivelmente entre regiões temperadas e tropicais e entre zonas úmidas e secas destas regiões.

Stape et al. (2004b) quantificaram a produção de biomassa do eucalipto na região Nordeste da Bahia relacionada com o suprimento, uso e eficiência dos recursos água, luz e nitrogênio. Os autores constataram que a precipitação foi a variável climática que se associou mais fortemente com o incremento anual de biomassa, juntamente com o índice de área foliar (IAF), indicando que o suprimento de água é um recurso primário no controle da produtividade na região tropical estudada. De acordo com Stape et al. (2004a), o incremento na produção de madeira observado em ano de maior incidência de chuvas, comparado ao observado em ano considerado seco, salienta a importância do suprimento de água e o potencial uso da irrigação como opção de manejo.

Este potencial ainda é bastante discutido, especialmente quanto à sua viabilidade econômica e quanto ao consumo de água pela cultura do eucalipto.

Dentro deste contexto, a realização de simulações a fim de avaliar os efeitos do déficit hídrico ao qual a cultura é submetida bem como para avaliar o efeito de maiores suprimentos de água proporcionados pela irrigação e estabelecer uma relação com as produtividades obtidas nestas condições, pode

gerar informações importantes para o manejo da cultura e definição de regiões que ofereçam condições mais favoráveis ao plantio do eucalipto.

A utilização da água por plantações de eucalipto tem sido historicamente um assunto controverso em muitas partes do mundo. A pesquisa tem demonstrado que a viabilidade depende da região, das espécies, das condições ambientais e das práticas de uso da terra (CALDER, 1998; DYE, 2000; ALMEIDA; SOARES, 2003). As empresas florestais têm necessidade de melhorar sua compreensão do uso da água pelas plantações a fim de ajustar suas práticas de gestão para alcançar sustentabilidade a longo prazo e para responder às questões das diferentes partes interessadas (ALMEIDA et al., 2007), desde as próprias empresas até organizações ambientalistas, passando pela população local e a sociedade como um todo.

São poucas as informações existentes sobre as necessidades hídricas da cultura do eucalipto. Esta é uma cultura tradicionalmente de sequeiro, por diversas razões, entre elas sua rusticidade e o alto custo envolvido na implantação de sistemas de irrigação em função das dimensões das áreas de plantio, além das questões ambientais que remontam ao antigo mito de que o eucalipto 'seca' o solo e chegam à grande quantidade de água necessária para irrigar áreas tão extensas, ainda se faz necessário quantificar as necessidades hídricas da cultura. Esta quantificação auxiliaria não somente no caso da implantação de sistemas de irrigação, como também e, talvez principalmente, na escolha de regiões que ofereçam melhores condições ao desenvolvimento da cultura no que diz respeito ao regime pluviométrico.

Destaca-se, quanto ao uso da irrigação em florestas plantadas, o suprimento de água para a cultura do eucalipto na fase de plantio. Esta é uma prática bastante utilizada e fundamental para garantir um alto índice de sobrevivência das mudas e tem sido utilizada com base em experiências das próprias empresas florestais, que vêm testando e aplicando métodos que apresentem resultados mais satisfatórios em seus testes.

A esta irrigação de plantio pode-se associar a utilização de polímeros hidroretentores, chamados gel ou hidrogel, com intuito de elevar a retenção de água e desta forma reduzir o número de irrigações e os volumes aplicados, visando não só a redução dos custos operacionais como também do consumo de água. No entanto, há uma demanda quanto ao estabelecimento de critérios que definam o uso desta técnica, que vem sendo muito utilizada, porém, de forma empírica.

Em decorrência dos aspectos abordados, tendo em vista as questões relacionadas aos efeitos do suprimento de água a cultura do eucalipto, as práticas culturais visando este suprimento e, ainda, os aspectos climáticos que afetam o cultivo do eucalipto, o presente estudo tem por objetivo estudar as relações entre a cultura do eucalipto e o suprimento de água. Especificamente, pretende-se:

- Avaliar o uso de polímeros hidroretentores no plantio do eucalipto.
- Estimar as necessidades hídricas da cultura do eucalipto com base na estimativa do coeficiente de cultura (K_c) do eucalipto.
- Estabelecer uma relação entre a produtividade do eucalipto e o suprimento de água a partir de simulações da produtividade da cultura em diversas condições de suprimento de água.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A.C.; SOARES, J.V. Comparação entre o uso da água em plantações de eucalyptus grandis e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 159-170, 2003.

ALMEIDA, A.C.; SOARES, J.V. LANDSBERG, J.J.; REZENDE, G.D. Growth and water balance of Eucalyptus grandis hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. **Forest Ecology and Management**, n. 251, p. 10-21, 2007.

AMARAL, G. **Características químicas e físicas de diferentes classes de solos da zona metalúrgica mineira e produtividade de eucalipto**. 2000. 98 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF**: ano base 2005. Brasília, 2006. 80 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2009**: ano base 2008. Brasília, 2009. 120 p.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA – AMS. **Florestas plantadas**: um compromisso com o desenvolvimento social. Belo Horizonte, 2007. 32 p.

CALDER, I. R. Water use by forests, limits and controls. **Tree Physiology**, n. 18, p. 625-631, 1998.

DYE, P.J. Water use efficiency in South African Eucalyptus plantations: a review. **South Africa Forest Journal**, n. 189, p. 17-26, 2000.

GATTO, A. **Estoques de carbono no solo e na biomassa de plantações de eucalipto na região Centro-Leste de Estado de Minas Gerais**. 2005. 73 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

HUNTER, I. Above ground biomass and nutrient uptake of three tree species (Eucalyptus camaldulensis, Eucalyptus grandis and Dalbergia sissoo) as affected by irrigation and fertilizer, at 3 years of age, in southern India. **Forest Ecology and Management**, n. 144, p. 189-199, 2001.

LEITE, F.P. **Crescimento, relações hídricas, nutricionais e lumínicas em povoamentos de Eucalyptus grandis em diferentes densidades populacionais**. 1996. 90 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

LEITE, N.B. Avanços da silvicultura brasileira são significativos. **Visão Agrícola**, v. 4, p. 58-61, 2005.

MELO, V.F. **Relação entre a reserva mineral de solos e a produção e nutrientes em povoamentos de Eucalyptus saligna Smith, no Rio Grande do Sul**. 1994. 145 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SOARES, J.V.; ALMEIDA, A.C.; PENCHEL, R.M. Balanço hídrico de plantações de eucalipto a partir da estimativa de transpiração pelo método de Penman-Monteith. Salvador: EMBRAPA, 1997. (Conferência IUFRO sobre Silvicultura e Melhoramento de Eucaliptos).

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA – SBS. **Fatos e números do Brasil florestal**. [S.l.], 2006.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA – SBS. **Fatos e números do Brasil florestal**. [S.l.], 2007.

SOUZA, M.J.H.; RIBEIRO, A.; LEITE, H.G.; LEITE, F.P.; MINUZZI, R.B. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto e, três regiões da Bacia do Rio Doce. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 399-410, 2006.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; GOMES, A.N. Water use, water limitation, and water use efficiency in a *Eucalyptus* plantation. **Bosque**, Valdivia, Chile, v. 25, n. 2, p. 35-41, 2004a.

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

CAPÍTULO 1
USO DE POLÍMEROS HIDRORETENTORES EM MUDAS DE EUCALIPTO
E SUA RELAÇÃO COM A EVAPOTRANSPIRAÇÃO E CRESCIMENTO DA PLANTA

1. INTRODUÇÃO

As áreas de florestas plantadas no Brasil acumularam em 2008 o total estimado de 6.126.000 ha com eucalipto e pinus. Este total representa um acréscimo de cerca de 282.000 ha plantados em relação ao total estimado do ano anterior (5.844.367 ha). Constata-se crescimento de 7,3% na área plantada com eucalipto e queda de 0,4% no pinus, o que resulta em aumento de 4,38% da área com florestas plantadas acumulada até 2008, em relação a 2007 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2009). Estes números colocam o Brasil como o segundo maior produtor mundial de eucalipto, perdendo somente para a Índia de acordo com dados de 2008 da FAO.

Ressalta-se que grande parcela das florestas plantadas de eucalipto é originária de plantios clonais de alta produtividade com adaptação e tolerância a fatores adversos de clima, solo, água, entre outros (ABRAF, 2006). Dentro

deste contexto, destaca-se a influência da disponibilidade hídrica no solo sobre desenvolvimento das florestas.

Stape et al. (2004) quantificaram a produção de biomassa do eucalipto na região Nordeste da Bahia relacionada com o suprimento, uso e eficiência dos recursos água, luz e nitrogênio, com variações climáticas observadas ao longo de um gradiente geográfico. Os autores constataram que a precipitação foi a variável climática que se associou mais fortemente com o incremento anual de biomassa.

A princípio, a água disponível para as mudas é aquela presente no substrato no qual as mesmas são cultivadas em viveiro e que as acompanha no transplante. Ao longo do tempo, a muda deve absorver a água do perfil do solo. A habilidade para que ela faça isto vai depender tanto da capacidade das raízes crescerem no perfil do solo como do conteúdo de água no solo (GROSSNICKLE, 2005). De acordo com Thomas (2008), uma das principais causas das taxas de mortalidade de mudas de espécies florestais, logo após o transplante, é a incapacidade das mesmas de se manterem hidratadas adequadamente. Condições em que esta hidratação é suprida pela umidade do solo ou pela redução das perdas por evaporação após o plantio reduzem a mortalidade das mudas.

Sob esta ótica, a irrigação da cultura do eucalipto na fase de plantio é uma prática bastante utilizada e fundamental para garantir um alto índice de sobrevivência das mudas. Considera-se fase de plantio o momento em que a muda é transplantada do viveiro para o campo. A esta irrigação de plantio se associa a utilização de polímeros hidroretentores, chamados gel ou hidrogel, com intuito de elevar a retenção de água e desta forma reduzir o número de irrigações e os volumes aplicados, visando não só a redução dos custos operacionais como também do consumo de água.

De acordo com Vallone (2003), o polímero hidroretentor, utilizado para fins agrícolas, é caracterizado pela capacidade de absorver e liberar água e

nutrientes solúveis. A natureza do arranjo das moléculas confere a este material uma forma granular quando secos e ao, serem hidratados, os grânulos dilatam-se transformando em partículas de gel.

Quimicamente, os polímeros podem ser definidos como substâncias constituídas de macromoléculas formadas a partir da repetição de unidades estruturais menores, os monômeros. Moraes (2001) cita que os hidrorretentores mais freqüentemente usados são os polímeros sintéticos propenamidas (poliacrilamida ou PAM) e os co-polímeros propenamida-propenoato (poliacrilamidaacrilato, ou PAA). Sua eficiência é determinada por suas propriedades químicas, tais como seu peso molecular e granulometria, bem como pela composição química da solução do solo e da água de irrigação (KOUPI et al., 2008).

Rezende (2001), avaliando o efeito da incorporação de polímeros hidroabsorventes na retenção de água em dois tipos de solos, constatou que, com o uso deste tipo de produto, as irrigações podem ser feitas com lâminas maiores por causa da maior retenção e, portanto, em menor freqüência, implicando em economia de água, energia e mão-de-obra. Além disto, constatou que a eficiência na retenção de água pode variar conforme o tipo de solo em que é aplicado.

Koupai et al. (2008) avaliaram a retenção de água em solos arenosos e argilosos e observaram que a adição de hidrogel aumentou em aproximadamente 2,2 vezes a disponibilidade de água em solos arenosos em relação ao tratamento controle (sem adição de hidrogel), enquanto que em solos argilosos este aumento foi de aproximadamente 1,2 vezes. Estes resultados indicam um melhor desempenho da incorporação de hidrogel em solos de textura grossa.

Gonçalves et al. (2004) afirmam que uma das possibilidades de aumentar a produtividade das plantações florestais é a utilização do hidrogel, responsável por uma sobrevivência maior das mudas no pós-plantio já que

supre a demanda hídrica das plantas nesta fase crítica. Este produto também contribui para a viabilização do plantio o ano todo, que não se torna mais dependente das variações climáticas observadas ao longo do ano. Como possibilitam a retenção de água e a sua liberação de maneira gradativa para a planta, podem aumentar a eficiência da irrigação e diminuir o risco da ocorrência de falhas durante o estabelecimento do povoamento florestal.

A eficiência do hidrogel no fornecimento de água para mudas de *Eucalyptus urophylla* em pós-plantio foi estudada por Buzetto et al. (2002). Estes autores constataram que o polímero reteve a água de irrigação por maior tempo, disponibilizando-a de maneira gradativa para as plantas, o que resultou na redução da mortalidade das mudas cultivadas sem, contudo, influenciar seu crescimento.

As doses de hidrogel normalmente utilizadas nos plantios florestais são sugeridas pelos fabricantes deste insumo e, de maneira geral, não variam conforme o tipo de solo, clima, ou nenhum outro fator.

A aplicação do hidrogel tem sido investigada no Brasil de forma sistemática e com caráter científico nas áreas de horticultura, especialmente para os cultivos em casa de vegetação (BRUXEL et al., 2002; TITTONELL et al., 2002), e cafeicultura (GERVÁSIO, 2003; VALE et al., 2006). Já nos estudos relacionados à utilização do hidrogel no plantio do eucalipto, observa-se que a maior parte é realizada no âmbito das empresas florestais, em condições de campo, e abordam aspectos mais operacionais que científicos (BUZETTO et al., 2002; GONÇALVES et al., 2004).

Segundo Sarvaš et al. (2007), a aplicação do hidrogel é simples mas é muito difícil não se aplicar uma superdosagem, o que causaria a mortalidade das plantas. Estes autores sugerem que sejam desenvolvidas pesquisas para determinar doses adequadas a diferentes tipos de solo e espécies de árvores.

Em função do exposto, observou-se a necessidade da realização de trabalhos de caráter científico que avaliem os efeitos do uso do hidrogel com o

objetivo de gerar informações que venham a estabelecer parâmetros para sua aplicação. Assim, o presente estudo teve como objetivo quantificar a evapotranspiração da cultura, bem como avaliar o desenvolvimento da cultura sob diferentes doses de hidrogel a fim de, por meio destas relações, estabelecerem critérios para a adequação do uso do hidrogel no plantio do eucalipto.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido em duas etapas: a primeira etapa com plantio em casa de vegetação e a segunda com plantio em campo aberto, conforme descrito a seguir.

2.1. Primeira etapa: plantio em casa de vegetação

O experimento foi conduzido no município de Viçosa, MG, em casa de vegetação situada na área externa ao Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, no período de 30 de março a 29 de abril de 2008. A implantação em casa de vegetação foi definida visando evitar a influência de eventuais precipitações.

As mudas de eucalipto foram plantadas em vasos com diâmetro médio de 0,30 m e volume aproximado de 11,0 L. Foram avaliadas quatro doses de hidrogel (D), em dois tipos de solo (S) e duas frequências de irrigação (F). O experimento foi instalado em delineamento inteiramente casualizado, esquema fatorial 4x2x2, com três repetições, totalizando 48 vasos (Figura 1). Assim, os tratamentos foram definidos conforme descrito a seguir: D_0 = testemunha (sem

hidrogel); $D_1 = 0,25\%$ (1,5 g de hidrogel para 600 ml de água); $D_2 = 0,33\%$ (2,0 g de hidrogel para 600 ml de água); $D_3 = 0,50\%$ (3,0 g de hidrogel para 600 ml de água); $S_1 =$ solo argiloso; $S_2 =$ solo arenoso; $F_1 =$ irrigado a cada dois dias; $F_2 =$ irrigado a cada cinco dias.



Figura 1 – Vista parcial do experimento implantado em casa de vegetação.

As doses de hidrogel foram definidas a partir de informações obtidas em pesquisa realizada junto às empresas florestais. Por meio desta pesquisa foi possível constatar que não há um padrão quanto às doses de hidrogel aplicadas, estando estes valores dentro de um intervalo que variou de 1,5 a 4,0 g de hidrogel por planta (ALVES, s.d.).

O hidrogel utilizado foi da marca Hydroplan-EB, do tipo Hydroplan-EB/HyB. Segundo o fabricante, este produto é um polímero superabsorvente formado por um laço cruzado de Copolímero de Acrilamida e Acrilato de Potássio usado para absorver e reter grandes quantidades de água e nutrientes.

O Hydroplan-EB/HyB tem capacidade de absorção água equivalente a 350 vezes seu peso, pH neutro e peso específico igual a 1 g/cm³ (HYDROPLAN-EB, 2009).

Foram utilizadas mudas de eucalipto oriundas de propagação clonal, híbrido de *Eucalyptus grandis x urophylla*, cedidas pela empresa ArcelorMittal Florestas. Os dois tipos de solos utilizados foram, também, coletados nas áreas de plantio da referida empresa.

Estes solos foram submetidos a análises físico-químicas nos laboratórios do Departamento de Solos da UFV. Tais análises possibilitaram a recomendação de adubação em conformidade com as necessidades da cultura do eucalipto em fase de plantio e, também, a classificação textural e a determinação da curva de retenção de água dos solos, estabelecendo, assim, as umidades do solo no ponto de murcha permanente (PMP) e na capacidade de campo (CC), referência para a definição das lâminas de irrigação a serem aplicadas (Tabela 1).

Tabela 1 – Resultado das análises físicas dos solos (granulometria e retenção de água do solo)

Solo	Granulometria (dag/kg)				Classe textural	Umidade (%)	
	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila		PMP	CC
S ₁	28	12	2	58	Argila	21,8	27,0
S ₂	72	18	1	9	Areia	4,3	9,5

Foram determinadas a evapotranspiração diária (ET), biomassa seca parte aérea (BSA) e de raízes (BSR), biomassa seca total (BST), relação parte aérea raiz (RELPAR) e o índice de mortalidade das plantas (IM).

A determinação da ET seguiu a metodologia utilizada por Kobayashi (1996), em que a ET foi obtida tomando-se cada vaso como um minilísímetro de pesagem. Tal metodologia propicia relacionar a demanda hídrica e o suprimento de água. Desta forma, a ET foi determinada por meio da pesagem diária dos vasos durante 30 dias, sendo ET diária igual à diferença entre o peso do dia anterior e o peso atual (equação 1). Cada vaso continha um volume conhecido de solo, de hidrogel hidratado (exceto testemunha) e uma planta de eucalipto.

$$ET_i = \frac{P_{i-1} - P_i}{A \times 1000} \quad (1)$$

em que ET_i é evapotranspiração no dia (mm); P_{i-1} , peso do vaso no dia anterior (g); P_i , peso do vaso no dia (g); e A , área do vaso (m^2).

A pesagem foi feita utilizando-se uma balança digital com capacidade de pesagem de até 30 kg e precisão de 1,0 g.

Nos tratamentos que receberam o hidrogel, este foi aplicado hidratado e de forma concentrada, conforme usualmente praticado em condições de campo, onde a muda de eucalipto fica imersa neste produto (Figura 2).

A definição da lâmina a ser aplicada em cada irrigação foi feita em função da ET, pela diferença de pesos do vaso entre o dia da última irrigação e o da próxima irrigação, seguindo-se os intervalos entre irrigações estabelecidos no tratamento referente à frequência de irrigação (F_1 e F_2). As lâminas aplicadas objetivaram levar as umidades dos solos ao valor correspondente a 60% da capacidade de campo (CC).



Figura 2 – Hidrogel aplicado no solo, preparado para o plantio (a) e plantio da muda de eucalipto em tratamento com hidrogel (b).

Os tratamentos sem gel receberam, no 1º dia do experimento, o equivalente a 600 ml de água (correspondente ao volume de água aplicado usando gel). Em seguida, foram adotados os intervalos e volumes de irrigação aplicados para os demais tratamentos.

A umidade do solo no início do experimento foi determinada pelo método padrão de estufa. Esta umidade inicial foi determinada a fim de se estabelecer um valor de referência para a determinação das lâminas de irrigação.

O índice de mortalidade (IM) foi determinado aos 15 e aos 30 dias após o plantio, por meio de contagem das plantas. A BSA e a BSR foram determinadas ao final do experimento. Para a determinação da biomassa seca, as plantas foram colhidas, lavadas e levadas à estufa a 80°C até massa constante. A pesagem foi feita utilizando uma balança digital com precisão de 0,01 g.

2.2. Segunda fase: plantio em campo aberto

O experimento foi conduzido no município de Viçosa, MG, na área externa ao Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, no período de 11 de julho a 25 de agosto de 2008.

A metodologia aplicada foi a mesma utilizada na primeira fase, sofrendo algumas alterações a fim de eliminar ou reduzir os problemas, então, observados. Sendo que estas alterações consistiram na condução do experimento fora da casa de vegetação (Figura 3) e no aumento das lâminas aplicadas de maneira que as umidades dos solos atingissem o valor correspondente a 80% da capacidade de campo (CC).



Figura 3 – Vista do experimento instalado em campo aberto.

Os solos foram caracterizados quanto à textura e à capacidade de retenção de água, cujos resultados, mostrados na Tabela 2, destacam que os

dois solos utilizados apresentaram diferenças representativas quanto às características físicas o que, por sua vez, levou a diferenças no comportamento da cultura conduzida sob estas duas condições. Os solos receberam a mesma adubação praticada nos plantios da ArcelorMittal Florestas, quando da coleta dos mesmos.

Tabela 2 – Resultado das análises físicas dos solos do Experimento 1A (textura e retenção de água do solo)

Solo	Granulometria (dag·kg ⁻¹)				Classe textural	Umidade (%)	
	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila		PMP	CC
S ₁	25	13	6	56	Argila	18,6	25,3
S ₂	70	12	7	11	Areia franca	5,0	11,1

Neste experimento, além de terem sido determinadas a evapotranspiração (ET) diária, biomassa seca parte aérea (BSA) e de raízes (BSR), biomassa seca total (BST), relação parte aérea raiz (RELPAR) e o índice de mortalidade das plantas (IM), determinou-se, também, a altura (H) e diâmetro de coleto (DC).

A determinação da ET seguiu a metodologia utilizada por Kobayashi (1996), conforme descrita anteriormente.

As variáveis BSA, BSR, DC e H foram determinadas ao final do experimento, sendo que BSA e BSR foram obtidas por meio da secagem das plantas em estufa a 80°C até massa constante.

2.3. Análise dos dados

Os dados foram avaliados por meio de Análise de Variância (ANOVA), tendo sido utilizado o “software” STATISTICA 7.0 (STATSOFT INCORPORATION, 2004). Para as variáveis quantitativas (Doses) foi aplicada Análise de Regressão, utilizando o “software” citado, enquanto que para as variáveis qualitativas (Tipo de Solo e Freqüência e Irrigação) foi aplicado o teste de médias de Tukey.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Primeira etapa: plantio em casa de vegetação

Na Tabela 3, apresenta-se o resumo da análise de variância dos quadrados médios para ET (mm), BSA (g), BSR (g), BST (g) e RELPAR (adimensional).

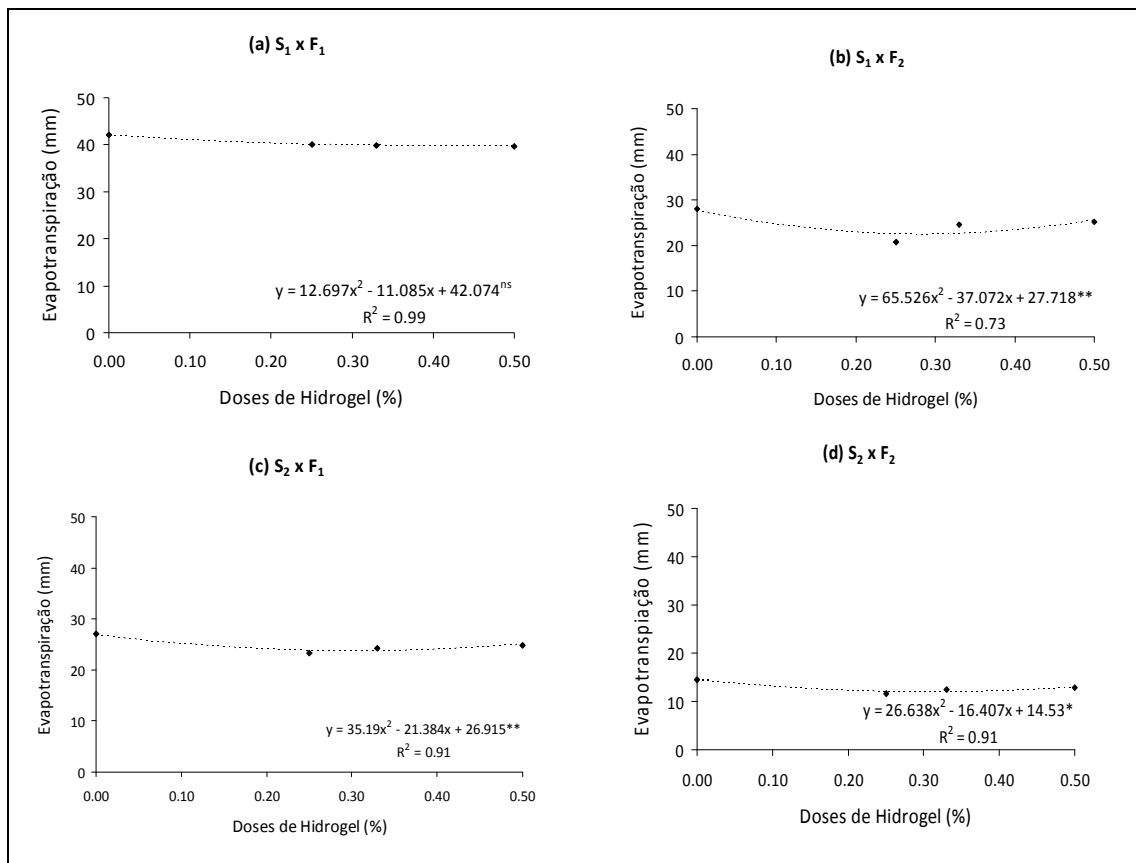
Conforme observado, as diferentes doses de hidrogel (D) apresentaram efeito significativo sobre todas as variáveis, exceto RELPAR, bem como os fatores tipo de solo (S) e frequência de irrigação (F).

Em vista destes resultados, dado ao objetivo proposto de se estabelecer uma relação entre as doses de hidrogel e o consumo de água e, ainda que a variável ET tenha sofrido influência dos fatores D, S e F, bem como da interação entre eles (D x S x F), procedeu-se a análise de regressão dos efeitos de fonte de variação D dentro das interações S x F, sobre a variável ET. Observa-se na Figura 4 que a ET apresentou comportamento semelhante nas diversas interações.

Tabela 3 – Resumo das análises de variância para as variáveis Evapotranspiração (ET), Biomassa Seca da Parte Aérea (BSA) e Biomassa Seca de Raiz (BSR), Biomassa Seca Total (BST) e Relação Parte Aérea Raiz (RELPAR). Valores totais acumulados ao final do experimento para cada tratamento testado

Fonte de variação	GL ⁴	Quadrado médio				
		ET (mm)	BSA (g)	BSR (g)	BST (g)	RELPAR
D ¹	3	32,29**	0,38**	0,12**	0,85**	0,17 ^{ns}
S ²	1	2231,80**	1,51**	0,10**	2,40**	0,66 ^{ns}
F ³	1	2310,04**	0,74**	0,09**	1,36**	0,01 ^{ns}
D x S	3	0,86 ^{ns}	0,26**	0,04 ^{ns}	0,46**	0,25 ^{ns}
D x F	3	3,09 ^{ns}	0,12**	0,02 ^{ns}	0,22**	0,03 ^{ns}
S x F	1	44,82**	0,02 ^{ns}	0,14**	0,27**	1,03**
D x S x F	3	5,22*	0,03 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,03 ^{ns}
Resíduo	32	62,59	0,03	0,02	0,06	0,24

¹ D = doses de hidrogel; ² S = tipo de solo; ³ F = frequência de irrigação; ⁴ GL = graus de liberdade. ** Significativo a 5% pelo teste F; * Significativo a 10% pelo teste F; ^{ns} Não-significativo.



S_1 = solo argiloso; S_2 = solo arenoso; F_1 = irrigado a cada 2 dias; F_2 = irrigado a cada 5 dias. ** Significativo a 1% pelo teste F; * Significativo a 5% pelo teste F; ^{ns} Não-significativo.

Figura 4 – Evapotranspiração (ET) de plantas de eucalipto, em mm, em função das doses de hidrogel (D) para cada interação solo x freqüência de irrigação (SxF), em que (a) = ET em função de D para $S_1 \times F_1$; (b) = ET em função de D para $S_1 \times F_2$; (c) = ET em função de D para $S_2 \times F_1$; (d) = ET em função de D para $S_2 \times F_2$. Valores observados (♦) e valores ajustados (---).

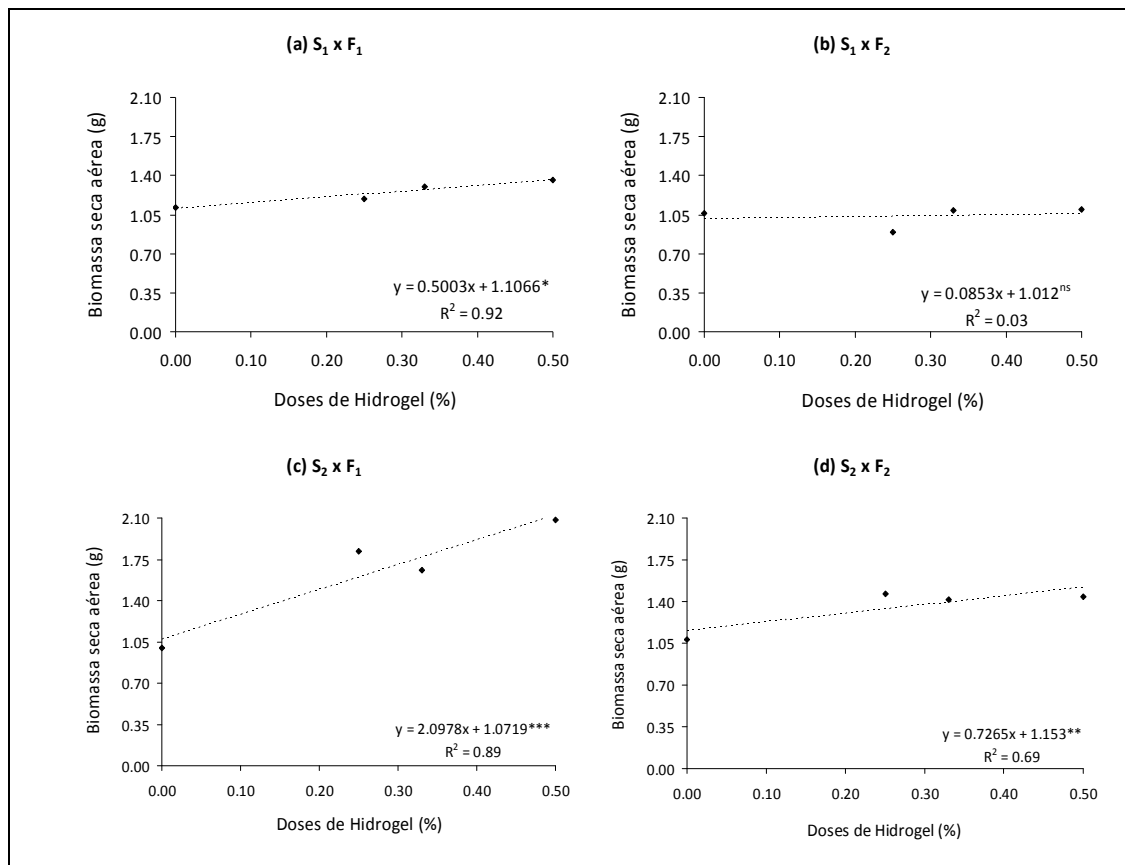
Os valores de ET nos tratamentos com a presença de hidrogel foram menores que os valores do tratamento controle, indicando que, pelo fato do hidrogel apresentar uma elevada retenção de água, esta água se tornaria menos disponível à atmosfera, o que reduziria a ET, provavelmente por reduzir desta a componente evaporação.

Cabe ressaltar que os resultados de ET em função das doses de hidrogel apresentaram um comportamento quadrático, o que permite estabelecer um

ponto ótimo para dose de hidrogel aplicada, no caso, aproximadamente 0,30%. Tal comportamento evidencia que a ET reduz com o aumento da dose de hidrogel aplicada até certo ponto, acima desta dose a ET torna a elevar, concordando com Sarvaš et al. (2007), que afirmam que a aplicação de uma superdosagem poderia prejudicar o desenvolvimento das plantas.

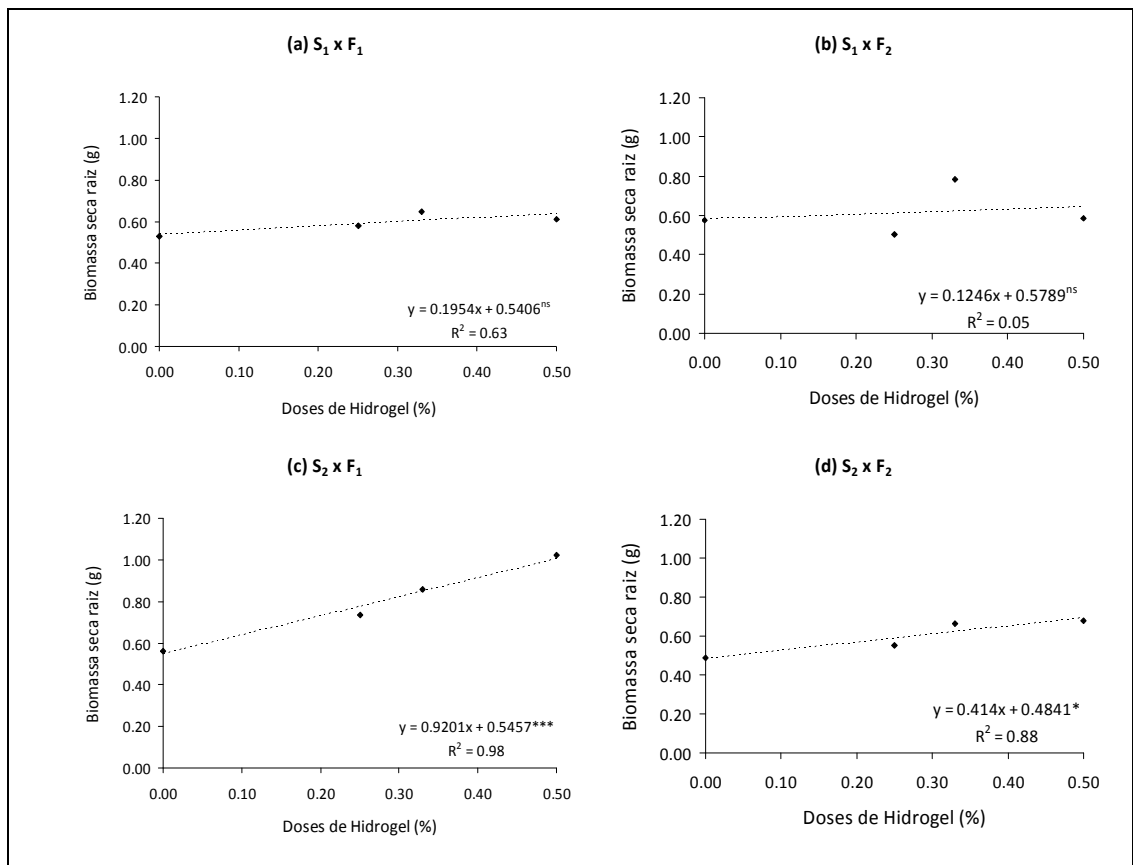
Em consonância com o observado, Koupai et al. (2008) encontraram valores de retenção de água significativamente superiores nos tratamentos que receberam hidrogel comparados com o tratamento sem hidrogel conferindo, também, aos tratamentos com hidrogel valores maiores de conteúdo de água disponível, sendo estes cerca de 2,2 vezes maiores para os solos arenosos e 1,2 vezes para os solos argilosos, do que os respectivos tratamentos sem hidrogel. Resultado semelhante foi observado por Sivapalan (2001), que observou um aumento gradativo da retenção de água conforme se aumentou as doses de hidrogel aplicadas. Este mesmo autor avaliando o efeito dos polímeros hidroretentores em plantios de soja em vasos, em casa de vegetação, observou em seu experimento que houve uma maior perda de água por evaporação até os 35 dias após plantio no tratamento controle e esta perda foi menor conforme se aumentou a dose de hidrogel.

Os valores de biomassa seca (BSA, BSR e BST) foram significativos para os fatores de variação D, S e F, mas não foram significativos para a interação D x S x F. No entanto, as curvas indicam tendência semelhante entre elas, ainda que nem todas as curvas apresentem ajustes significativos pelo teste F. Nas Figuras 5, 6 e 7 são apresentadas as curvas dos efeitos do fator de variação D dentro das interações S x F, sobre as variáveis BSA, BSR e BST.



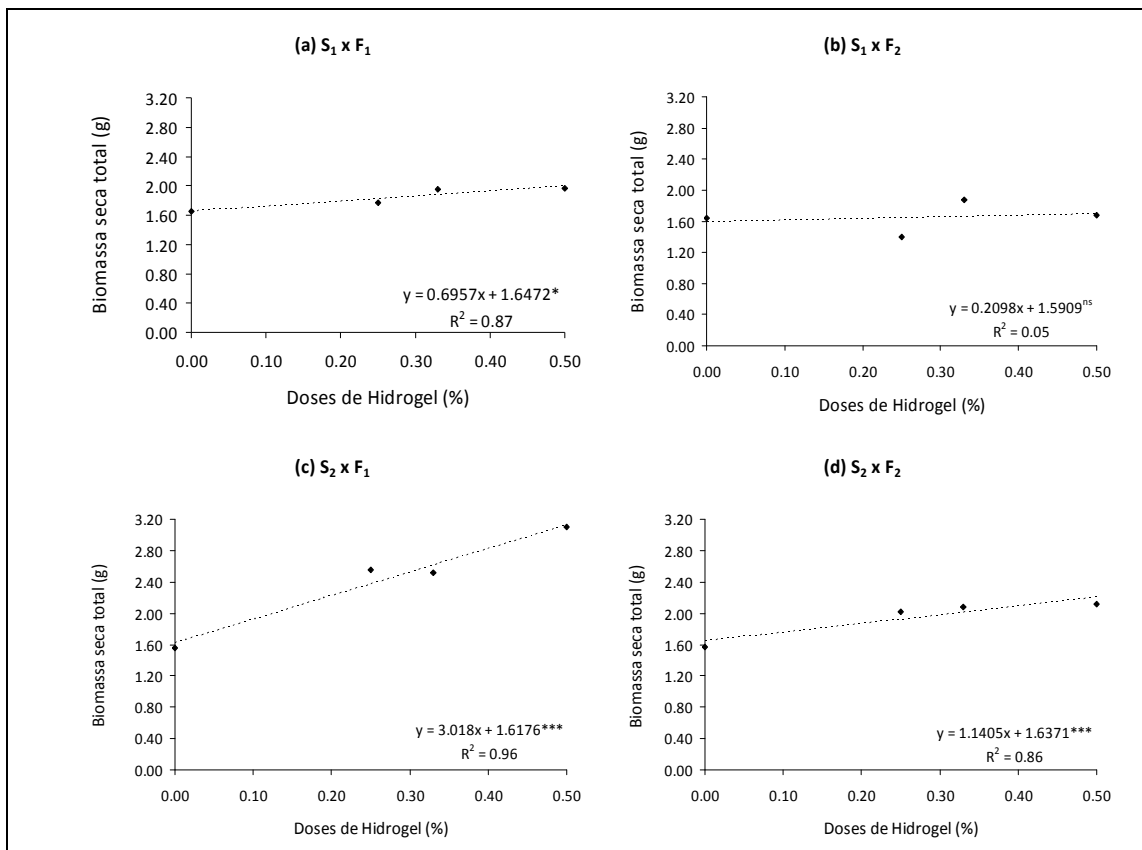
S_1 = solo argiloso; S_2 = solo arenoso; F_1 = irrigado a cada 2 dias; F_2 = irrigado a cada 5 dias. *** Significativo a 1% pelo teste F; ** Significativo a 5% pelo teste F; * Significativo a 10% pelo teste F; ^{ns} Não-significativo.

Figura 5 – Biomassa seca da parte aérea (BSA) de plantas de eucalipto, em g, em função das doses de hidrogel (D) para cada interação solo x frequência de irrigação (SxF), em que (a) = ET em função de D para $S_1 \times F_1$; (b) = ET em função de D para $S_1 \times F_2$; (c) = ET em função de D para $S_2 \times F_1$; (d) = ET em função de D para $S_2 \times F_2$. Valores observados (◆) e valores ajustados (---).



S_1 = solo argiloso; S_2 = solo arenoso; F_1 = irrigado a cada 2 dias; F_2 = irrigado a cada 5 dias. *** Significativo a 1% pelo teste F; ** Significativo a 5% pelo teste F; * Significativo a 10% pelo teste F; ^{ns} Não-significativo.

Figura 6 – Biomassa seca da raiz (BSR) de plantas de eucalipto, em g, em função das doses de hidrogel (D) para cada interação solo x freqüência de irrigação (SxF), em que (a) = ET em função de D para $S_1 \times F_1$; (b) = ET em função de D para $S_1 \times F_2$; (c) = ET em função de D para $S_2 \times F_1$; (d) = ET em função de D para $S_2 \times F_2$. Valores observados (◆) e valores ajustados (---).



S_1 = solo argiloso; S_2 = solo arenoso; F_1 = irrigado a cada 2 dias; F_2 = irrigado a cada 5 dias. *** Significativo a 1% pelo teste F; ** Significativo a 5% pelo teste F; * Significativo a 10% pelo teste F; ^{ns} Não-significativo.

Figura 7 – Biomassa seca da total (BST) de plantas de eucalipto, em g, em função das doses de hidrogel (D) para cada interação solo x freqüência de irrigação (SxF), em que (a) = ET em função de D para $S_1 \times F_1$; (b) = ET em função de D para $S_1 \times F_2$; (c) = ET em função de D para $S_2 \times F_1$; (d) = ET em função de D para $S_2 \times F_2$. Valores observados (♦) e valores ajustados (---).

Observa-se que quanto maior a dose de hidrogel, maiores os valores de biomassa seca. Tal observação permite inferir que maiores doses de hidrogel favorecem um melhor desenvolvimento da cultura. Isto pode se ocorrer devido ao fato de haver maior retenção de água na presença de maiores doses de hidrogel e, desta forma, maior quantidade de água disponível para a planta. Estes resultados coincidem com os encontrados por Sivapalan (2001), em que valores significativamente maiores de biomassa foram encontrados nos tratamentos que receberam doses de hidrogel, sendo que estes valores foram

crescentes conforme se aumentou as doses do produto. Huttermann et al. (1999) também observaram um maior desenvolvimento da cultura quando da presença de hidrogel, especialmente do sistema radicular, que apresentou um maior número de raízes adventícias. Antagonicamente, Buzetto et al. (2002), que, apesar de registrarem uma redução importante nas taxas de mortalidade das mudas, não observaram efeito significativo sobre o crescimento das mesmas.

Comparando as curvas de biomassa seca em função das doses de hidrogel, representadas nas Figuras 5, 6 e 7, com as curvas de ET representadas na Figura 4, observa-se um comportamento inverso, ou seja, as curvas de biomassa foram crescentes a medida que se aumentou as doses de hidrogel, enquanto que a ET decresceu com o aumento das doses do produto. Em tese, uma menor ET representaria menor crescimento da planta, pois, de maneira geral, a perda de água através da transpiração está relacionada com a fotossíntese, pois ambos os processos utilizam o mesmo caminho de difusão desde o mesófilo da folha até o ambiente, através do estômato. Assim, conforme se eleva a fotossíntese também aumenta a transpiração (INOUE; RIBEIRO, 1988). No entanto, de acordo com Sacramento Neto (2001), as perdas de água no solo por evaporação durante o primeiro ano de crescimento do eucalipto serão mais acentuadas, haja vista que, nesta idade não há quedas de folhas, o que protegeria o solo da ação direta do vento e da radiação solar que são elementos que atuam diretamente no processo de evaporação.

Desta forma, nesta fase de crescimento da cultura, a principal componente da ET é a evaporação da água do solo, de maneira que os menores valores de ET observados na presença de doses mais elevadas de hidrogel correspondem a menores valores da componente evaporação, assim, com uma menor perda de água para a atmosfera obteve-se uma maior quantidade de disponível a planta que proporcionou maiores ganhos de biomassa seca.

No presente estudo, o solo arenoso pareceu ser mais favorável ao desenvolvimento da cultura na presença de hidrogel, com maiores valores de biomassa seca observados nas plantas estabelecidas neste tipo de solo, menores valores de ET (Tabela 4) e uma diminuição da taxa de mortalidade das plantas em comparação com o solo argiloso.

Tabela 4 – Resultado do teste de médias para as variáveis evapotranspiração (ET), biomassa seca da parte aérea (BSA), biomassa seca da raiz (BSR) e biomassa seca total (BST) da cultura do eucalipto sob diferentes tipos de solo e diferentes frequências de irrigação, ao final do experimento conduzido em casa de vegetação

Fonte de variação ¹	ET (mm) ²	BSA (g) ²	BSR (g) ²	BST (g) ²
S ₁	32.52 a*	1.14 b*	0.60 a*	1.74 b*
S ₂	18.88 b*	1.49 a*	0.70 a*	2.19 a*
F ₁	32.63 a*	1.44 a*	0.69 a*	2.13 a*
F ₂	18.76 b*	1.19 a*	0.60 a*	1.80 a*

¹ S₁ = solo argiloso; S₂ = solo arenoso; F₁ = irrigado a cada 2 dias; F₂ = irrigado a cada 5 dias. ² Médias não seguidas por uma mesma letra minúscula diferiram significativamente pelo teste de Tukey. ** Significativo a 1% pelo teste F; * Significativo a 5% pelo teste F.

Foi observado um alto índice de mortalidade de plantas aos 30 dias após plantio (Tabela 5), o que levou à interrupção do mesmo. Esta alta mortalidade possivelmente se deu devido às elevadas temperaturas observadas dentro da casa de vegetação associadas às condições de plantio que, por se só, já proporcionaram limitações à cultura, especialmente quanto ao volume limitado de solo devido ao plantio em vasos. A temperatura máxima média foi de 39,7°C, chegando a picos de 45,0°C, como pode ser observado na Figura 8.

Tabela 5 – Índice de mortalidade das plantas de eucalipto no plantio dentro de casa de vegetação, aos 15 e aos 30 dias após plantio

Dias após plantio	15		30	
	Nº	%	Nº	%
Plantas mortas	10	20,83	35	72,92

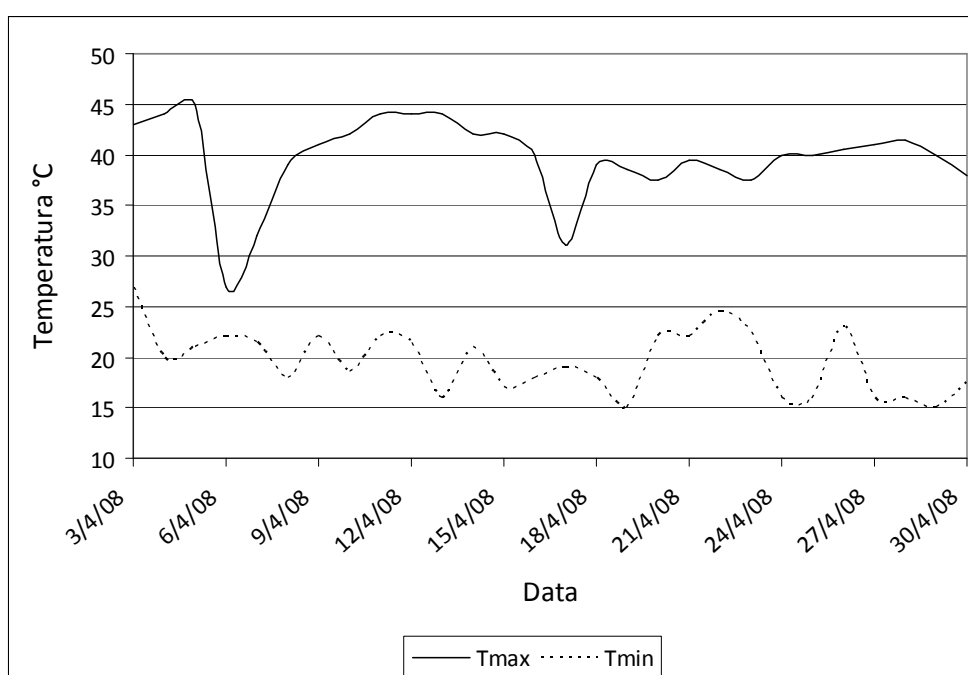


Figura 8 – Temperaturas máximas e mínimas observadas dentro da casa de vegetação, no período de 03 a 30 de abril de 2008.

Analisando-se a mortalidade das plantas de forma mais detalhada, observa-se, na Tabela 6, que esta foi fortemente influenciada pela presença do hidrogel nos primeiros 15 dias após plantio. A mortalidade de plantas em solo sem hidrogel foi visivelmente mais elevada que nos solos que receberam qualquer quantidade do polímero. Estes números confirmam que a utilização do hidrogel, quando do plantio do eucalipto, favorece o estabelecimento das mudas no campo, inclusive sob condições adversas como as que se deram na casa de vegetação.

Tabela 6 – Número de plantas de eucalipto mortas no plantio dentro de casa de vegetação, aos 15 e aos 30 dias após plantio em função dos tratamentos dose de hidrogel (D), tipo de solo (S) e frequência de irrigação (F)

Tratamento ¹	15 dias	30 dias
D ₀	9	9
D ₁	0	9
D ₂	1	8
D ₃	0	9
S ₁	7	24
S ₂	3	11
F ₁	3	12
F ₂	7	23

¹ D₁ = 0,25% (1,5 g de hidrogel para 600 ml de água); D₂ = 0,33% (2,0 g de hidrogel para 600 ml de água); D₃ = 0,50% (3,0 g de hidrogel para 600 ml de água); S₁ = solo argiloso; S₂ = solo arenoso; F₁ = irrigado a cada 2 dias; F₂ = irrigado a cada 5 dias.

Aos 30 dias após o plantio, quando o índice de mortalidade chegou a 72,9%, o número de plantas mortas nos diversos tratamentos relativos às doses de hidrogel foi praticamente o mesmo. No entanto, estes números foram diferentes entre os dois tipos de solos e as duas freqüências de irrigação testadas. Isto salienta a importância do estudo das interações 'hidrogel x tipo de solo', 'hidrogel x freqüência de irrigação' e 'hidrogel x tipo de solo x freqüência de irrigação'.

Estes resultados se assemelham aos encontrados por Callaghan et al. (1988 e 1989), que plantaram *Eucalyptus microtheca* (Eucalyptus) no Sudão com hidrogel incorporado ao solo arenoso. A taxa de sobrevivência observada por eles foi duas vezes maior na ausência de irrigação quando foi adicionado hidrogel. Em situações com reduzidas taxas de irrigação (déficit de irrigação), o índice de sobrevivência foi cerca de 1,5 vezes maior na presença de hidrogel. Os benefícios da aplicação de hidrogéis na redução dos índices de mortalidade de plantios de espécies florestais, tais como eucalipto e pinus, são relatados por diversos autores (THOMAS, 2008; GONÇALVES et al., 2004; BUZETTO et al., 2002; HUTTERMANN et al., 1999), sendo consenso que estes benefícios se dão pela maior retenção de água que o produto propicia, mantendo uma maior umidade juntos às raízes das mudas recém plantadas e reduzindo as perdas por evaporação.

3.2. Segunda fase: plantio em campo aberto

Os resultados da análise de variância são apresentados na Tabela 7.

Observa-se que a aplicação de diferentes doses de hidrogel não apresentou efeito significativo sobre a ET, ao contrário do observado na primeira fase, o que limita o estabelecimento de uma relação entre D x ET com o intuito de se definir critérios para o uso do hidrogel em campo.

Tabela 7 – Resumo das análises de variância para as variáveis Evapotranspiração (ET), Biomassa Seca da parte Aérea (BSA) e Biomassa Seca de Raiz (BSR), Biomassa Seca Total (BST), Relação Parte Aérea Raiz (RELPAR), Diâmetro do Coleto (DC), Altura da Planta (H) e Relação Altura Diâmetro (RELHD). Valores totais acumulados ao final do experimento para cada tratamento testado

Fonte de variação	GL ⁴	Quadrado médio								
		ET (mm)	DC (mm)	H (mm)	RELHD	BSA (g)	BSR (g)	BST (g)	RELPAR	
D ¹	3	95,9 ^{ns}	0,41*	56,9**	0,77 ^{ns}	2,36**	0,57 ^{ns}	5,23**	0,10 ^{ns}	
S ²	1	7879,6**	1,70**	215,9**	0,08 ^{ns}	11,75**	7,36**	37,70**	0,46 ^{ns}	
F ³	1	28961,3**	18,20**	478,8**	14,09**	56,96**	3,85**	90,42**	8,34**	
D x S	3	228,5 ^{ns}	0,20 ^{ns}	52,1**	1,17 ^{ns}	1,48*	0,56 ^{ns}	3,09 ^{ns}	0,58 ^{ns}	
D x F	3	238,6 ^{ns}	0,27 ^{ns}	17,1 ^{ns}	0,42**	0,53 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,18 ^{ns}	
S x F	1	368,7 ^{ns}	0,92**	6,0 ^{ns}	8,24 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,001 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,03 ^{ns}	
D x S x F	3	480,6*	0,24 ^{ns}	24,5*	0,91 ^{ns}	2,05**	1,06**	5,55**	0,53 ^{ns}	
Resíduo	32	196,7	0,17	9,23	0,81	0,64	0,33	1,49	0,27	

¹D = doses de hidrogel; ²S = tipo de solo; ³F = frequência de irrigação; ⁴GL = graus de liberdade. ** Significativo a 5% pelo teste F; * Significativo a 10% pelo teste F; ^{ns} Não-significativo.

Cabe ressaltar que, apesar da ET não ter variado em função de D, esta variável sofreu influência dos fatores tipo de solo (S) e freqüência de irrigação (F), cujas médias foram comparadas pelo teste de Tukey (Tabela 8). Os maiores valores de ET sob maiores freqüências de irrigação se justificam pela maior disponibilidade de água, concordando com Allen et al. (1998), que afirmam que o grau de cobertura do solo pelo cultivo e a quantidade de água disponível na superfície evaporante são fatores que afetam o processo de evaporação, além dos fatores climáticos. As diferenças observadas em função do tipo de solo coincidem com aquelas observadas na primeira fase.

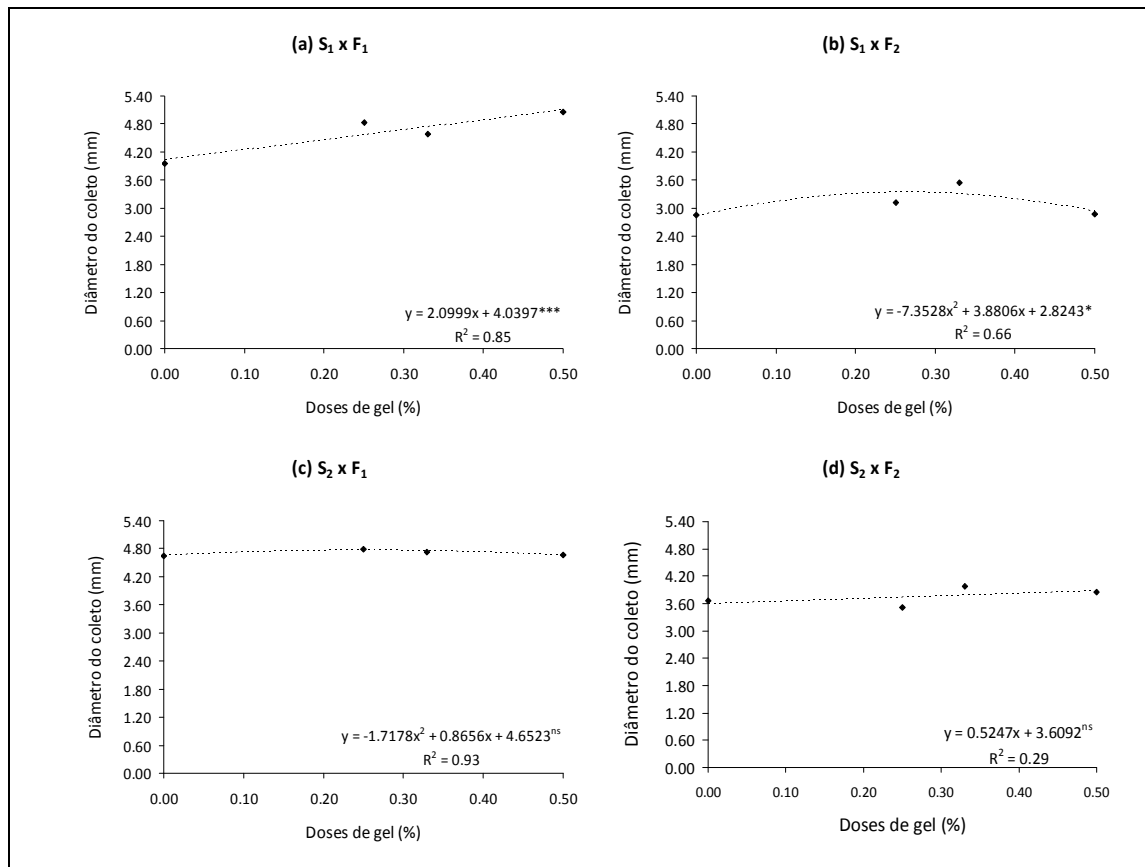
Tabela 8 – Evapotranspiração (ET) da cultura do eucalipto sob diferentes tipos de solo (S) e diferentes freqüências de irrigação (F), ao final do experimento conduzido em campo aberto

Fonte de variação ¹	ET (mm) ²
S ₁	83,38 a*
S ₂	57,75 b*
F ₁	95,13 a**
F ₂	46,00 b**

¹ S₁ = solo argiloso; S₂ = solo arenoso; F₁ = irrigado a cada 2 dias; F₂ = irrigado a cada 5 dias. ² Médias não seguidas por uma mesma letra minúscula diferiram significativamente pelo teste de Tukey. ** Significativo a 1% pelo teste F. * Significativo a 5% pelo teste F.

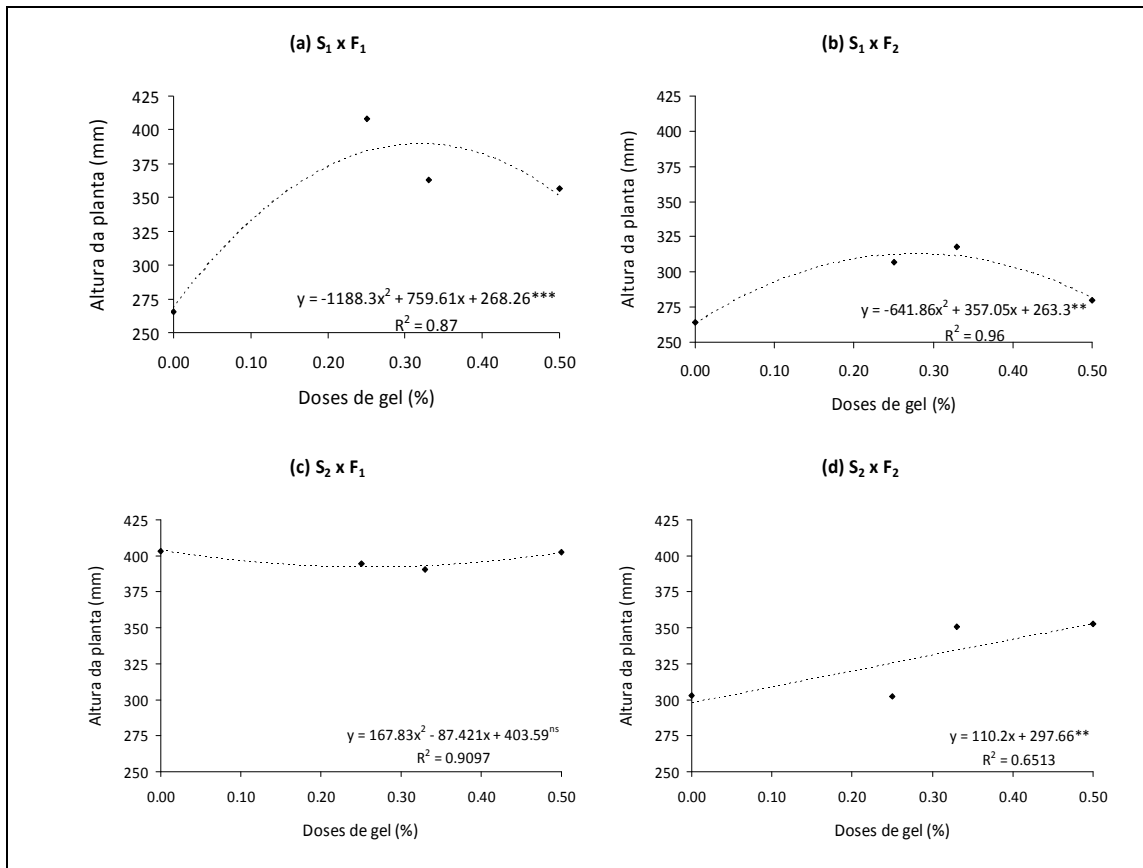
As doses de hidrogel apresentaram efeito significativo sobre as variáveis DC, H, BSA e BST. No entanto, nas Figuras 10, 11, 12 e 13 pode-se notar que estas variáveis não seguiram tendências semelhantes, ao contrário do observado na primeira fase, quando avaliadas sob o efeito das doses de hidrogel dentro da interação S x F. É possível que isto tenha ocorrido em decorrência do que foi observado e comentado, anteriormente, com relação às variações na

evapotranspiração. Como houve outros fatores influenciando esta variável, além daqueles considerados como esperados, a mesma não obedeceu a uma tendência, como no experimento da primeira fase, afetando, também, as respostas das variáveis relativas ao crescimento e desenvolvimento da cultura.



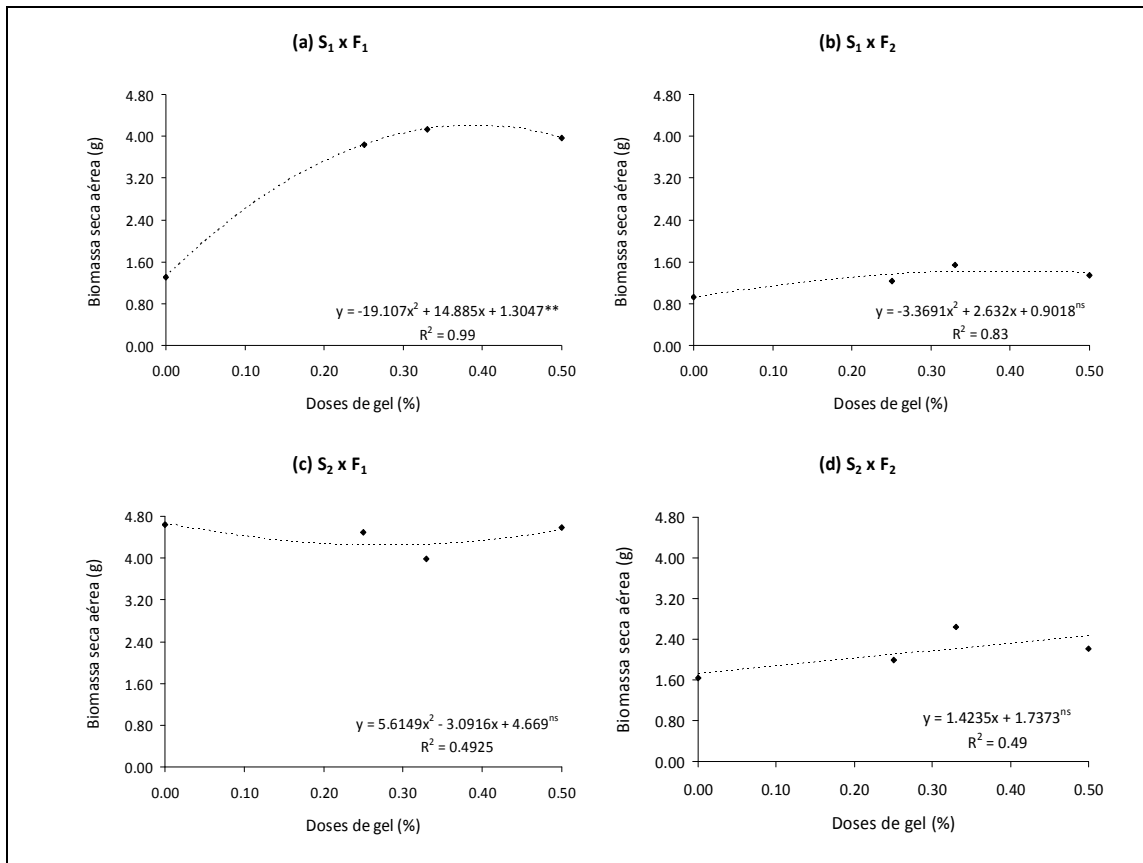
S₁ = solo argiloso; S₂ = solo arenoso; F₁ = irrigado a cada 2 dias; F₂ = irrigado a cada 5 dias. *** Significativo a 1% pelo teste F; ** Significativo a 5% pelo teste F; * Significativo a 10% pelo teste F; ^{ns} Não-significativo.

Figura 10 – Diâmetro do Coleto (DC) de plantas de eucalipto, em mm, em função das doses de hidrogel (D) para cada interação solo x freqüência de irrigação (S x F), em que (a) = ET em função de D para S₁ x F₁; (b) = ET em função de D para S₁ x F₂; (c) = ET em função de D para S₂ x F₁; (d) = ET em função de D para S₂ x F₂. Valores observados (♦) e valores ajustados (---).



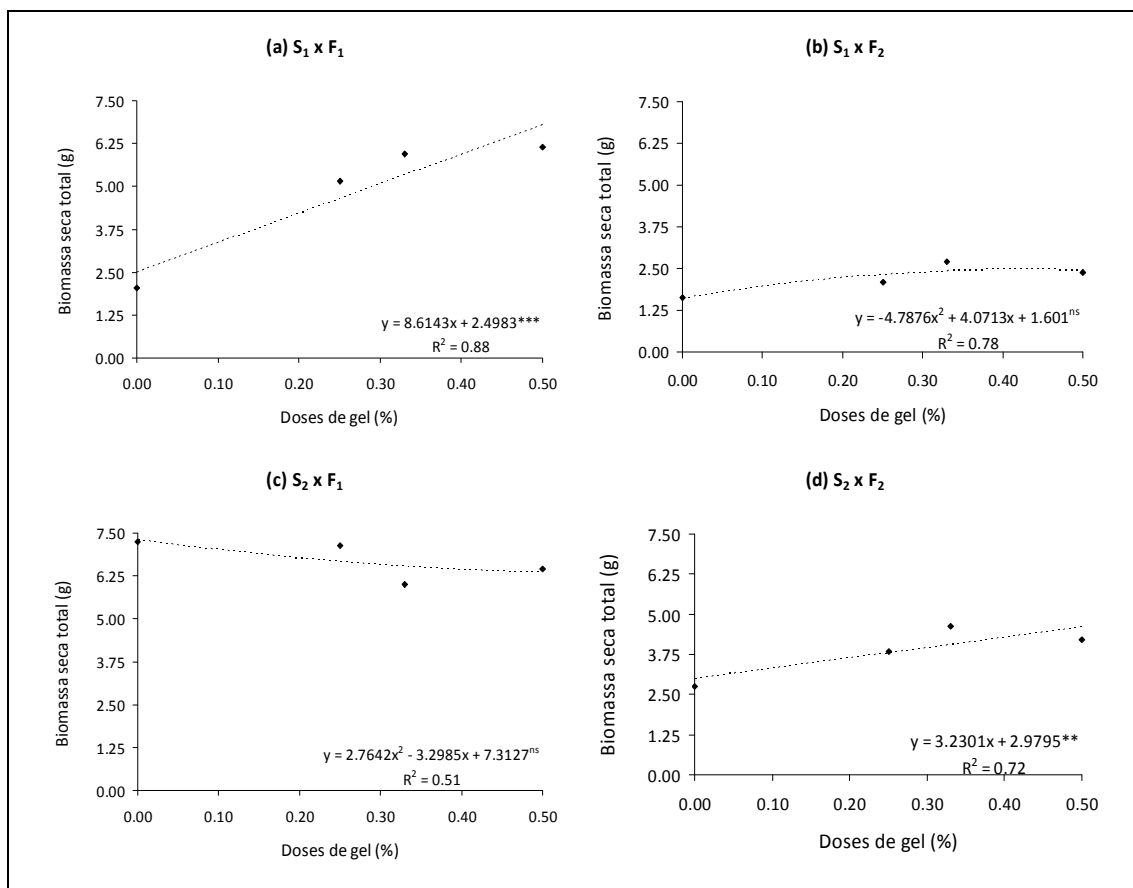
S_1 = solo argiloso; S_2 = solo arenoso; F_1 = irrigado a cada 2 dias; F_2 = irrigado a cada 5 dias. *** Significativo a 1% pelo teste F; ** Significativo a 5% pelo teste F; * Significativo a 10% pelo teste F; ^{ns} Não-significativo.

Figura 11 – Altura da planta (H) de plantas de eucalipto, em mm, em função das doses de hidrogel (D) para cada interação solo x freqüência de irrigação (SxF), em que (a) = ET em função de D para $S_1 \times F_1$; (b) = ET em função de D para $S_1 \times F_2$; (c) = ET em função de D para $S_2 \times F_1$; (d) = ET em função de D para $S_2 \times F_2$. Valores observados (♦) e valores ajustados (---).



S₁ = solo argiloso; S₂ = solo arenoso; F₁ = irrigado a cada 2 dias; F₂ = irrigado a cada 5 dias. *** Significativo a 1% pelo teste F; ** Significativo a 5% pelo teste F; * Significativo a 10% pelo teste F; ^{ns} Não-significativo.

Figura 12 – Biomassa seca da parte aérea (BSA) de plantas de eucalipto, em g, em função das doses de hidrogel (D) para cada interação solo x freqüência de irrigação (SxF), em que (a) = ET em função de D para S₁x F₁; (b) = ET em função de D para S₁x F₂; (c) = ET em função de D para S₂x F₁; (d) = ET em função de D para S₂x F₂. Valores observados (♦) e valores ajustados (---).



S₁ = solo argiloso; S₂ = solo arenoso; F₁ = irrigado a cada 2 dias; F₂ = irrigado a cada 5 dias. *** Significativo a 1% pelo teste F; ** Significativo a 5% pelo teste F; * Significativo a 10% pelo teste F; ^{ns} Não-significativo.

Figura 13 – Biomassa seca total (BST) de plantas de eucalipto, em g, em função das doses de hidrogel (D) para cada interação solo x freqüência de irrigação (SxF), em que (a) = ET em função de D para S₁x F₁; (b) = ET em função de D para S₁x F₂; (c) = ET em função de D para S₂x F₁; (d) = ET em função de D para S₂x F₂. Valores observados (♦) e valores ajustados (---).

Na Tabela 9, são apresentados os índices de mortalidade aos 15 e aos 45 dias de plantio, quando foi encerrado o experimento.

Tabela 9 – Índice de mortalidade das plantas no plantio em campo aberto, aos 15 e aos 45 dias após plantio

Dias após plantio	15		45	
	Nº	%	Nº	%
Plantas mortas	6	12,50	14	29,17

Conforme se observa na Tabela 10, os resultados com relação a mortalidade das plantas confirmam o observado na Primeira Fase, ainda que com índices bem inferiores àqueles encontrados lá. O solo arenoso apresentou melhores resultados tanto na presença como na ausência de hidrogel. Aos 15 dias após plantio, todas as plantas mortas correspondiam ao tratamento sem hidrogel e em solo argiloso.

Tabela 10 – Número de plantas mortas no plantio em campo aberto, em função dos tratamentos dose de gel (D), tipo e solo (S) e freqüência de irrigação (F)

Tratamento	15 dias	45 dias
D ₀	6	6
D ₁	0	3
D ₂	0	2
D ₃	0	3
S ₁	6	14
S ₂	0	0
F ₁	3	11
F ₂	3	3

¹D₁ = 0,25% (1,5 g de hidrogel para 600 ml de água); D₂ = 0,33% (2,0 g de hidrogel para 600 ml de água); D₃ = 0,50% (3,0 g de hidrogel para 600 ml de água); S₁ = solo argiloso; S₂ = solo arenoso; F₁ = irrigado a cada 2 dias; F₂ = irrigado a cada 5 dias.

4. CONCLUSÕES

Os resultados observados neste estudo permitem afirmar que o uso de polímeros hidroretentores, conhecidos como hidrogel ou gel, tem efeito positivo sobre a sobrevivência e crescimento das mudas de eucalipto em pós-plantio. A redução da evaporação pela adição do hidrogel disponibiliza um maior volume de água a planta, reduzindo o estresse devido ao transplantio e, desta forma, reduzindo a mortalidade das mesmas.

No plantio em casa de vegetação, a dose de hidrogel ótima encontrada, sob a qual se obteve menores valores de ET, foi de 0,30% (1,8 g de hidrogel para 600 ml de água), para o uso do produto pré-hidratado, como foi abordado no presente estudo.

No plantio fora da casa de vegetação, os resultados encontrados indicam que o uso do hidrogel é benéfico, mas não levam a conclusões definitivas, uma vez que não foi observada uma tendência entre as variáveis observadas.

Apesar de se ter observado estes benefícios, ainda é prematuro o estabelecimento de valores ideais para a utilização do hidrogel.

5. REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 308 p. (FAO Irrigation and Drainage, 56).

ALVES, M.E.B. **Disponibilidade e demanda hídrica na produtividade da cultura do eucalipto**. [s.d.] Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF**: ano base 2005. Brasília, 2006. 80 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2009**: ano base 2008. Brasília, 2009. 120 p.

BRUXEL, D.; SILVA, F.C.; LIMA, L.M.L.; LUZ, J.M.Q.; CARVALHO, J.O.M. Efeito de lâminas de irrigação e doses de um polímero hidroabsorvente sobre a produção de mudas de tomateiro grupo agroindustrial (2). **Horticultura Brasileira**, v. 20, n. 2, jul. 2002.

BUZETTO, F.A.; BIZON, J.M.C.; SEIXAS, F. **Avaliação de polímero adsorvente à base de acrilamida no fornecimento de água para mudas de *Eucalyptus urophylla* em pós-plantio**. Piracicaba: IPEF, 2002. 5 p. (Circular Técnica, 195).

CALLAGHAN, T.V.; ABDELNOUR, H.; LINDLEY, D.K. The environmental crisis in the Sudan: the effect of waterabsorbing synthetic polymers on tree germination and early survival. **Journal of Arid Environments**, n. 14, p. 301-317, 1988.

CALLAGHAN, T.V.; LINDLEY, D.K.; ALI, O.M.; ABDELNOUR, H.; BACON, P.J. The effect of water-absorbing synthetic polymers on the stomatal conductance, growth and survival of transplanted *Eucalyptus microtheca* seedlings in the Sudan. **Journal of Applied Ecology**, n. 26, p. 663-672, 1989.

GERVÁSIO, E.S. **Efeito de lâminas de irrigação e doses de condicionador, associadas a diferentes tamanhos de tubetes, na produção de mudas de cafeeiro**. 2003. 105 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

GONÇALVES, J.L.M.; WICHERT, M.C.P.; LEITE, R.; CAVAGLIERI, V.S.; TELLES, V.; VAZ, I.A.T. **Formas de aplicação de gel absorvente e seu efeito no crescimento inicial e sobrevivência de mudas de eucalipto em solos arenosos na região de Altinópolis-SP**. Piracicaba: PTSM-IPEF, 2004. 16 p. (Relatório de Pesquisa Ripasa. 2º Relatório Parcial do Projeto).

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

HUTTERMANN, A.; ZOMMORODI, M.; REISE, K. Addition of hydrogels to soil for prolonging the survival of *Pinus halepensis* seedlings subjected to drought. **Soil and Tillage Research**, n. 50, p. 295-304, 1999.

HYDROPLAN-EB. **Folha de informações técnicas: Hydroplan-EB/HyB**. Disponível em:<http://www.hydroplan-eb.com/i/ficha_tecnica_e_de_seguranca_HyB.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2009.

INOUE, M.T.; RIBEIRO, F.A. Fotossíntese e transpiração de clones de *Eucalyptus grandis* e *E. saligna*. **IPEF**, n. 40, p. 15-20, 1988.

KOBAYASHI, M.K. **Determinação do índice de estresse hídrico da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) por meio de termometria a infravermelho, e do fator de disponibilidade de água no solo, em lisímetro de pesagem**. 1996. 90 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

KOUPAI, J.A.; ESLAMIAN, S.S.; KAZEMI, J.A. Enhancing the available water content in unsaturated soil zone using hydrogel, to improve plant growth indices. **Ecohydrology and Hydrobiology**, v. 8, n. 1, p. 67-75, 2008.

MORAIS, O. **Efeito do uso de polímero hidrorretentor no solo sobre o intervalo de irrigação na cultura da alface (*Lactuca sativa* L.)**. 2001. 73 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

REZENDE, L.S. **Efeito da incorporação de polímeros hidroabsorventes na retenção de água de dois solos**. 2001. 74 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SACRAMENTO NETO, O.B. **Balanço hídrico em plantios jovens de eucalipto na região de Belo Oriente – MG**. 2001. 77 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SARVAŠ, M.; PAVLENDÁ, P.; TAKÁČOVÁ, E. Effect of hydrogel application on survival and growth of pine seedlings in reclamations. **Journal of Forest Science**, v. 53, n. 5, p. 204-209, 2007.

SIVAPALAN, S. Effect of polymer on soil water holding capacity and plant water use efficiency. In: AUSTRALIAN AGRONOMY CONFERENCE, 10, 2001, Hobart, Tasmania, Australia. **Proceedings...** Hobart, Tasmania: Australian Society of Agronomy, 2001.

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

STATSOFT INCORPORATION. **Statistica (data analysis software system), version 7**. Disponível em: <www.statsoft.com>. Acesso em: 2004.

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.

TITTONELL, P.A.; GRAZIA, J.; CHIESA, A. Adición de polímeros superabsorventes en el medio de crecimiento para la producción de plantines de pimiento. **Horticultura Brasileira**, v. 20, n. 4, 2002.

VALE, G.F.R.; CARVALHO, S.P.; PAIVA, L.C. Avaliação da eficiência de polímeros hidrorretentores no desenvolvimento do cafeeiro em pós-plantio. **Coffee Science**, v. 1, n. 1, p. 7-13, 2006.

VALLONE, H.S. **Produção de mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) em tubetes com polímero hidroretentor, diferentes substratos e adubações.** 2003. 75 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

CAPÍTULO 2
ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE CULTURA DO EUCALIPTO
CULTIVADO SOB IRRIGAÇÃO NA REGIÃO DO RIO DOCE, MG

1. INTRODUÇÃO

A região tropical é apontada como um dos principais fornecedores de madeira no futuro, levando em conta sua alta disponibilidade energética e a possibilidade de ciclos culturais florestais em torno dos sete anos, bem menores do que em regiões temperadas (HUNTER, 2001). Desta forma, o Brasil vem se tornando um dos maiores produtores mundiais de madeira e subprodutos oriundos de florestas plantadas. O clima tropical predominante, que contribui para que as plantações florestais apresentem altas taxas de crescimento vegetativo, a grande extensão territorial, a disponibilidade de mão-de-obra e de técnicas inovadoras são fatores que favorecem a expansão do setor, gerando emprego e renda ao país (GATTO, 2005).

A expansão da área cultivada tem sido impulsionada pelo aumento da demanda de madeira que passará de 145 para 220 milhões de m³/ano até 2020 (LEITE, 2005). Esta tendência tem sido comprovada pelo aumento de 4,38% da

área com florestas plantadas em 2008, em relação a 2007, acumulando um total de 6,1 milhões de hectares, de acordo com dados da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas – ABRAF (2009). Desta forma, o setor de florestas plantadas no Brasil desempenha um papel fundamental no cenário socioeconômico do país, ao contribuir com a produção de bens e serviços, agregação de valor aos produtos florestais e para a geração de empregos, divisas, tributos e renda.

Das espécies florestais, as do gênero *Eucalyptus* têm sido as mais plantadas nas diversas regiões brasileiras, devido ao seu rápido crescimento e à alta capacidade de produção de madeira, oriundas da grande adaptação a uma diversidade de condições ecológicas e ao número expressivo de espécies (AMARAL, 2000).

Apesar de todo este crescimento e importância econômica, existe uma controvérsia histórica sobre o papel desempenhado pelo eucalipto com relação ao uso e à disponibilidade de água das bacias de drenagem onde são plantados. Duas questões freqüentemente abordadas são a de que o eucalipto provoca rápido ‘secamento’ do solo e as perdas de biodiversidade ecológica em relação ao ecossistema original (ALMEIDA; SOARES, 2003). Segundo Calder (1992 *apud* MIELKE et al., 1999 e LIMA, 1996), o manejo de plantios de rápido crescimento requer um conhecimento preciso dos padrões de demanda ao longo da rotação de um sítio de plantio específico para a utilização ótima da água disponível, evidenciando, portanto, a necessidade de estudos sobre o uso da água por plantações de eucalipto.

A fim de atender à demanda projetada, as universidades e instituições de pesquisa, associadas às empresas florestais, têm desenvolvido pesquisas para o aumento da produtividade das plantações florestais. Investimentos têm sido aplicados no melhoramento genético e clonagem, preparo do solo e nutrição das árvores e, mais recentemente, com a introdução experimental da prática de fertilização associada à irrigação (TOMAZELLO FILHO, 2006).

Estabelecer relações entre consumo de água pela cultura do eucalipto e a disponibilidade de água no solo pode contribuir na predição do potencial produtivo dos plantios florestais.

Vários trabalhos relacionam a disponibilidade de água à produtividade da cultura e evidenciam os efeitos positivos de um maior suprimento hídrico à mesma. Estas relações são estabelecidas sob diversos parâmetros, a saber: incremento médio anual (IMA), produção de biomassa, qualidade da madeira, transpiração, mudanças nas propriedades do solo, época de corte e, inclusive, sua maior ou menor capacidade em seqüestrar carbono, entre outros fatores (TONELLO; TEIXEIRA FILHO, 2007; STAPE et al., 2004a e 2004b; MAESTRI et al., 2004; TOMAZELLO FILHO, 2006; SILVA, 2006; SOUZA et al., 2006; STAPE et al., 2008).

As distintas condições climáticas às quais a cultura está exposta nas diversas regiões em que é feito seu cultivo influenciam na sua produtividade e duração do ciclo. Considerando esta observação, Calder (1998) relata que o uso de água pelas florestas varia sensivelmente entre regiões temperadas e tropicais e entre zonas úmidas e secas destas regiões.

No entanto, por se tratar de uma cultura tradicionalmente de sequeiro, por diversas razões, entre elas sua rusticidade e o alto custo envolvido na implantação de sistemas de irrigação em função das dimensões das áreas de plantio (milhares de hectares), além das questões ambientais que remontam ao antigo mito de que o eucalipto 'seca' o solo e chegam à grande quantidade de água necessária para irrigar áreas tão extensas, ainda se faz necessário quantificar as necessidades hídricas da cultura. Esta quantificação auxiliaria não somente no caso da implantação de sistemas de irrigação, como também e, talvez principalmente, na escolha de regiões que ofereçam melhores condições ao desenvolvimento da cultura no que diz respeito ao regime pluviométrico.

Sabe-se que, para a determinação das necessidades hídricas das culturas, levam-se em conta o clima, os modelos de exploração e a intensidade

de cultivo, o meio ambiente, a disponibilidade de água, a fertilidade do solo, os métodos e as práticas de cultivo e as regas. Como são difíceis e trabalhosos os procedimentos utilizados na avaliação direta do aproveitamento da água pelas culturas, no campo, foram desenvolvidos diversos métodos para a estimativa das necessidades hídricas da cultura (DOORENBOS; PRUITT, 1977).

A evapotranspiração (ET) é a principal exigência de água das culturas agrícolas. Sua quantificação é necessária para não só para fins de projeto e dimensionamento de sistemas de irrigação como para sistemas operacionais de recursos hídricos, para a realização de balanços hídricos e para a realização de análises hidrológicas (ALLEN et al., 2007).

A quantidade de água requerida para compensar a perda por evapotranspiração da cultura (ET_c) se define como necessidades de água da cultura. Apesar dos valores da ET_c e das necessidades de água da cultura serem idênticos, suas definições conceituais são diferentes. As necessidades de água da cultura se referem a quantidade de água que necessita ser fornecida a cultura por meio da irrigação ou chuva, enquanto que a ET_c se refere a quantidade de água perdida por meio da evapotranspiração (ALLEN et al., 1998). Desta forma, é usual a determinação das necessidades hídricas da cultura por meio da estimativa ou medição da ET_c , variando conforme a espécie cultivada, o estágio e condições de desenvolvimento da cultura e o clima do ambiente.

A ET_c pode ser calculada a partir dos dados climáticos e integrando diretamente os fatores de resistência do cultivo, o albedo e a resistência do ar no enfoque de Penman-Monteith. Devido ao fato de existir uma considerável falta de informação para as diferentes culturas, o método de Penman-Monteith é utilizado somente para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o). A relação ET_c/ET_o , que pode ser determinada experimentalmente para diferentes cultivos, é conhecida como coeficiente de cultura (K_c), e é utilizado para relacionar ET_c à ET_o conforme a equação 1 (ALLEN et al., 1998). O coeficiente de cultura (K_c) integra as características da cultura (varia de

acordo com a fase fenológica) e o clima local à estimativa de ET_c (DOORENBOS; PRUITT, 1977).

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (1)$$

em que ET_c é evapotranspiração da cultura, adimensional; ET_o , evapotranspiração de referência, adimensional; e K_c , coeficiente da cultura, adimensional.

De acordo com Allen et al. (1998), a maioria dos efeitos meteorológicos se encontra incorporada na estimativa de ET_o . Portanto, enquanto ET_o representa um indicador da demanda climática, o valor de K_c varia principalmente em função das características particulares da cultura, variando somente uma pequena proporção em função do clima. Isto permite a transferência de valores padrão do K_c entre distintas áreas geográficas e climas, constituindo a razão principal da aceitação geral e da utilidade da metodologia do coeficiente de cultura.

Doorenbos e Pruitt (1977) e Doorenbos e Kassan (1979) reuniram grande quantidade de informações a respeito das necessidades hídricas das culturas, apresentando amplo estudo sobre K_c na maioria das espécies cultivadas comercialmente. No entanto, valores de K_c são frequentemente estabelecidos visando à estimativa da evapotranspiração de culturas irrigadas, dificultando a obtenção na literatura de valores para espécies florestais, como o eucalipto, por exemplo.

Neste contexto, visando a estimativa de ET_c para o cálculo do balanço hídrico de coberturas vegetais, como floresta nativa, cerrado e espécies florestais, Viola (2008) utilizou uma aproximação dos valores de K_c , empregando resultados de alguns estudos associados ao consumo de água dessas espécies, descritos na literatura. No caso do eucalipto, o autor utilizou em seu trabalho o valor de K_c igual a 1,0 proposto por David et al. (1986).

Agra e Helfer (2006) afirmam que as relações entre as necessidades hídricas máximas de espécies florestais exóticas e o consumo de culturas referenciais (K_c) são pouco conhecidas. Assim, estes autores utilizaram uma compilação de informações obtidas em diversos trabalhos (ALMEIDA; SOARES, 2003; LIMA; FREIRE, 1976; ALMEIDA; SOARES, 2003; SOARES et al., 1999; BRUN; SCHUMACHER, 2006; SILVA et al., 2004; LIMA et al., 1990; MENDES et al., 2006) que permitiu assimilar um coeficiente apropriado para seu estudo, condizente com o consumo de água de espécies florestais, considerando, então, o K_c de espécies florestais = 1,5. Os autores salientam que as informações disponíveis nos estudos relacionados, em sua maioria, apresentam os valores da evapotranspiração real (e não potencial) das espécies em estudo. Diante disto, não se tem, ao certo, o consumo potencial das espécies florestais, que é o dado fundamental na estimativa do coeficiente de cultura (K_c), destacando, portanto, que este valor é considerado elevado, o que, de certa forma, agregou maior margem de segurança nos resultados do estudo citado.

Com base em resultados apresentados por Soares e Almeida (2001) e Soares et al. (2001), há uma indicação de que o K_c do eucalipto estaria em torno de 1,0 na fase adulta, uma vez que estes autores observaram em suas avaliações que há um equilíbrio entre a evapotranspiração e a precipitação de plantações de eucalipto no Estado do Espírito Santo, Brasil, em anos em que chove em torno da média histórica da região (~1.350 mm). Além disto, estes autores constataram que plantações de eucalipto (*E. grandis*) exercem bom controle estomático sobre a perda de água por transpiração. Ao final da estação seca, as taxas de transpiração eram cinco vezes menores que aquelas que ocorrem no verão úmido em dias claros.

Diferentemente de espécies anuais, cujo consumo de água varia com o estágio de desenvolvimento (geralmente, é mínimo no início e no fim do ciclo, e máximo no período de enchimento de grãos), em espécies florestais pode-se considerar constante a necessidade de água a partir do estabelecimento da

plantação, quando as espécies adquirem a máxima área foliar. Sacramento Neto (2001) afirma que as perdas de água no solo por evaporação durante o primeiro ano de crescimento do eucalipto serão mais acentuadas, haja vista que, nesta idade não há quedas de folhas, o que protegeria o solo da ação direta do vento e da radiação solar que são elementos que atuam diretamente no processo de evaporação. Por outro lado, Mielke et al. (1999) comentam que a evapotranspiração de um povoamento florestal é função da energia radiante disponível, umidade atmosférica, velocidade do vento e resistência imposta pela vegetação, e que em estandes florestais já estabelecidos a transpiração das árvores pode responder por mais de 90% das perdas por evapotranspiração.

Uma peculiaridade com relação a espécies florestais, no que tange às taxas de transpiração, é comentada por Lima (1996), quando este autor cita diversos trabalhos (ROBERTS, 1983; JARVIS, 1986; SMITH et al., 1974; DUNIN; MACKAY, 1982; PILGRIN et al., 1982; LIMA; FREIRE, 1976) em que é relatada a similaridade entre as espécies, tanto coníferas como latifoliadas, quanto ao consumo de água, ainda que apresentem diferenças quanto ao índice de área foliar (IAF), estas espécies apresentam similaridade em outros aspectos fisiológicos importantes no processo de transpiração, tais como o controle estomático e o coeficiente de desacoplamento.

Allen et al. (1998) apresentam duas maneiras de se estimar o coeficiente de cultura, a primeira em que os efeitos da transpiração da cultura e da evaporação do solo são combinados em um K_c único e a segunda em que estes efeitos são determinados separadamente, se utilizando dois coeficientes: o coeficiente basal da cultura (K_{cb}) para descrever a transpiração da planta e o coeficiente de evaporação da água do solo (K_e) para descrever a evaporação que ocorre na superfície do solo, de forma que o K_c seja representado conforme equação 2, chamado K_c *dual*.

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (2)$$

em que K_c é coeficiente da cultura, adimensional; K_{cb} , coeficiente de cultura basal, tabelado por fase fenológica, adimensional; K_e , coeficiente de evaporação de água do solo, adimensional.

O K_{cb} se define como a relação entre a ET_c e a ET_o quando a superfície do solo se encontra seca mas a transpiração mantém sua taxa potencial, ou seja, quando a transpiração não é limitada pela água do solo. Este termo inclui, ainda, a evaporação residual produzida pela difusão da água do solo que se encontra embaixo da superfície seca do terreno. A definição do K_{cb} se dá em função das fases de desenvolvimento da cultura, havendo quatro fases (inicial, desenvolvimento, médio e final) e quatro K_{cb} por cultura (tal como o K_c único).

O componente de evaporação (K_e) varia diariamente de acordo com a umidade na camada superficial do solo. Já o componente de transpiração possui comportamento mais estável, sendo tabelado em faixas de variação para cada fase do ciclo da cultura (tal como o K_c único). O cálculo do K_c dual possibilita maior acurácia, uma vez que o K_e varia muito, de acordo com os elementos meteorológicos e a umidade da superfície do solo, sobretudo em estações chuvosas e utilizando irrigação em área total.

O uso de planilhas aumenta a praticidade para realizar o cálculo diário do K_c dual, uma vez que requer o balanço hídrico diário nos primeiros 10 a 15 cm de profundidade, camada em que ocorre o processo evaporativo, necessário para determinação do coeficiente de evaporação (K_e). O K_e possui peso maior na determinação do K_c durante a fase inicial da cultura, momento em que o solo se apresenta exposto e a capacidade transpirométrica da cultura está reduzida. Durante a fase inicial, caso haja chuva ou irrigação freqüente (típico para irrigação localizada), o componente de evaporação se eleva, promovendo um substancial aumento do K_c . A partir do pleno desenvolvimento vegetativo e em razão do sombreamento do solo e da maior capacidade transpirométrica da cultura, o K_e torna-se menos representativo na formação do K_c dual, sendo o K_{cb} preponderante na definição daquele.

Pode-se afirmar que o K_c *dual* propicia condições de ajustes finos no cálculo da necessidade hídrica das culturas, sobretudo na fase inicial, em culturas que expõem o solo por um período maior e em cultivos irrigados com pequeno turno de rega (irrigação localizada), situações essas em que o componente de evaporação tende a se elevar, aumentando a possibilidade de erro, no caso de uso do K_c (MOREIRA, 2002).

Estudos de K_c *dual* realizados em condições edafoclimáticas brasileiras são escassos, embora importantes para possibilitar uma avaliação sobre a precisão do uso de K_c único e, talvez, contribuir para ajustá-los.

O procedimento do K_c *dual* é preferível para os casos de programação de irrigação em tempo real, para os cálculos de balanço de água no solo e para atividades de pesquisa onde sejam importantes os efeitos das variações diárias de umedecimento do perfil do solo e seu impacto resultante no valor diário de ET_c .

Allen et al. (1998) afirmam que o procedimento do K_c *dual* permite calcular o incremento real do valor de K_c , que ocorre em cada dia, em função do desenvolvimento da planta e do umedecimento da superfície do solo. Os autores acrescentam que a maior diferença entre os valores de K_c e K_{cb} ocorre na etapa inicial de crescimento da cultura, quando a evapotranspiração é constituída principalmente pela evaporação do solo e a transpiração da cultura é relativamente pequena. Quando a cobertura do solo for completa ou quase completa, durante a etapa de crescimento média do ciclo de cultivo, a evaporação que ocorre por baixo da vegetação terá um efeito menor na evapotranspiração da cultura, assim o valor de K_{cb} , nesta etapa, será similar ao valor de K_c .

Diante disto, a proposta deste trabalho foi determinar as necessidades hídricas da cultura do eucalipto irrigado, na região do Rio Doce, MG, tendo como referência a estimativa do coeficiente dual de cultura (K_c *dual*).

2. MATERIAL E MÉTODOS

O coeficiente dual de cultura (K_c dual) da cultura do eucalipto foi estimado com base nos dados levantados na área experimental instalada no município de Santana do Paraíso, Estado de Minas Gerais, localizado a 19°18'23"S, 42°22'46"W e 220 m de altitude, na bacia do Rio Doce, em áreas da Celulose Nipo Brasileira (CENIBRA S.A.).

2.1. Área experimental

O plantio da área experimental foi realizado em 17 de outubro de 2001, composto por plantas oriundas de quatro materiais genéticos clonais de eucalipto: três clones de *Eucalyptus grandis* (57, 129 e 2719) e um híbrido clonal de *E. grandis* x *E. urophylla*, "urograndis" (1215), plantadas em espaçamento de 3 x 3,33 m,

A área foi irrigada por meio de um sistema de irrigação por gotejamento, composto de gotejadores autocompensantes, com vazão de 2,3 L/h e espaçamento de 0,75 m entre emissores. A demanda de água foi estimada a partir da evapotranspiração de referência – ET_o , determinada pelo método

padrão de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), tendo sido considerada a demanda máxima de 5 mm/dia no período de maior evapotranspiração.

A precipitação média anual da região é de 1.200 mm, a temperatura média anual de 25,2°C e a umidade relativa média de 65,2%. Os dados climáticos da área experimental foram obtidos por meio de uma estação climatológica localizada na região de Belo Oriente, próxima ao experimento, e consistiram de dados diários de precipitação pluvial, temperatura máxima, média e mínima, umidade relativa do ar, radiação solar global e velocidade do vento, para o período de outubro de 2001 a junho de 2008 (Tabela 1), período de condução do experimento.

Tabela 1 – Dados climáticos médios mensais referentes ao período de outubro de 2001 a agosto de 2008 de estação próxima à área experimental

Mês	Precipitação (mm)	Temperatura	Temperatura	Temperatura	Radiação global (MJ/m ² ·dia)
		média	máxima	mínima	
----- °C -----					
Jan.	190,3	25,2	31,5	21,2	19,3
Fev.	202,1	25,3	31,9	20,9	20,6
Mar.	131,2	25,1	31,6	20,9	19,4
Abr.	77,3	23,9	30,5	19,9	16,4
Mai	25,2	21,4	28,5	16,8	14,1
Jun.	11,8	19,9	27,6	14,9	13,0
Jul.	9,6	19,5	27,5	13,8	13,6
Ago.	8,9	20,9	28,7	15,1	15,5
Set.	38,9	22,3	29,1	16,9	15,5
Out.	62,9	24,5	31,4	19,3	18,7
Nov.	183,1	24,5	30,5	20,5	17,2
Dez.	305,3	24,9	31,2	20,9	21,0

O solo da área experimental, localizada na posição de encosta, é classificado como Cambissolo Háplico (MENEZES, 2005). Foram realizadas análises químicas e físicas em amostras de solos coletadas nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm antes da instalação do experimento. Para a definição da capacidade de retenção de água foram determinadas as umidades na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PM) em cada horizonte do perfil do solo (A, AB, Bi1, Bi2 e C), apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Retenção de água do perfil do solo da área experimental

Horizonte	Profundidade (cm)		----- m ³ /m ³ -----		
	Inicial	Final	CC ¹	PM ¹	Água disponível
A	0	10			
AB	10	20	0,290	0,208	0,082
Bi1	20	90	0,351	0,248	0,103
Bi2	90	145	0,324	0,235	0,089
C	145	>	0,319	0,231	0,088

¹ Umidades do solo na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PM).

Apesar de o experimento ter sido conduzido durante todo o ciclo da cultura, de outubro de 2001 a junho de 2008, foi considerado para estimativa do K_c *dual* o período de um ano e meio (545 dias) a partir do plantio. O regime pluviométrico e as lâminas de irrigação aplicadas durante o período considerado são apresentados na Figura 1.

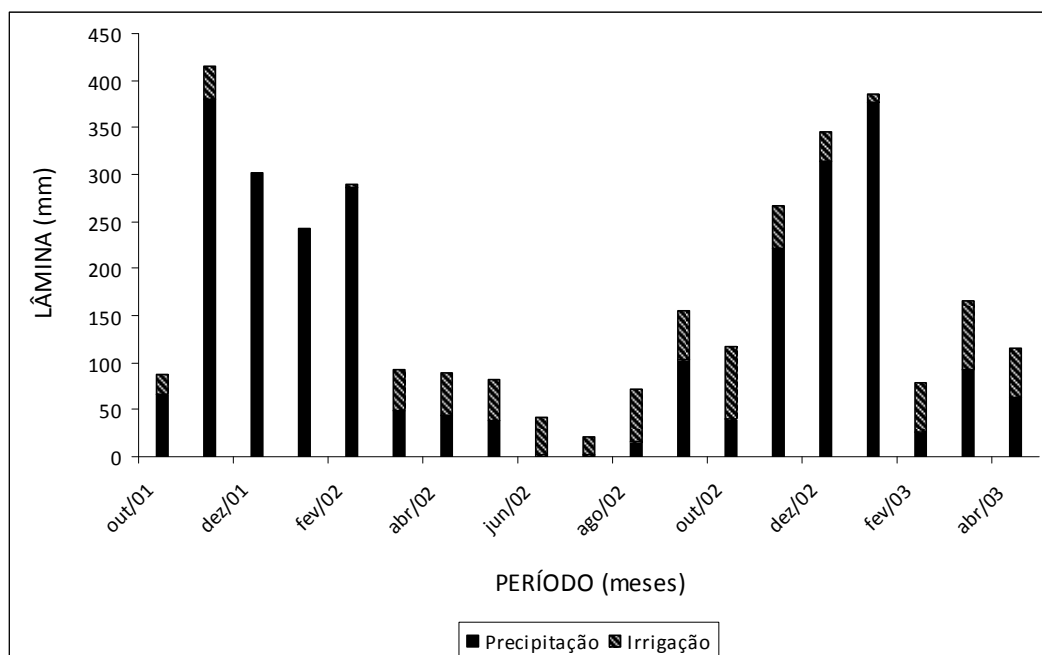


Figura 1 – Regime pluviométrico e lâminas de irrigação aplicadas ao solo em plantio de Eucalyptus na região do Rio Doce, MG.

2.2. Estimativa do coeficiente de cultura dual (K_c dual)

Para a estimativa do K_c dual, utilizou-se a metodologia proposta por Allen et al. (1998), que propõem uma rotina de cálculo seguindo os passos descritos a seguir.

2.2.1. Estimativa do coeficiente basal de cultura (K_{cb})

O primeiro passo para a estimativa do K_{cb} foi a definição da duração das fases de crescimento da cultura, sendo elas: fase inicial, de desenvolvimento, média e final. Em seguida, foi feita a seleção de valores de K_{cb} (Tab) para as fases inicial, média e final de crescimento da cultura sugeridos por Allen et al. (1998). Estes autores apresentam valores tabelados de K_{cb} para diversas culturas. No entanto, estes valores foram determinados para climas subúmidos ($UR \approx 45\%$) e

com velocidades de vento moderadas ($u_2 \approx 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Para condições climáticas diferentes desta, como é o caso da região na qual se baseou este trabalho, foi necessário ajustar os valores de $K_{cb(Tab)}$. Este ajuste foi feito utilizando a equação 3.

$$K_{cb} = K_{cb(Tab)} + [0,04 \times (u_2 - 2) - 0,004 \times (UR_{\min} - 45)] \times \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (3)$$

em que K_{cb} é coeficiente de cultura basal, tabelado por fase fenológica, adimensional; $K_{cb(Tab)}$, valor de K_{cb} tabelado, sugerido por Allen et al. (1998), adimensional; u_2 , velocidade do vento média diária, a 2 m de altura ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); UR_{\min} , umidade relativa mínima média diária (%); e h , altura da planta (m).

Devido ao fato de não existirem valores de $K_{cb(Tab)}$ para a cultura do eucalipto, foram feitas algumas considerações para que se pudesse estimar o K_{cb} do eucalipto nas condições estudadas que são apresentadas na Tabela 3 juntamente com as durações das fases de crescimento da cultura e os respectivos $K_{cb(Tab)}$, considerados como referência para o presente trabalho.

Assim, de acordo com as observações feitas na Tabela 3, considerou-se o limite final da fase de desenvolvimento e inicial da fase média quando o índice de área foliar (IAF) chegou a 3, valor este atingido um ano após o plantio, de acordo com dados apresentados por Lourenço (2009), que apresentou valores de IAF ao longo do ciclo da cultura avaliando esta variável para o mesmo povoamento florestal aqui estudado. Já a definição do início da fase final se deu com base no incremento médio anual (IMA) máximo observado, uma vez que acredita-se que o início da senescência para a cultura do eucalipto se dá no momento em que o IMA atinge seu valor máximo, momento em que começa a ocorrer uma mortalidade mais intensa do povoamento florestal (SOARES, informação pessoal). Assim, conforme indicado na Figura 2, o valor máximo de IMA foi atingido aos 67 meses, aproximadamente no 1920º dia após o plantio.

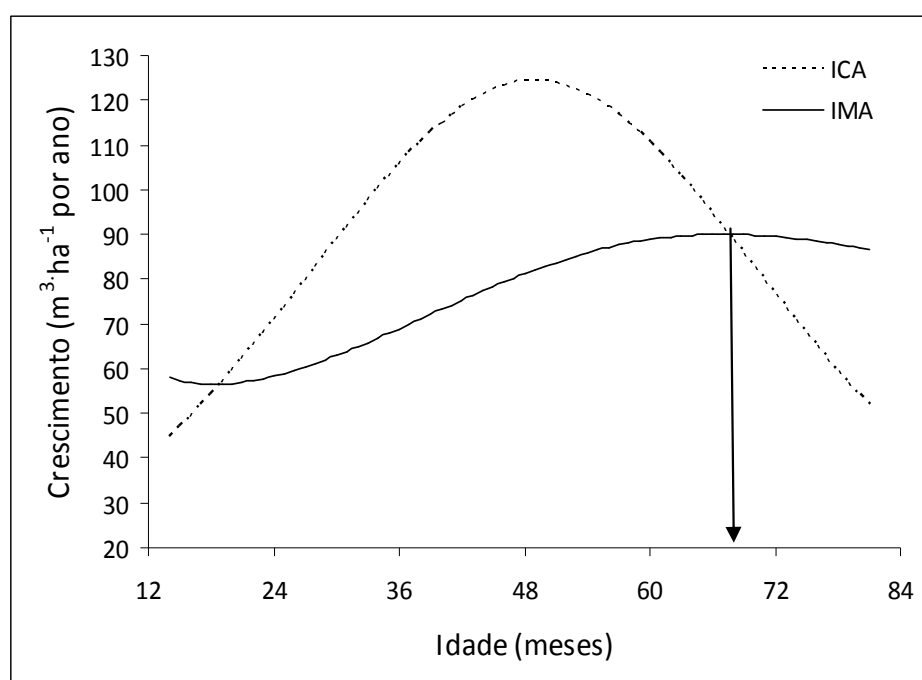
Tabela 3 – Duração das fases de crescimento da cultura do eucalipto e valores de $K_{cb(Tab)}$

Fase de crescimento	Duração da fase ¹ (dias)	$K_{cb(Tab)}$	Observações ²
Inicial	180	0,20	Valor de $K_{cb(Tab)}$ sugerido para cultivo perene com superfície do solo exposta.
Desenvolvimento	185	-	
Média	1920	0,95	Valor de $K_{cb(Tab)}$ sugerido para coníferas.
Final	153	0,95	Valor de $K_{cb(Tab)}$ sugerido para coníferas.

¹ A definição da duração das fases de crescimento seguiram as condições propostas no Boletim FAO 56 (ALLEN et al., 2006) associadas às características da cultura do eucalipto no presente estudo, considerando assim:

- Fase Inicial: do plantio até alcançar 10% de cobertura do solo.
- Fase de Desenvolvimento: de 10% de cobertura do solo até fechamento do dossel ou até o IAF (índice de área foliar) atingir o valor igual a 3.
- Fase Média: fechamento do dossel ou IAF = 3 até início da senescência.
- Fase Final: início da senescência até a colheita/corte ou completa senescência.

² Considerações sugeridas no Boletim FAO 56 (ALLEN et al., 2006).



Fonte: Adaptado de Lourenço (2009).

Figura 2 – Incremento corrente anual (ICA) e incremento médio anual (IMA) da cultura do eucalipto cultivada sob irrigação, na região do Rio Doce, MG, com destaque para a época que ocorreu o IMA máximo.

Decidiu-se estimar o K_c *dual* apenas para os primeiros 545 dias do ciclo da cultura devido às considerações feitas a seguir: segundo Allen et al. (1998), os valores de $K_{cb(Tab)}$ sugeridos para as fases de crescimento médio e final devem ser utilizados apenas para os valores máximos de altura da cultura para os quais foram estabelecidos, no caso, para coníferas (cultura usada como referência neste estudo) esta altura máxima é equivalente a 10 m. Com base nesta limitação e considerando aspectos abordados na literatura com relação às melhores condições de ajuste propiciadas pelo K_c *dual* na fase inicial (MOREIRA, 2002) e, ainda que, de acordo com Agra e Helfer (2006), em espécies florestais pode-se considerar constante a necessidade de água a partir do estabelecimento da plantação, quando as espécies adquirem a máxima área foliar, adotou-se o período de estimativa do K_c *dual* quando a altura das plantas atingiu o valor de 12,0 m, coincidindo com a idade de um ano e meio (545 dias) após o plantio. Desta forma, esta estimativa foi feita para as fases de crescimento da cultura chamadas fase inicial, fase de desenvolvimento e os primeiros seis meses da fase média.

Foram utilizados dados diários de velocidade do vento (u_2) e de umidade relativa mínima (UR_{min}) obtidos na estação meteorológica local, cujos valores máximos e mínimos foram, respectivamente, de $0,62 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $0,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para u_2 e 94,80% e 20,85% para UR_{min} , durante o período estudado.

Os dados diários de altura da planta foram obtidos pelo ajuste dos valores observados obtidos por meio de medidas feitas em intervalos de tempo irregulares. O modelo que apresentou melhor ajuste foi o Logistic Model ($\hat{Y} = a/(1 + be^{-cX})$), sendo a , b e c os parâmetros da equação, cuja curva é apresentada na Figura 3. Assim, com base nestes dados, foram determinados os valores de K_{cb} diários.

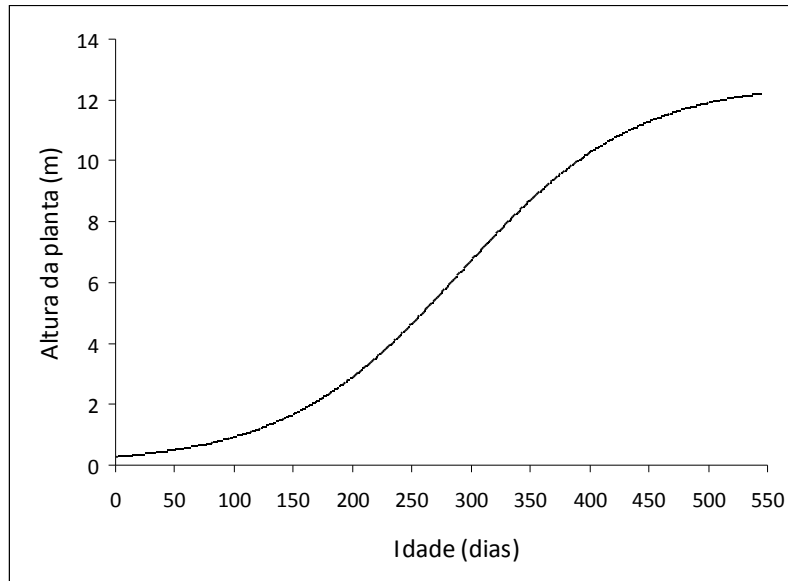


Figura 3 – Valores médios diários de altura de plantas de eucalipto em função da idade, conduzidas sob irrigação, na região do Vale do Rio Doce, MG, ajustados segundo equação $\hat{y} = \frac{12,59}{1 + 50,09 \times e^{-0,013x}}$, $R^2 = 0,998$.

2.2.2. Estimativa do coeficiente de evaporação do solo (K_e)

O K_e foi definido pela seguinte equação:

$$K_e = K_r \times (K_{c_{\max}} - K_{cb}) \leq f_{ew} \times K_{c_{\max}} \quad (4)$$

(o menor entre os dois termos da equação)

em que K_e é coeficiente de evaporação de água do solo, adimensional; $K_{c_{\max}}$, máximo valor de K_c após chuva ou irrigação, adimensional; K_r , coeficiente de redução da evaporação, dependente do acúmulo de lâmina de água evaporada da superfície do solo e definido diariamente, adimensional; e f_{ew} , fração do solo exposta e molhada, em %.

A evaporação ocorre predominantemente na fração exposta do solo e, conseqüentemente, a evaporação é restrita pela energia disponível na fração exposta. Por isso, K_e não pode exceder $f_{ew} \times K_{c\ max}$ (segundo termo da equação).

Para o cálculo diário do K_e , então, foi necessário seguir três passos: cálculo do $K_{c\ max}$, cálculo do K_r e cálculo de f_{ew} .

O $K_{c\ max}$ representa o limite máximo da evapotranspiração de qualquer superfície cultivada, variando dentro da faixa de 1,05 a 1,30 e foi calculado pela equação 5.

$$K_{c\ max} = \max \left\{ \left[1,2 + [0,04 (u_2 - 2) - 0,004 (UR_{min} - 45)] \times \left(\frac{h}{3} \right)^{0,3} \right], \{K_{cb} + 0,05\} \right\} \quad (5)$$

Os valores de u_2 , UR_{min} e h , utilizados nesta equação foram os mesmos utilizados para a estimativa do K_{cb} (equação 3).

O coeficiente de redução da evaporação do solo (K_r) foi calculado diariamente, sendo definido em dois estádios. No primeiro estádio, a energia incidente é que limita a evaporação, pois a superfície está molhada (após chuva ou irrigação); nesse estágio, o K_r é igual a 1. Quando a água contida na superfície do solo se torna limitante para o processo evaporativo, o K_r decresce e torna-se zero quando a quantidade total de água evaporável da superfície do solo se extingue. No segundo estádio, o K_r foi calculado a partir da equação 6.

$$K_r = \frac{TEW - D_{e,i-1}}{TEW - REW} \quad (6)$$

em que TEW é lâmina d'água total evaporável da camada superficial do solo, em mm; $D_{e,i-1}$, lâmina d'água acumulada evaporada da camada superfície do solo ao final do dia anterior ($i-1$), em mm; e REW , lâmina d'água evaporável no

primeiro estágio (quando $K_r=1$) variando de 8 a 12 mm, de acordo com a textura do solo (arenoso a argiloso, respectivamente), em mm.

A lâmina total evaporável da camada superficial (TEW) é dependente dos limites de água disponível do solo e da profundidade da superfície do solo que perde água por meio da evaporação, ou seja:

$$TEW = \frac{(CC - 0,5PM)}{10} \times Z_e \quad (7)$$

em que CC é a capacidade de campo, em %; PM , ponto de murcha permanente, em %; Z_e , profundidade da superfície solo sujeita à evaporação, em cm (10 a 15 cm).

O termo REW foi estimado pela equação 8, a seguir:

$$REW = \frac{(CC - PM)}{10} \times Z_e \quad (8)$$

A lâmina d'água acumulada evaporada da camada superficial do solo ao final do dia anterior, $D_{e,i-1}$, foi determinada a partir do balanço hídrico diário da camada superficial do solo com objetivo de determinar a lâmina acumulada de evaporação. Este balanço foi determinado por meio da equação 9.

$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - (P_i - RO_i) - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_i}{f_{ew}} + T_{ew,i} + DP_{e,i} \quad (9)$$

em que $D_{e,i}$ é lâmina d'água acumulada evaporada da camada superficial do solo ao final do dia i , em mm; e P_i , precipitação no dia i , em mm; RO_i , escoamento superficial no dia i , em mm; I_i , lâmina de irrigação no dia i , em mm; E_i , evaporação no dia i (equação 9), em mm; $T_{ew,i}$, lâmina transpirada na

fração exposta e umedecida da superfície do solo no dia i , em mm; $DP_{e,i}$, perdas por percolação profunda no dia i (equação 10), em mm.

Para iniciar o balanço hídrico diário, assumiu-se que havia esgotado toda água evaporável da camada superficial do solo, considerando o valor inicial de $D_{e,i-1} = TEW$.

Os termos E_i e $DP_{e,i}$, são dados pelas equações 10 e 11.

$$E_i = K_e \times ET_o \quad (10)$$

$$DP_{e,i} = (P_i - RO_i) + \frac{I_i}{f_w} - D_{e,i-1} \quad (11)$$

O termo $T_{ew,i}$ foi considerado 0 (zero) com base nas observações feitas por Allen et al. (1998) de que a transpiração ocorrida na camada evaporante do solo é pequena e pode ser ignorada.

Os valores de P_i foram obtidos na estação meteorológica local e de I_i correspondem às lâminas aplicadas a cultura no decorrer do período estudado. As lâminas totais de precipitação (P) e irrigação (I) foram 2663,8 mm e 702,0 mm, respectivamente, sendo os valores mensais aqueles apresentados na Figura 1.

A fração exposta e molhada da superfície (f_{ew}) define a percentagem da área de cultivo mais susceptível ao processo evaporativo e foi calculada pela equação 12:

$$f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w) \quad (12)$$

em que f_c é a fração média de solo coberto; $1 - f_c$, fração média de solo exposto e não coberto (ou sombreado) por vegetação, variando de 0,01 a 1; e f_w , fração da superfície do solo molhada pela irrigação ou precipitação, variando de 0,01 a 1.

2.2.3. Determinação do coeficiente de cultura (K_c)

Determinou-se o valor de K_c pelo somatório de K_{cb} mais K_e , conforme equação 2.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de K_{cb} , K_e e K_c estimados são apresentados na Figura 4. Observou-se que os valores de K_c atingiram valores superiores a 1,00 na fase inicial de crescimento da cultura, chegando ao máximo de 1,18. Estes valores são considerados elevados para esta fase da cultura, quando se espera que os valores do K_c estejam na faixa de 0,70, em função da sua pequena área foliar e conseqüente baixa transpiração.

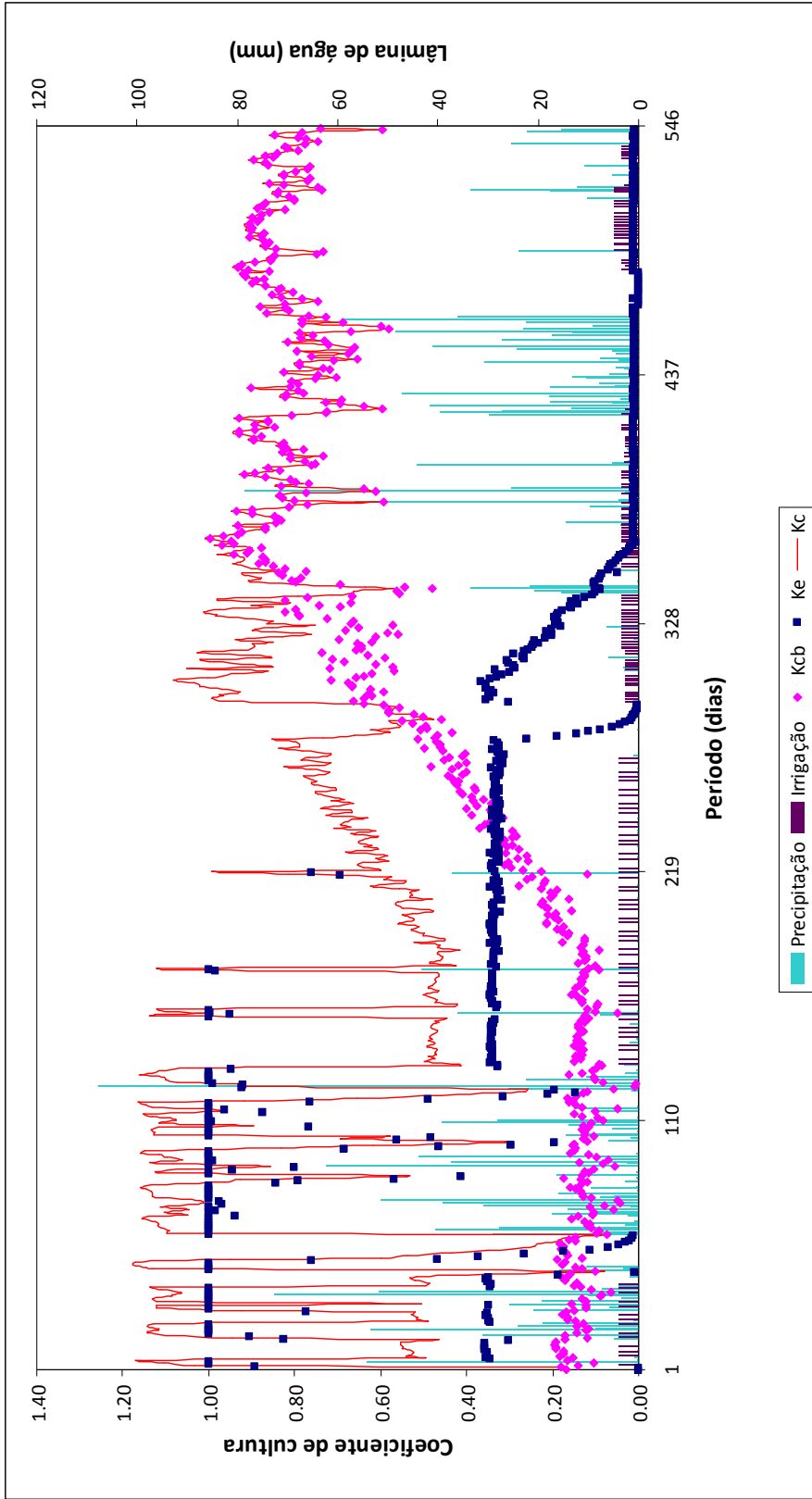


Figura 4 – Valores de coeficiente de cultura (K_{cb} , K_e e K_c) estimados para a cultura do eucalipto cultivada sob irrigação, de acordo com a metodologia do Kc dual proposta por Allen et al. (2006), para o regime hídrico observado no período de 17/10/2001 a 14/04/2003, na região do Rio Doce – MG.

Observou-se, ainda, que os valores de K_e apresentaram uma grande oscilação nesta fase. Estas oscilações ocorreram em função das variações na umidade do solo, oriundas das precipitações ocorridas e irrigações aplicadas. Este comportamento é retratado por Allen e Pereira (2009) quando mostram a curva generalizada de coeficientes de cultura e salientam que as variações bruscas de K_e são regidas pela frequência de umedecimento do solo. López-Urrea et al. (2009), trabalhando com cebola na região central da Espanha, observaram que os valores de K_e na fase de estabelecimento da cultura variaram em função das irrigações aplicadas e, desta forma, apresentaram tendência semelhante a aqui apresentada.

O que influencia de forma determinante no cálculo de K_e são os valores de f_{ew} , que marcam as variações bruscas observadas em K_e de um dia para o outro. Observa-se que este fator depende dos valores de f_w , que, de acordo com a metodologia, assume valores que variariam de 0,01 a 1 e, para o trabalho em questão, tem-se valores que variam entre 0,30 (porcentagem de área molhada pela irrigação) e 1 (porcentagem área molhada pela precipitação, ou seja, área total), não assumindo valores intermediários, levando a estas variações bruscas nos valores de K_e .

De acordo com estas observações, foram feitos ajustes na metodologia utilizada, que consistiram em fixar o valor máximo de K_e em 0,80, reduzindo os valores de K_c para números inferiores a 1,00, e utilizar o artifício de trabalhar com médias móveis a fim de reduzir os picos observados na curva de K_e , o que gerou os resultados apresentados na Figura 5.

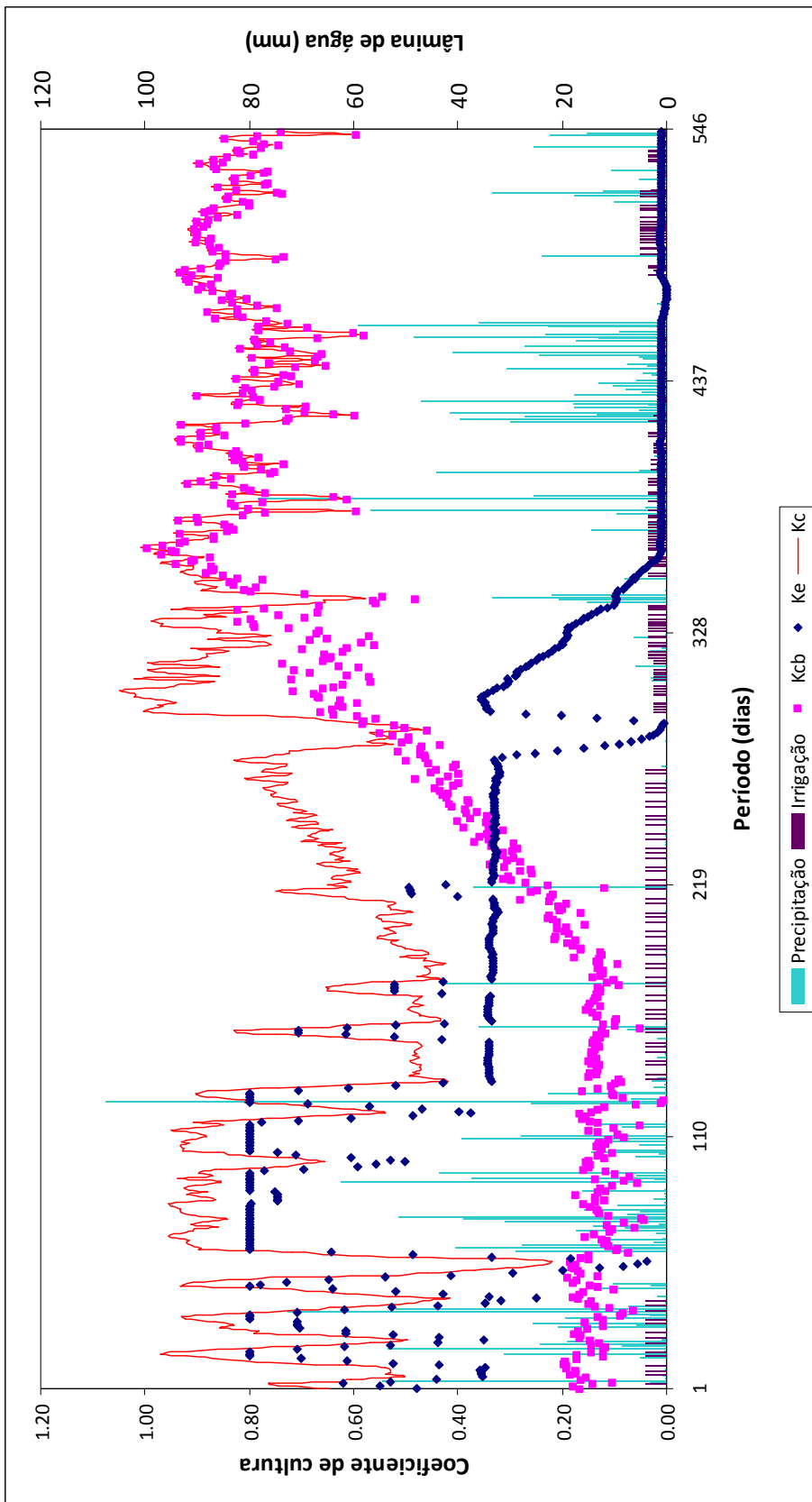


Figura 5 – Valores de coeficiente de cultura ajustados (K_{cb} , K_e e K_c) estimados para a cultura do eucalipto cultivada sob irrigação, de acordo com a metodologia do Kc dual proposta por Allen et al. (2006), para o regime hídrico observado no período de 17/10/2001 a 14/04/2003, na região do Rio Doce – MG.

Os valores máximos de K_e foram observados na fase inicial de desenvolvimento da cultura, quando a área exposta do solo é maior e, em função da época em que ocorreu o plantio, esta fase coincidiu com o período de maior ocorrência de chuvas (entre outubro e abril), o que proporcionou um constante umedecimento do solo e, assim, elevados valores de evaporação devido a disponibilidade de água no solo, quando $K_r = 1$. Na Figura 6, este período é mostrado de forma detalhada, realçando a influência do umedecimento do solo sobre K_e , que atinge seus máximos nos dias de maior precipitação, se mantêm estável com valores elevados quando há ocorrência de dias seguidos com chuva ou com valores médios quando há dias seguidos sem chuva, com predominância da irrigação.

Alguns conceitos permitem um maior entendimento deste processo. Hillel (1971) afirma que após o solo ser molhado constantemente e em períodos subsequentes verificam-se dois estádios bastante distintos no processo de retirada de água ou secagem do solo. O primeiro é um estágio mais constante, na qual a taxa de evaporação é determinada pelas condições da superfície do solo e por fatores externos, como radiação ou chuva. O segundo é um estágio em que ocorre redução nas taxas e durante a qual a evaporação procede a uma taxa determinada pelo perfil do solo para transportar umidade para a zona de evaporação. Esta relação é salientada por Allen et al. (1998) quando estes autores descrevem o conceito de K_r (coeficiente de redução da evaporação do solo), em que $K_r = 1$ quando a superfície do solo se encontra molhada. Quando o conteúdo de água na camada superior do solo começa a ser limitante, o valor de K_r diminui, chegando a zero quando se esgota a totalidade de água.

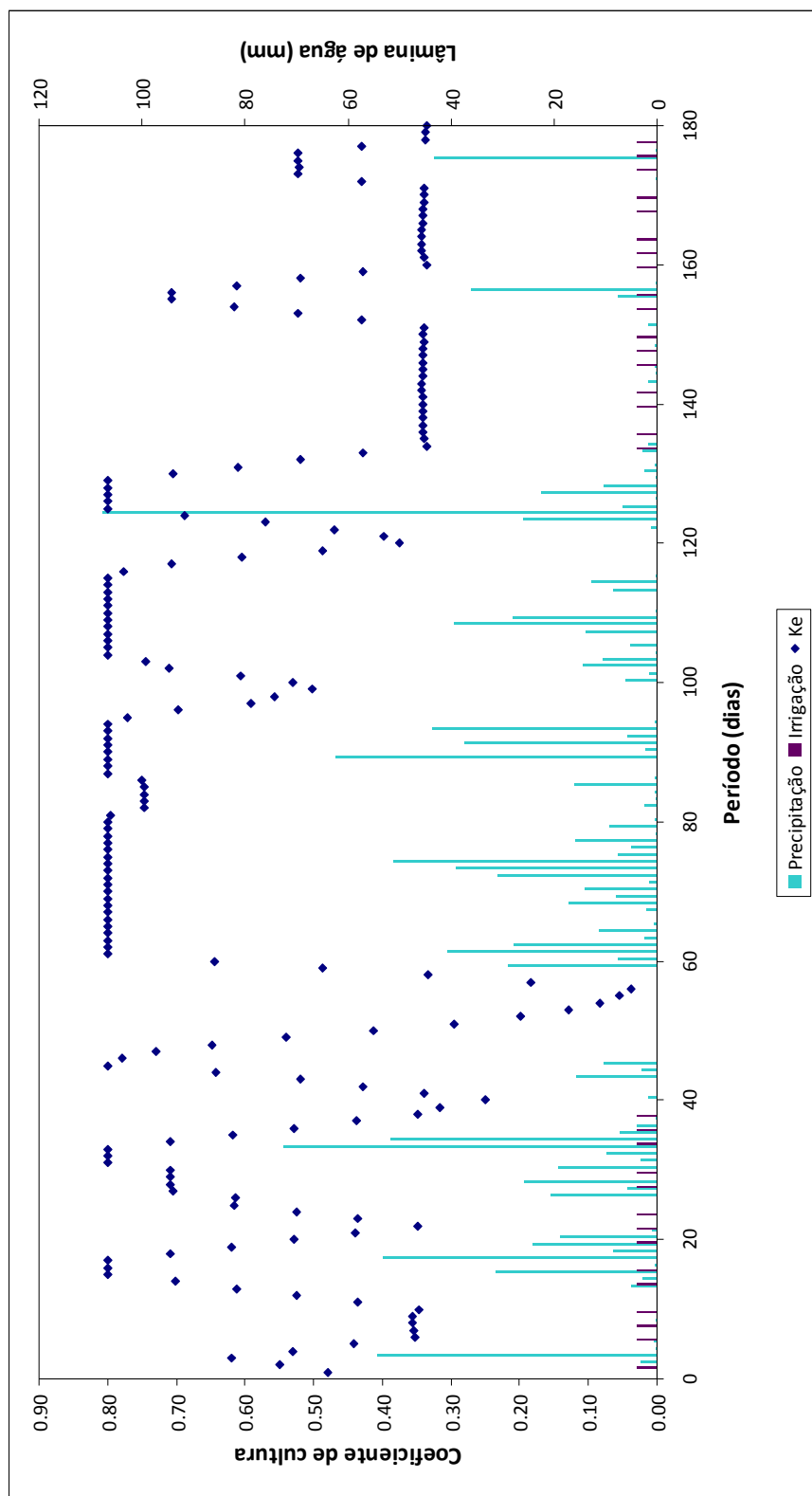


Figura 6 – Valores de coeficiente de evaporação (K_e) estimados para a cultura do eucalipto cultivada sob irrigação, de acordo com a metodologia do Kc dual proposta por Allen et al. (2007), para o regime hídrico observado no período de 17/10/2001 a 14/04/2002, período relativo a fase inicial de desenvolvimento da cultura, na região do Rio Doce – MG.

Desta forma, o conhecimento da variação de água no solo é importante por algumas razões como permitir a comparação dos efeitos de diferentes espécies de plantas, como é o caso do eucalipto, sobre a água contida no solo e subsolo; fornecer informações sobre a transpiração e a evaporação de diferentes vegetais e solos, respectivamente, pois, como é sabido, a maior parte da água que é retirada para a transpiração vem das camadas de solo mais próximas à superfície (HARR; PRICE, 1972; TALSMA; GARDNER, 1986, *apud* SACRAMENTO NETO, 2001).

Os valores de K_{cb} apresentaram um comportamento esperado, uma vez que a curva obtida segue a tendência preconizada por Allen et al. (1998), variando ligeiramente de um dia para o outro devido ao fato de seu ajuste ser feito com base em dados de u_2 e UR_{min} diários. Assume valores mínimos na fase inicial de desenvolvimento e máximos na fase média, quando há cobertura total do solo, valores máximos de I_{AF} e período em que, segundo Mielke et al. (1999), a transpiração pode responder por mais de 90% da ET_c , o que é confirmado por Almeida et al. (2007), que afirmam que a transpiração é o principal componente do uso de água pelas florestas.

Esta metodologia foi utilizada por Medeiros et al. (2009), que encontraram valores de coeficiente de cultura para o milho bem próximos aos valores disponíveis na literatura e propostos por Doorenbos e Pruitt (1977), enquanto que López-Urrea et al. (2009) encontraram que os valores de coeficiente de cultura estimados por esta metodologia foram subestimados quando comparados aos valores medidos por meio de lisímetros; estes autores justificam esta subestimativa devido ao fato de que os K_{cb} ajustados assumem valores muito baixos na fase inicial de crescimento, enquanto que os valores de K_e assumem baixos valores na fase de média, o que faz com que as somas (K_c) nestes dois períodos atinjam valores mais baixos que os esperados.

No presente trabalho, os valores médios para os coeficientes de cultura estimados são de 0,57; 0,13 e 0,70 para K_e , K_{cb} e K_c respectivamente, na fase

inicial de desenvolvimento e de 0,01; 0,81 e 0,82 para K_e , K_{cb} e K_c respectivamente, na fase de média de desenvolvimento da cultura.

Considerando as características do eucalipto, acredita-se que os valores médios de coeficiente de cultura aqui encontrados estejam dentro dos valores esperados para esta cultura na fase inicial. Porém, na fase média de crescimento, espera-se que o valor de K_c esteja em torno de 1,00, diferente do observado aqui. É provável que este fato se justifique em razão de que os valores de K_e nesta fase possam ser maiores que os estimados, uma vez que, ainda que haja cobertura total do solo, ocorra evaporação mesmo que em pequenas proporções e isto ocasionaria a elevação dos valores de K_c .

A metodologia utilizada para a estimativa do coeficiente de cultura é função da fração coberta do solo e da altura da cultura. Desta forma, este método generalizado não substitui as medidas em campo de K_c para o desenvolvimento das curvas de coeficiente de cultura. Entretanto, de acordo com Allen e Pereira (2009), fornece uma forma consistente de avaliar os valores medidos, bem como fornecer meios para estimar as alterações nos valores de K_c com a mudança da fração de solo coberta por vegetação. Isso é importante para a estimativa do K_c para espécies arbóreas, que pode variar muito em função do espaçamento entre plantas, da poda das árvores e da idade.

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho, os valores médios para os coeficientes de cultura estimados foram de 0,57; 0,13 e 0,70 para K_e , K_{cb} e K_d , respectivamente, na fase inicial de crescimento e de 0,01; 0,81 e 0,82 para K_e , K_{cb} e K_d , respectivamente, na fase de média de crescimento da cultura. Constatou-se, observando estes resultados, que o K_c na fase inicial da cultura atingiu valores médios dentro do esperado, considerando as características da cultura, enquanto que na fase média estes valores deveriam ser maiores, especialmente considerando que o K_e não devia apresentar valores tão baixos quanto os que foram estimados, uma vez que ainda que se tenha uma cobertura completa do solo, o valor da evaporação não deverá ser nulo ou tão próximo de zero quanto o que foi estimado.

Os valores estimados não devem ser considerados valores definitivos, pois as estimativas não substituem os valores medidos em campo. No entanto, estas estimativas podem servir de base para novos estudos.

5. REFERÊNCIAS

AGRA, S.; HELFER, F. **Recursos hídricos**: zoneamento ambiental para a atividade de silvicultura no Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006. (Relatório não publicado).

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. **Irrigation Science**, disponível em: <<http://www.springerlink.com.w10041.dotlib.com.br/content/2g253616n23w1562/fulltext.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2009.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 308 p. (FAO Irrigation and Drainage, 56).

ALLEN, R.G.; WRIGHT, J.L.; PRUITT, W.O.; PEREIRA, L.S.; JENSEN, M.E. Water requirements. In: HOFFMAN, G.J.; EVANS, R.G.; JENSEN, M.E.; MARTIN, D.L.; ELLIOT, R.L. (Eds.). **Design and operation of farm irrigation systems**. 2.ed. St. Joseph, MI: ASABE, 2007. p. 208-288.

ALMEIDA, A.C.; SOARES, J.V. Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (mata Atlântica) na costa leste do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 159-170, 2003.

ALMEIDA, A.C.; SOARES, J.V.; LANDSBERG, J.J.; REZENDE, G.D. Growth and water balance of *Eucalyptus grandis* hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. **Forest Ecology and Management**, n. 251, p. 10-21, 2007.

AMARAL, G. **Características químicas e físicas de diferentes classes de solos da zona metalúrgica mineira e produtividade de eucalipto**. 2000. 98 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2009**: ano base 2008. Brasília, 2009. 120 p.

BRUN, E.J.; SCHUMACHER, M.V. Considerações sobre os plantios florestais e os impactos ambientais. **Conselho em Revista**, Porto Alegre, n. 21, 2006.

CALDER, I.R. Water use of eucalypts – a review. In: CALDER, I.R.; HALL, R.L.; ADLARD, P.G. (Eds.). **Growth and water use of forest plantations**. Wiley, Chichester, 1992. p. 167-179.

CALDER, I.R. Water use by forests, limits and controls. **Tree Physiology**, n. 18, p. 625-631, 1998.

DAVID, J.S.; HENRIQUES, M.O.; REGO, Z.C. Estudo preliminar sobre as influências hidrológicas do *Eucalyptus globulus* Labill. **Recursos Hídricos**, v. 7, n. 1, p. 5-39, 1986.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 33).

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

DUNIN, F.X.; MACKAY, S.M. Evaporation by eucalypt and coniferous forests communities. In: NATIONAL SYMPOSIUM ON FOREST HYDROLOGY, 1982, Australia. **Proceedings...** Australia: The Institution of Engineers, 1982. p. 12-17.

GATTO, A. **Estoques de carbono no solo e na biomassa de plantações de eucalipto na região Centro-Leste de Estado de Minas Gerais**. 2005. 73 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

HARR, R.D.; PRICE, K.R. Evapotranspiration from a greasewood cheatgrass community. **Water Resources Research**, v. 8, n. 5, p. 1199-1203, 1972.

HILLEL, D. **Soil and water, physical principles and processes**. New York: Academic Press, 1971. 228 p.

HUNTER, I. Above ground biomass and nutrient uptake of three tree species (*Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus grandis* and *Dalbergia sissoo*) as affected by irrigation and fertilizer, at 3 years of age, in southern India. **Forest Ecology and Management**, n. 144, p. 189-199, 2001.

JARVIS, P.G. Coupling of carbon and water interactions in forests stands. **Tree Physiology**, v. 2, n. 1/3, p. 347-368, 1986.

LEITE, N.B. Avanços da silvicultura brasileira são significativos. **Visão Agrícola**, n. 4, p. 58-61, 2005.

LIMA, W.P. **Impacto ambiental do eucalipto**. 2.ed. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo, 1996. 301 p.

LIMA, W.P. et al. Comparative evapotranspiration of Eucalyptus, Pine and Cerrado vegetation measured by the soil water balance method. **IPEF**, Piracicaba, n. 1, p. 5-11, 1990.

LIMA, W.P.; FREIRE, O. Evapotranspiração em plantações de eucalipto e de pinheiro e em vegetação herbácea natural. **IPEF**, Piracicaba, n. 12, p. 103-117, 1976.

LÓPEZ-URREA, R.; SANTA OLALLA, F.M.; MONTORO, A.; LÓPEZ-FUSTER, P. Single and dual crop coefficients and water requirements for onion (*Allium cepa* L.) under semiarid conditions. **Agricultural Water Management**, v. 96, p. 1031-1036, 2009.

LOURENÇO, H.M. **Crescimento e eficiência do uso de água e nutrientes em eucalipto fertirrigado**. 2009. 145 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MAESTRI, R.; SANQUETTA, C.R.; MACHADO, S.A.; SCOLFORO, J.R.S.; CORTE, A.P.D. Viabilidade de um projeto florestal de *Eucalyptus grandis* considerando o seqüestro de carbono. **Floresta**, v. 34, n. 3, p. 347-360, 2004.

MEDEIROS, R.P.; LYRA, G.B.; SOUZA, J.L.; LYRA, G.B.; FERREIRA JUNIOR, R.A.; BRITO, J.E.D. Coeficiente de cultura dual para o milho em quatro épocas de plantio no município de Arapiraca, Alagoas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16, 2009. **Anais...** SBAGRO, 2009.

MENDES, C.A.; MADRUGA, P.R.A.; GREHS, S.A. Deserto verde versus poupança verde? Uma abordagem hidrológica. **Conselho em Revista**, Porto Alegre, n. 25, 2006.

MENEZES, A.A. **Produtividade do eucalipto e sua relação com a qualidade e a classe de solo**. 2005. 98 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MIELKE, M.S.; OLIVA, M.A.; BARROS, N.F.; PENCHEL, R.M.; MARTINEZ, C.A.; ALMEIDA, A.C. Stomatal control of transpiration in the canopy of a clonal Eucalyptus grandis plantation. **Trees**, n. 13, p. 152-160, 1999.

MOREIRA, H.M. **Desempenho de métodos de manejo de irrigação para a cultura do tomateiro cultivado em campo e em casa de vegetação**. 2002. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PILGRIN, D.H.; DORAN, D.G.; ROWBOTTON, J.A.; MACKAY, S.M.; TJENDANA, J. Water balance and runoff characteristics of mature and cleared Pine and Eucalypt catchments at Lidsdale, New South Wales. **National Conference Publication**, v. 82, n. 6, p. 103-110, 1982.

ROBERTS, J. Forest transpiration: a conservative hydrological process? **Journal of Hydrology**, v. 66, p. 133-141, 1983.

SACRAMENTO NETO, O.B. **Balanço hídrico em plantios jovens de eucalipto na região de Belo Oriente, MG**. 2001. 77 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SILVA, G.G.C. **Nutrição, crescimento e sua modelagem em povoamentos de eucalipto em resposta à disponibilidade de água e nutrientes**. 2006. 102 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SILVA, W.; SEDIYAMA, T.; SILVA, A.A.; CARDOSO, A.A. Índice de consumo e eficiência do uso da água em eucalipto, submetido a diferentes teores de água em convivência com braquiária. **Revista Floresta**, v. 34, n. 3, p. 325-335, 2004.

SMITH, M.K.; WATSON, K.K.; PILGRIM, D.H. A comparative study of hydrology of Radiata Pine and Eucalypt forests at Lidsdale, New South Wales. **I.E. Australia. C.E. Transactions**, n. 16, p. 82-86, 1974.

SOARES, J.V.; ALMEIDA, A.C. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing Eucalyptus plantation in Brazil. **Journal of Hydrology**, n. 253, p. 130-147, 2001.

SOARES, J.V.; ALMEIDA, A.C.; PENCHEL, R.M. Balanço hídrico de plantações de eucalipto a partir da estimativa de transpiração pelo método de Penman-Monteith. In: CONFERÊNCIA IUFRO SOBRE A SILVICULTURA E MELHORAMENTO DE EUCALIPTOS, 1999. **Anais...** 1999.

SOARES, J.V.; XAVIER, A.C.; ALMEIDA, A.C. Balanço de água em eucaliptos com a caracterização do dossel por técnicas de sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE, 2001. p. 139-147.

SOUZA, M.J.H.; RIBEIRO, A.; LEITE, H.G.; LEITE, F.P.; MINUZZI, R.B. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em três regiões da Bacia do Rio Doce. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 399-410, 2006.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; GOMES, A.N. Water use, water limitation, and water use efficiency in a *Eucalyptus* plantation. **Bosque**, Valdivia, Chile, v. 25, n. 2, p. 35-41, 2004a.

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

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**, n. 255, p. 920-930, 2008.

TALSMA, T.; GARDNER, E.A. Soil water extraction by a mixed eucalypt forest during a drought period. **Australian Journal of Soil Research**, n. 24, p. 25-32, 1986.

TOMAZELLO FILHO, M. **Efeito da irrigação e fertilização nas propriedades do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* x *urophylla***. 2006. 146 p. Tese (Livro Docência) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

TONELLO, K.C.; TEIXEIRA FILHO, J. Respostas fisiológicas de dois clones de eucalipto submetidos a diferentes potenciais hídricos. In: SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL, 2007, Taubaté. **Anais...** Taubaté: IPABHi, 2007. p. 287-294.

VIOLA, M.R. Simulação hidrologia na região Alto Rio Grande a montante do reservatório de Camargos/CEMIG. 2008. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

CAPÍTULO 3
SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO EUCALIPTO
SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA

1. INTRODUÇÃO

O setor de florestas plantadas no Brasil desempenha um papel fundamental no cenário sócio-econômico do país, ao contribuir com a produção de bens e serviços, agregação de valor aos produtos florestais e para a geração de empregos, divisas, tributos e renda.

De acordo com o relatório da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas – ABRAF (2009), o Brasil conta com 6,5 milhões de ha de florestas plantadas, entre áreas com pinus (28,4%), eucalipto (64,7%) e outras espécies (6,9%). Da área total plantada no país, o Estado de Minas Gerais detém a maior área individual com florestas plantadas, compreendendo 1,4 milhões de ha (9,8% com pinus e 90,2% com eucaliptos), seguido pelos estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Bahia.

Das espécies florestais, as do gênero *Eucalyptus* têm sido as mais plantadas nas diversas regiões brasileiras, devido ao seu rápido crescimento e à

alta capacidade de produção de madeira, oriundas da grande adaptação a uma diversidade de condições ecológicas e ao número expressivo de espécies (AMARAL, 2000), tendo sido registrada uma expansão de 7,3% da área plantada de 2007 para 2008 (ABRAF, 2009).

Apesar desta importância econômica, a expansão das áreas com plantio de eucalipto tem sido criticada com base em indícios de que esta cultura consome água em quantidades excessivas. Assim, de acordo com Calder (1992 *apud* MIELKE et al., 1999) e Lima (1996), o manejo de plantios de rápido crescimento requer um conhecimento exato dos padrões de demanda ao longo da rotação de um site específico para a utilização otimizada da água disponível.

As distintas condições climáticas, às quais a cultura está exposta nas diversas regiões em que é feito seu cultivo, influenciam na sua produtividade e duração do ciclo. Considerando esta observação, Calder (1998) relata que o uso de água pelas florestas varia sensivelmente entre regiões temperadas e tropicais e entre zonas úmidas e secas destas regiões. A distribuição de chuvas afeta a disponibilidade de água do solo e o déficit de pressão de vapor podendo restringir o crescimento uma vez que afeta a abertura e fechamento dos estômatos (ALMEIDA et al., 2007).

Recentemente, diversas empresas e pesquisadores, ligados ao setor florestal, têm aumentado esforços no sentido de investigar a contribuição dos componentes do balanço hídrico na produtividade do eucalipto. Estes esforços procuram integrar os efeitos do clima e práticas de manejo na produção de madeira de florestas plantadas de *Eucalyptus* sp. (TONELLO; TEIXEIRA FILHO, 2007).

Vários trabalhos relacionam a disponibilidade de água à produtividade da cultura, estas relações são estabelecidas sob diversos parâmetros, a saber, incremento médio anual (IMA), produção de biomassa, qualidade da madeira, transpiração, mudanças nas propriedades do solo, época de corte e, inclusive, sua maior ou menor capacidade em seqüestrar carbono, entre outros fatores

(TONELLO; TEIXEIRA FILHO, 2007; STAPE et al., 2004a e 2004b; MAESTRI et al., 2004; TOMAZELLO FILHO, 2006; SILVA, 2006; SOUZA et al., 2006; STAPE et al., 2008).

Estabelecer relações entre consumo de água pela cultura do eucalipto e a disponibilidade de água no solo, pode contribuir na predição do potencial produtivo dos plantios florestais.

Em estudo desenvolvido através de um gradiente geográfico, na região Nordeste do Estado da Bahia, Stape et al. (2004b) constataram que o crescimento das plantações de eucalipto aumentou com o aumento da precipitação, como resultado da maior disponibilidade hídrica e maior eficiência do uso da água. A produção primária líquida aumentou 2,3 Mg ha por ano para cada 100 mm a mais de chuva, no entanto, de acordo com Stape et al. (2008), este estudo descritivo não separou os efeitos do suprimento de água, por si só, dos outros potenciais fatores de variação, tais como a fertilidade do solo e umidade do ar. Estes autores afirmam que o incremento na produção de madeira, observado em ano de maior incidência de chuvas comparado ao observado em ano considerado seco, salienta a importância do suprimento de água e o potencial uso da irrigação como opção de manejo.

Este potencial ainda é bastante discutido, especialmente quanto à sua viabilidade econômica e quanto ao consumo de água pela cultura do eucalipto.

Dentro deste contexto, a realização de simulações a fim de estabelecer uma relação entre a disponibilidade hídrica e a produtividade da cultura pode gerar informações importantes para o manejo da cultura e definição de regiões que ofereçam condições mais favoráveis ao plantio do eucalipto, além de oferecer subsídios para estudos de viabilidade do uso da irrigação.

Uma alternativa para quantificar esse potencial produtivo associado à disponibilidade hídrica tem sido a utilização de modelos de crescimento baseados em processos. De maneira geral, os modelos de simulação em agricultura podem ser divididos em dois grupos básicos (PASSIOURA, 1996):

empíricos (“modelos de engenharia”) e mecanísticos (“modelos científicos”, baseados em processos, MBP). Os modelos empíricos se baseiam em “correlações” entre variáveis de um sistema, sem que, necessariamente, exista relação de causa-efeito entre as mesmas, e são representados por equações, cujos coeficientes das variáveis não possuem necessariamente interpretação física ou biológica, sendo válidos apenas para as condições específicas em que foram estabelecidos. Já os MBP se baseiam em processos físicos e biológicos que governam o sistema em questão, o que lhes confere maior capacidade de extrapolação, embora muitas vezes com menor acurácia. Os modelos mecanísticos possuem capacidade preditiva espacial e temporal, e, após devidamente parametrizados, calibrados e validados, podem fornecer estimativas confiáveis.

Nesse sentido, o surgimento do modelo 3-PG (*Physiological Principles in Predicting Growth*) (LANDSBERG; WARING, 1997) – em essência, um modelo de eficiência de uso de radiação solar e de água, e de partição de carbono – contribuiu e vem contribuindo, tanto para o manejo como para a pesquisa silvicultural. Este modelo, desenvolvido para estimar a produtividade de povoamentos florestais equiâneos, se baseia em processos fisiológicos, utilizados em modelos de balanço de carbono, mas incorpora, também, relacionamentos empíricos, obtidos a partir de medições experimentais, o que diminui a quantidade de variáveis de entrada, por simplificar o tratamento de processos fisiológicos complexos, facilitando a utilização do mesmo como uma ferramenta de manejo.

O 3-PG incorpora os seguintes submodelos: a) assimilação de carboidratos (produção de biomassa); b) distribuição de biomassa entre folhas, caule (lenho) e raízes; c) balanço de água no solo; d) alocação de biomassa entre variáveis de interesse para o crescimento florestal; e e) caracterização dendométrica.

Esses submodelos interagem de forma a abranger os processos que venham a interferir no desenvolvimento das plantas (SANDS; LANDSBERG, 2002).

O 3-PG estima a quantidade de energia radiante absorvida pelo dossel, sua conversão em carboidratos e alocação nos diferentes componentes da árvore (folhas, cascas, lenho e raízes). Este modelo descreve o crescimento, tendo como dados de entrada a energia, a temperatura e o nível de nutrição (fertilidade do solo). O modelo incorpora relações empíricas, obtidas a partir de medições experimentais e processos fisiológicos, utilizados em modelos de balanço de carbono. Essa incorporação facilita o cálculo de processos fisiológicos complexos, diminuindo, conseqüentemente, a quantidade de variáveis de entrada.

As principais variáveis de entrada requeridas pelo modelo 3-PG nas simulações são: a) Variáveis Climáticas: Médias mensais de temperaturas máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$), radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), precipitação pluvial (mm), déficit de pressão de vapor (mbar) e número de dias de geada por mês; b) Variáveis do Solo: Fertilidade, textura do solo e disponibilidade de água; c) Variáveis da planta: População de árvores, biomassa inicial de folha, lenho e raízes e relações alométricas.

Segundo Esprey et al. (2004), o modelo 3-PG foi construído em forte colaboração ao usuário final, o manejador florestal, tem uma estrutura simples e transparente, é de fácil operação, tem como entrada dados facilmente disponíveis e seus parâmetros são facilmente determinados, o que realça a probabilidade dele ser utilizado no contexto do manejo florestal.

O desempenho do 3-PG em estimar a produtividade de florestas comerciais de eucalipto e, ou, pinus tem sido avaliado em diversos países: Austrália (COOPS et al., 1998b; TICKLE et al., 2001; SANDS; LANDSBERG, 2002; LANDSBERG et al., 2003), Nova Zelândia (COOPS et al., 1998a; WHITEHEAD et al., 2002), EUA (COOPS et al., 1998b; COOPS; WARING, 2001a e 2001b) e África

do Sul (DYE, 2001; DYE, 2004). No Brasil, este desempenho tem sido avaliado a partir de dados obtidos em plantios de empresas florestais situadas nos Estados da Bahia (STAPE, 2002; STAPE et al., 2004c), Espírito Santo (ALMEIDA et al., 2003; ALMEIDA et al., 2004a e 2004b), região Centro-Leste de Minas Gerais (SILVA, 2006) e região de cerrado de Minas Gerais (BORGES, 2009).

Estes trabalhos têm alcançado bons resultados, mas mostram a necessidade de parametrização e calibração do mesmo, por meio de ajustes dos valores dos parâmetros ou relacionamentos, para as condições específicas do sítio florestal trabalhado, para melhorar a acurácia das estimativas de produção. Silva (2006), utilizando diferentes parametrizações para o modelo 3-PG – obtidas para a Austrália (SANDS; LANDSBERG, 2002) e para o Brasil (ALMEIDA et al., 2004a; STAPE et al., 2004c; SILVA, 2006) – comparou estimativas de produtividade obtidas pelo modelo para um período de simulação de sete anos, com dados de produtividade de plantios florestais independentes, e encontrou que os melhores resultados, as menores diferenças entre o estimado e o observado foram obtidos quando da utilização do modelo calibrado para as condições específicas da região trabalhada.

Assim, os efeitos provocados pelas variações do clima, particularmente pelas variações no regime hídrico, podem ser identificados em análises do crescimento das plantações florestais em termos de *ICA* (incremento corrente anual) e de *IMA* (incremento médio anual) em diferentes anos e regiões por meio do modelo 3-PG (ALMEIDA; LANDSBERG, 2003).

Das variáveis medidas para fins de avaliação da produtividade das plantações florestais, o incremento volumétrico acumulado é uma medida normalmente utilizada. Entretanto, em plantações em larga escala não há como medir o volume de todas as árvores, o que justifica a adoção de métodos de estimativas baseados na medição do diâmetro a altura do peito (*DAP*), área basal (*B*) e altura total da planta (H_t). Resulta destas medidas, o incremento

médio anual (*IMA*) que indica qual foi o ganho médio de madeira, ou seja, a produtividade média da floresta ao longo de um ano.

Sabe-se que na determinação das necessidades hídricas das culturas levam-se em conta clima, modelos de exploração e intensidade de cultivo, meio ambiente, disponibilidade de água, fertilidade do solo, métodos e práticas de cultivo e regas (DOORENBOS; PRUITT, 1977). Desta forma, o ‘software’ IRRIPLUS® é uma ferramenta de gerenciamento de irrigação que permite, uma vez cadastrados as informações da cultura, solo, sistema de irrigação e das parcelas, simular com o banco de dados climáticos a evapotranspiração da cultura de interesse, e, por meio de um balanço hídrico diário, estimar a necessidade de irrigação e a capacidade do equipamento instalado de atendê-la (MANTOVANI et al., 2006).

Este software possibilita, além da informação diária de necessidade de irrigação, diversos outros usos como: avaliação do sistema de irrigação, simulação das necessidades hídricas das culturas, consumo de energia, detalhamento por meio de gráficos e tabelas das irrigações realizadas, curva de umidade do solo durante toda safra, programações semanais de irrigação, dentre outros. A simulação das necessidades hídricas das culturas pode ser feita com base em dados históricos do banco de dados do IRRIPLUS® ou dados observados que podem ser inseridos no programa.

Este ‘software’ vem sendo utilizado em diversos projetos de pesquisa, para as mais distintas culturas e regiões brasileiras (CORDEIRO, 2006; MUDRIK, 2005; NUNES et al., 2006; MANTOVANI et al., 2006). Com relação à cultura do eucalipto foi utilizado por Silva e Espíndula Neto (s.d.) em uma análise da demanda, eficiência de uso de água e rentabilidade de diferentes culturas para o Norte do ES, incluindo o eucalipto. Estes autores compararam dados de água disponível no solo, observados em campo e estimados pelo ‘software’, mostrando uma ótima concordância entre estes valores.

O IRRIPLUS® determina a evapotranspiração da cultura (ET_c) por meio da equação 1.

$$ET_c = ET_o \times K_c \times K_s \times K_l \quad (1)$$

em que ET_c é evapotranspiração da cultura, adimensional; ET_o , evapotranspiração de referência, adimensional; K_c , coeficiente da cultura, de acordo com o estágio de desenvolvimento, adimensional; K_s , coeficiente de estresse, em função da variação de umidade no solo, (0 a 1), adimensional; e K_l , coeficiente de localização, em função da porcentagem de área molhada e sombreada (0,2 a 1,0).

A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) pode ser feita por meio de diversos métodos, dependendo da série de dados disponíveis, desde os métodos mais complexos como a equação padrão de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), até equações mais simplificadas como Hargreaves- Samani (ALLEN et al., 1998) e Blaney-Cridle (DOORENBOS; PRUITT, 1977).

Os valores de K_c , coeficiente que integra as características da cultura (varia de acordo com a fase fenológica) e do clima local à estimativa de ET_c (DOORENBOS; PRUITT, 1977), devem ser obtidos por meio de estudos experimentais ou em publicações sobre a cultura a ser estudada.

O coeficiente de estresse hídrico (K_s) promove o ajuste da ET_o para a ET_c em função do nível de umidade atual do solo ao longo do ciclo de desenvolvimento. O IRRIPLUS® trabalha com os três modelos para a determinação do K_s , conforme Bernardo et al. (2006): K_s unitário ($K_s = 1$), utilizado para turnos de rega muito reduzidos (umidade sempre próxima à capacidade de campo); K_s linear (modelo linear) e K_s logarítmico (modelo logarítmico).

O coeficiente de localização (K_l) ajusta a evapotranspiração gerada a partir da irrigação total em irrigação promovida a partir de irrigação pontual. O IRRIPLUS® trabalha com dois modelos para a determinação de K_l , o modelo de Keller-Bliesner (KELLER; BLIESNER, 1990) e o de Fereres (VILLALOBOS; FERERES, 1990) conforme citado por Cordeiro (2006).

As necessidades hídricas do eucalipto são ainda um tema a ser investigado. Apesar dos vários trabalhos existentes correlacionando produtividade do eucalipto com disponibilidade de água, são poucos os que estabelecem uma curva da produtividade em função de diversas lâminas aplicadas. A maioria estabelece resultados comparando parcelas irrigadas e não irrigadas, o que limita a sugestão de esquemas adequados de manejo.

Estes trabalhos evidenciam a influência positiva de um maior suprimento hídrico à cultura do eucalipto. No entanto, por se tratar de uma cultura tradicionalmente de sequeiro, por diversas razões, entre elas sua rusticidade e o alto custo envolvido na implantação de sistemas de irrigação em função das dimensões das áreas de plantio (milhares de hectares), além das questões ambientais que remontam ao antigo mito de que o eucalipto 'seca' o solo e chegam a grande quantidade de água necessária para irrigar áreas tão extensas, ainda se faz necessário quantificar as necessidades hídricas da cultura. Esta quantificação auxiliaria não somente no caso da implantação de sistemas de irrigação, como também e, talvez principalmente, na escolha de regiões que ofereçam melhores condições ao desenvolvimento da cultura no que diz respeito ao regime pluviométrico.

O objetivo deste trabalho foi simular as necessidades hídricas da cultura do eucalipto cultivada na região Centro-Leste de Minas Gerais por meio do 'software' IRRIPLUS® e estimar sua produtividade por meio do modelo 3-PG, estabelecendo uma relação entre o suprimento de água e a produtividade da cultura, permitindo estabelecer uma curva de variação da produtividade em

função da quantidade de água aplicada ao longo de um ciclo produtivo completo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado para um ciclo de crescimento de eucalipto plantado em área pertencente à empresa Celulose Nipo-Brasileira (CENIBRA S.A.), localizada na bacia hidrográfica do Rio Doce, na região Centro-Leste de estado de Minas Gerais. Foram realizadas simulações das necessidades hídricas e da produtividade da cultura do eucalipto tendo como referência dados de clima, solo e da cultura observados na área experimental ali instalada.

As simulações das necessidades hídricas foram feitas por meio do 'software' IRRIPPLUS® e os resultados obtidos destas simulações foram utilizados como dados de entrada do modelo de crescimento 3-PG, por meio do qual foram estimadas as produtividades da cultura sob as diversas condições de disponibilidade hídrica e comparadas a valores observados.

2.1. Dados observados

Os dados observados foram coletados ao longo de um ciclo completo a cultura, sendo que o experimento, cujas características são descritas a seguir,

foi conduzido e seus resultados apresentados por Silva (2006) e por Lourenço (2009).

2.1.1. Características da área experimental

A área experimental foi instalada no município de Santana do Paraíso, Estado de Minas Gerais, localizado a 19°18'23"S, 42°22'46"W e 220 m de altitude.

A precipitação média anual da região é de 1.200 mm, a temperatura média anual de 25,2°C e a umidade relativa média de 65,2%. Os dados climáticos da área experimental foram obtidos por meio de uma estação meteorológica instalada na região de Belo Oriente, próxima ao experimento, a 240 m de altitude, e consistiram de dados diários de precipitação pluvial, temperatura máxima, média e mínima, umidade relativa do ar, radiação solar global e velocidade do vento, para o período de outubro de 2001 a junho de 2008 (Tabela 1), período de condução do experimento.

O solo da área experimental, localizada na posição de encosta, é classificado como Cambissolo Háplico (MENEZES, 2005). Foram realizadas análises químicas e físicas em amostras de solos coletadas nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm antes da instalação do experimento. Para a determinação da capacidade de retenção de água foram determinadas as umidades na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PM) em cada horizonte do perfil do solo (A, AB, Bi1, Bi2 e C), a caracterização física do solo está descrita nas Tabelas 2 e 3.

A topografia da região estudada é de plano a forte ondulado, com inclinação média das encostas de 21% e orientações predominantes com face voltadas para sul e sudeste (FACCO, 2004).

Tabela 1 – Dados climáticos médios mensais referentes ao período de outubro de 2001 a agosto de 2008 de estação próxima à área experimental

Mês	Precipitação (mm)	Temperatura	Temperatura	Temperatura	Radiação global (MJ/m ² .dia)
		média	máxima	mínima	
		----- °C -----			
Jan	190,2	25,2	31,5	21,2	19,3
Fev	202,1	25,3	31,9	20,9	20,6
Mar	131,2	25,1	31,6	20,9	19,4
Abr	77,3	23,9	30,5	19,9	16,4
Mai	25,2	21,4	28,5	16,8	14,1
Jun	11,8	19,9	27,6	14,9	13,0
Jul	9,6	19,5	27,5	13,8	13,6
Ago	8,8	20,9	28,7	15,1	15,5
Set	38,9	22,3	29,1	16,9	15,5
Out	62,8	24,5	31,4	19,3	18,7
Nov	183,0	24,5	30,5	20,5	17,2
Dez	305,3	24,9	31,2	20,9	21,0

Tabela 2 – Caracterização física e química do solo da área experimental

Característica	Profundidade (cm)		
	0-20	20-40	40-60
Análise textural (%)			
- Areia grossa	17,10	16,30	21,80
- Areia fina	11,50	10,70	12,90
- Silte	6,00	6,70	6,90
- Argila	65,40	66,60	58,40
Argila dispersa em água (%)	17,80	3,40	45,10
pH em água	4,52	4,44	4,48
P (mg/dm ³) ^{1/}	1,76	1,24	1,10
K (mg/dm ³) ^{1/}	30,50	14,20	11,20
Ca ²⁺ (cmol _c /dm ³) ^{2/}	0,45	0,17	0,11
Mg ²⁺ (cmol _c /dm ³) ^{2/}	0,14	0,09	0,08
Na (mg/dm ³) ^{2/}	5,00	3,60	3,00
Al ³⁺ (cmol _c /dm ³) ^{2/}	0,96	0,92	0,74
S (mg/dm ³) ^{3/}	54,50	118,50	149,30
Zn (mg/dm ³) ^{1/}	0,52	0,27	0,11
Cu (mg/dm ³) ^{1/}	2,09	2,35	2,15
Fe (mg/dm ³) ^{1/}	59,80	50,40	42,40
Mn (mg/dm ³) ^{1/}	31,10	16,90	12,50
B (mg/dm ³) ^{4/}	0,28	0,20	0,14
SB (cmol _c /dm ³)	0,69	0,31	0,23
t (cmol _c /dm ³)	1,65	1,24	0,97
m (%)	62,20	70,30	70,60
M.O. (dag/dm ³)	1,80	1,17	0,94

pH = relação 1:2,5; 1/Extrator Mehlich-1; 2/Extrator KCl 1mol/L; 3/ Extrator Ca(H₂PO₄)₂, 500 mg/L de P, em ácido acético 2 mol/L (CHESNIN; YIEN, 1950); 4/ Extrator água quente; SB = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + Na⁺; t = SB + Al³⁺; m = 100 Al³⁺/ t; M.O. = 1,724 x C.O. (SOARES et al., 1997).

Tabela 3 – Retenção de água do perfil do solo da área experimental

Horizonte	Profundidade		CC ¹	PM ¹	Água disponível
	Inicial	Final			
----- cm -----		----- m ³ /m ³ -----			
A	0	10	0,272	0,191	0,081
AB	10	20	0,290	0,208	0,082
Bi1	20	90	0,351	0,248	0,103
Bi2	90	145	0,324	0,235	0,089
C	145	>	0,319	0,231	0,088

¹ Umidades do solo na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PM).

A vegetação natural é caracterizada por floresta estacional semidecidual, formada por tipos arbóreos de médio a grande porte, com distribuição espaçada, que se intercalam com tipos de menor tamanho, a maior parte dessa vegetação foi substituída por pastagem e, atualmente, as áreas degradadas foram e vêm sendo aproveitadas para o plantio de eucalipto (OLIVEIRA; LEITE, 2000).

Os tratamentos corresponderam a dois níveis de aplicação de água ao solo, *NI* = não irrigado (controle) e *IR* = irrigado, ocupando uma área total aproximada de 5,5 ha. Havia, ainda, um tratamento em que foi aplicado 2/3 da lâmina aplicada no tratamento *IR* (*IR-2/3*). No entanto, para este tratamento, só houve avaliação das variáveis de produtividade da cultura ao final do ciclo.

Aproximadamente um mês antes do plantio houve o preparo do solo, em todos os tratamentos, quando foram aplicados calcário e fosfato natural reativo. Após o coveamento manual (30 x 30 x 30 cm), realizou-se o plantio em 17 de outubro de 2001.

O espaçamento de plantio foi de 3 x 3,33 m, composto por plantas oriundas de quatro materiais genéticos clonais de eucalipto: três clones de *Eucalyptus grandis* (57, 129 e 2719) e um híbrido clonal de *E. grandis* x *E. urophylla*, “*urograndis*” (1215).

Logo após o plantio, foi instalado o sistema de irrigação por gotejamento, nas parcelas correspondentes ao tratamento IR, com o objetivo de aplicar a lâmina suplementar de irrigação referente ao respectivo tratamento. O sistema constava de gotejadores autocompensantes, com vazão de 2,3 L.h⁻¹ e espaçamento de 0,75 m entre emissores.

A demanda de água foi estimada a partir da evapotranspiração de referência – ET_o, determinada pelo método padrão de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), sendo considerada a demanda máxima de 5 mm.dia⁻¹ no período de maior evapotranspiração.

Após o plantio, realizaram-se as adubações de implantação e as adubações de manutenção ao longo do ciclo da cultura. No tratamento irrigado foram aplicados, por meio de fertirrigação, a partir de 28/08/02, fertilizações adicionais calculadas em função da curva estimada de demanda de nutrientes (N, P, K, S e micronutrientes) para plantios de eucalipto com produtividade de 360 m³.ha⁻¹ de tronco aos 6 anos. As fertirrigações eram realizadas três vezes por semana, coincidindo com as irrigações, e a quantidade aplicada de cada nutriente por fertirrigação realizada está descrita na Tabela 4.

Tabela 4 – Quantidade dos nutrientes minerais aplicados em cada fertirrigação realizada

----- kg/ha/aplicação -----					----- g/ha/aplicação -----			
N	P	K	Ca	Mg	B	Zn	Cu	Mo
4,3	0,3	5,0	1,6	0,11	78	72	39	6,5

Salienta-se que as quantidades de nutrientes aplicadas visaram o suprimento nutricional ótimo para a cultura, de forma que a mesma não sofreu ao longo do seu ciclo nenhuma restrição nutricional.

2.1.2. Variáveis medidas

Visando a determinação da massa de matéria seca dos diferentes componentes da parte aérea, nas parcelas correspondentes aos tratamentos, foi abatida uma árvore da bordadura com DAP em torno da média, nas idades de 12, 24 e 36 meses (SILVA, 2006) e cinco árvores foram abatidas para cada material genético, na idade de 81 meses (LOURENÇO, 2009). Após o abate, as árvores foram submetidas à cubagem rigorosa e seus componentes (folhas, galhos, casca e lenho) separados e pesados (matéria fresca). Para a estimativa da massa de matéria seca desses componentes, após homogeneização, foi retirada uma amostra que foi pesada (matéria fresca) e posta a secar em estufa de circulação forçada a 65°C, até peso constante. A partir do peso de matéria fresca total de cada compartimento e o peso da matéria seca de cada amostra, foi estimado o peso da matéria seca total dos respectivos compartimentos, para cada árvore abatida.

2.2. Simulação das necessidades hídricas da cultura

A simulação das necessidades hídricas da cultura foi realizada por meio do 'software' IRRIPLUS®, que leva em consideração no cálculo da evapotranspiração da cultura (ET_c) e recomendação da lâmina de irrigação, cadastros da cultura e do equipamento de irrigação, resultados de análises físico-hídricas do solo e informações meteorológicas diárias.

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi determinada utilizando a equação-padrão de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998). Para tanto, foram

cadastrados os dados de temperaturas máxima, média e mínima; velocidade do vento; umidade relativa do ar; radiação solar; e precipitação, para o período em questão, coletados diariamente na estação meteorológica automática instalada próximo ao experimento. A ET_c foi calculada por meio da equação 1.

Os cadastros de cultura constaram de fases de crescimento da cultura, duração das fases em dias, K_c para cada fase correspondente (Tabela 5), definidos a partir de observações e informações pessoais de técnicos da área, porcentagem de área sombreada pela cultura em cada fase e profundidade do sistema radicular nessas mesmas fases.

Tabela 5 – Duração das fases de crescimento da cultura do eucalipto e valores de K_c

Fase de crescimento	Duração da fase ¹ (dias)	K_c
Inicial	180	0,70
Desenvolvimento	185	0,70
Média	1920	1,00
Final	153	1,00

¹A definição da duração das fases de crescimento seguiram as condições propostas no Boletim FAO 56 (ALLEN et al., 2006) associadas às características da cultura do eucalipto no presente estudo, considerando assim: Fase Inicial: do plantio até alcançar 10% de cobertura do solo. Fase de Desenvolvimento: de 10% de cobertura do solo até fechamento do dossel ou até o IAF (índice de área foliar) atingir o valor igual a 3. Fase Média: fechamento do dossel ou IAF = 3 até início da senescência. Fase Final: início da senescência até a colheita/corte ou completa senescência.

O modelo utilizado para o cálculo do coeficiente de estresse hídrico (K_s) foi o logarítmico (BERNARDO et al., 2006), equação 2. Normalmente, utiliza-se esse modelo com a ressalva de que em solos excessivamente arenosos a utilização do valor de K_s unitário tem sido uma prática para evitar erros

significativos, sendo empregado quando a umidade permanece sempre próxima à capacidade de campo, ou seja, estabelecendo turnos de rega reduzidos.

$$K_s = \frac{\ln[(U_a - PM) + 1]}{\ln[(CC - PM) + 1]} \quad (2)$$

em que K_s é coeficiente de estresse hídrico em função da umidade atual do solo; U_a , umidade atual do solo, em %; PM , ponto de murcha permanente, em %; e CC , capacidade de campo, em %.

Para a análise da evapotranspiração da cultura foram utilizados valores de K_l associados à porcentagem de área molhada ou sombreada (P), utilizando-se o maior valor dentre os esses, através de metodologia proposta por Fereres em 1981 (equações 3, 4 e 5) (VILLALOBOS; FERERES, 1990).

$$\text{Se, } P \geq 65\% \rightarrow K_l = 1 \quad (3)$$

$$\text{Se, } 20\% < P < 65\% \rightarrow K_l = 1,09P + 0,30 \quad (4)$$

$$\text{Se, } P \leq 20\% \rightarrow K_l = 1,94 P + 0,10 \quad (5)$$

em que K_l é coeficiente de localização, em função da porcentagem de área molhada e sombreada (0,2 a 1,0); P , porcentagem de área molhada ou sombreada, em %.

Os resultados das análises físico-hídricas do solo da área experimental foram cadastrados nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-90 cm, possibilitando a determinação da capacidade de retenção de água do solo.

Para a recomendação da lâmina de irrigação, o programa realiza um balanço de água no solo, definindo-se a lâmina de irrigação em função do déficit de água no solo e da eficiência de irrigação.

Para essas análises foi utilizada uma ferramenta interna do 'software', denominada Simulação, que possibilitou a criação de cenários reais em nível de campo para a determinação das lâminas de irrigação necessárias para a reposição da ET_c , sendo as simulações realizadas utilizando dados meteorológicos da fazenda, nos períodos em análise. Foi atribuído um turno de rega de dois dias para as análises, por ser aquele que mais se aproximava ao manejo aplicado na condução do experimento. Assim, fixou-se esta lâmina simulada como sendo aquela que supriria 100% das necessidades hídricas da cultura e a partir desta criou-se cenários de disponibilidade hídrica equivalentes a 2/3 e 1/2 da lâmina simulada.

Foi realizado um estudo comparativo entre a lâmina de irrigação estimada e aquela aplicada ao longo do ciclo da cultura, por meio da estimativa da umidade do solo utilizando recurso do próprio IRRIPLUS®. No caso da estimativa da umidade considerando a situação de irrigação real (tratamento *IR*), foi utilizada a ferramenta Manejo, onde é permitido entrar com dados de irrigação.

2.3. Estimativa da produtividade da cultura

Para a estimativa da produtividade da cultura utilizou-se o modelo 3-PG parametrizado e calibrado por Silva (2006) para a região Centro-Leste de Minas Gerais, cujos parâmetros são mostrados no Anexo. Levou-se em conta, portanto, que as estimativas obtidas por ele são coerentes com dados de crescimento florestal medidos na região, sendo feitas simulações, considerando cenários diferenciados quanto à disponibilidade de água. Estas simulações tiveram o intuito de avaliar o impacto destes cenários no potencial produtivo florestal. Foram considerados os seguintes cenários:

- Não irrigado (NI): tratamento controle, somente precipitação;

- Irrigado (IR): corresponde a lâmina de irrigação real aplicada no tratamento IR ao longo do experimento;
- Irrigado 2/3 (IR-2/3): corresponde a lâmina de irrigação real aplicada no tratamento IR-2/3 ao longo do experimento;
- Irriplus 100% (IRRI-1): corresponde a lâmina de irrigação recomendada pelo 'software' IRRIPLUS®;
- Irriplus 2/3 (IRRI-2): corresponde a 2/3 da lâmina de irrigação recomendada pelo 'software' IRRIPLUS®;
- Irriplus 1/2 (IRRI-3): corresponde a 1/2 da lâmina de irrigação recomendada pelo 'software' IRRIPLUS®.

Tendo em vista que o experimento foi conduzido sob condições ótimas de fertilidade do solo, o parâmetro FR, utilizado no modelo 3-PG para definir a taxa de fertilidade do solo, foi assumido como 1, valor que representa uma situação onde não há limitação ao crescimento por motivos nutricionais.

As variáveis estimadas foram biomassa da parte aérea (BPA), altura total (Ht), diâmetro a altura do peito (DAP), volume (V) e incremento médio anual (IMA).

A fim de se estabelecer uma comparação entre os valores observados e simulados, procedeu-se uma análise de correlação entre estes valores, utilizando como referência os dados de BPA pelo fato de haver dados observados (medidos), desta variável, disponíveis ao longo do ciclo da cultura. A análise da correlação baseou-se na estimativa dos valores a e b de ajustes, pelo procedimento dos mínimos quadrados – regressão linear simples, e na determinação do índice de concordância, d , proposto por Willmott (1981) (equação 6).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (6)$$

em que P é predição, dados simulados; O , observação, dados observados; \bar{O} ,
média dos dados observados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Dados observados

3.1.1. Caracterização climática

Na Figura 1 é mostrada a caracterização climática da área experimental no período de condução do experimento (regime pluvial e condições térmicas ambientais). Ressalta-se que na maioria dos anos observados, o total precipitado esteve acima da média anual da região que é de 1.200 mm (Tabela 6).

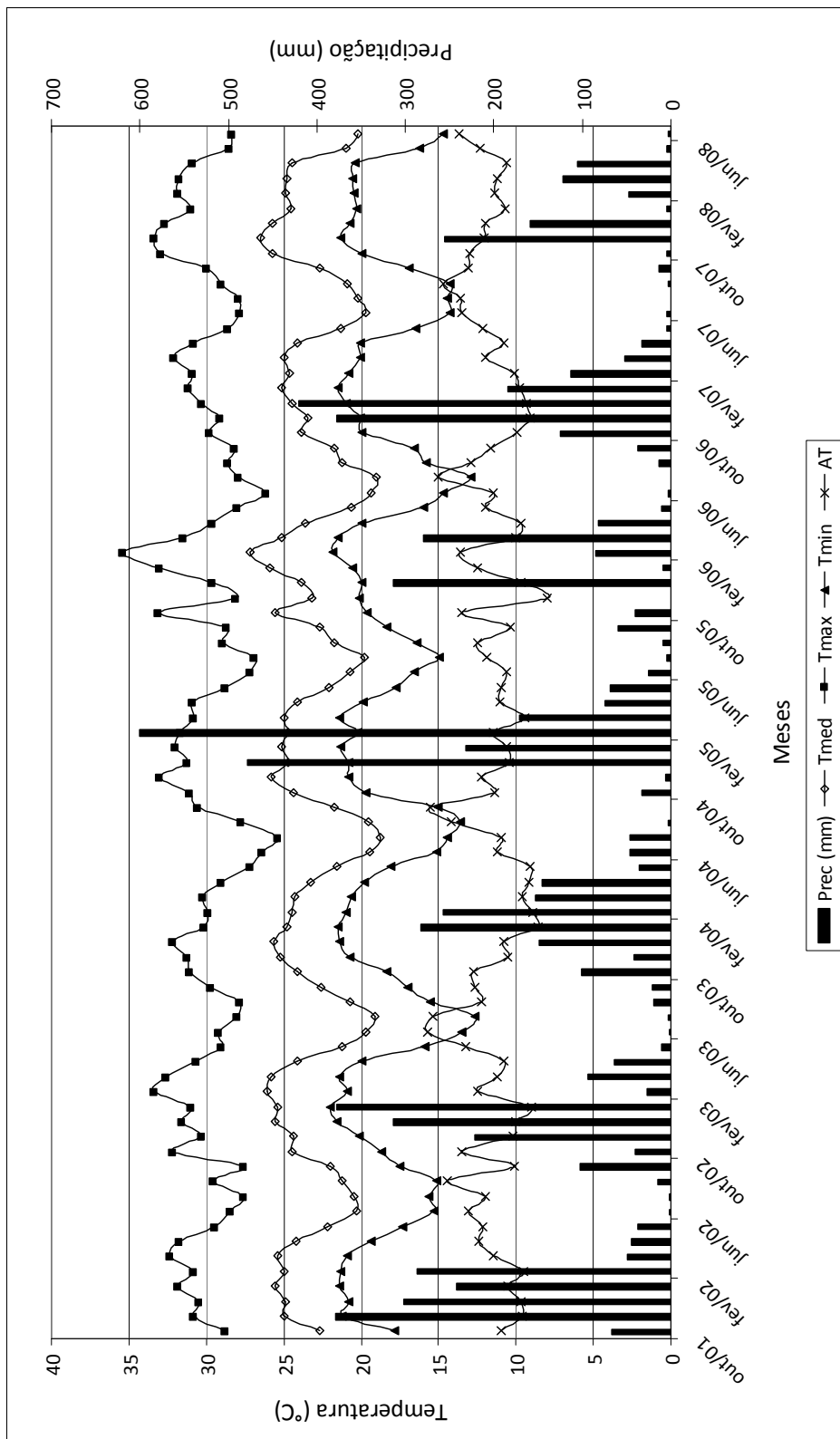


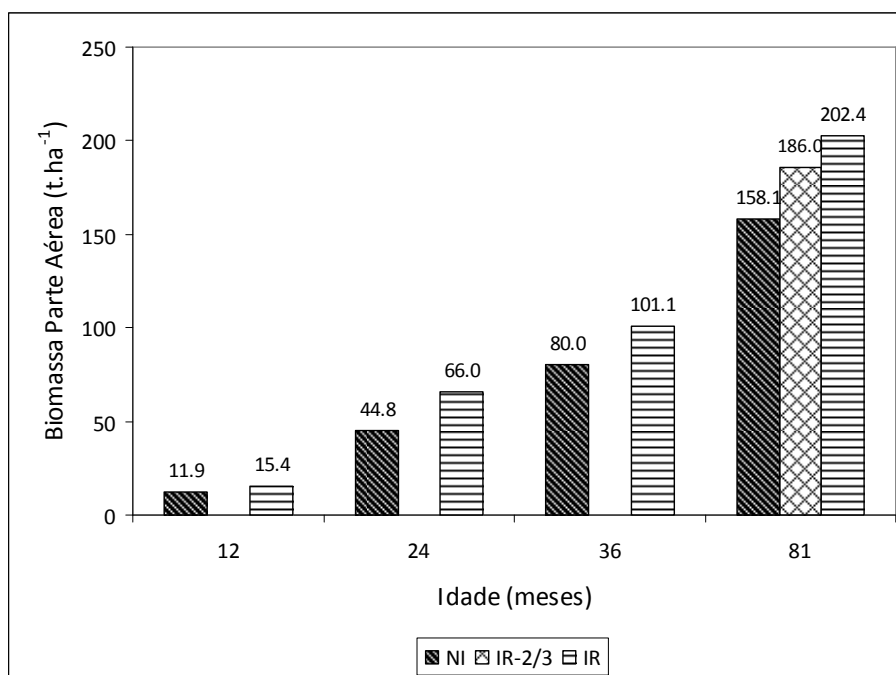
Figura 1 – Regime pluvial e temperaturas médias mensais (T_{med}), máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}) do ar e amplitude térmica (AT), da região do Rio Doce – MG, no período de out./2001 a jun./2008.

Tabela 6 – Precipitação total por ano durante o período de condução do experimento

Ano	Precipitação total (mm)
2001/2002	1528,2
2002/2003	1191,2
2003/2004	1258,5
2004/2005	1761,6
2005/2006	873,1
2006/2007	1327,3

3.1.2. Biomassa da parte aérea

A biomassa da parte aérea foi avaliada nas idades de 12, 24 e 36 meses (SILVA, 2006) e aos 81 meses (LOURENÇO, 2009) para os tratamentos *NI* e *IR* e somente aos 81 meses para o tratamento *IR-2/3* tendo sido encontrada uma tendência de aumento da biomassa à medida que se aumentou a lâmina de água aplicada a cultura (Figura 2).



Fonte: Adaptado de Silva (2006) e Lourenço (2009).

Figura 2 – Biomassa da parte aérea observada ao longo do ciclo produtivo da cultura do Eucalipto em reposta a aplicação controlada de água na região do Vale do Rio Doce, MG. NI = controle (sem irrigação); IR = irrigado; IR-2/3 = irrigado com 2/3 da lâmina aplicada no tratamento IR.

A biomassa da parte aérea representa a mais importante característica de um povoamento, pois freqüentemente reflete a produção final de madeira. As florestas localizadas em regiões tropicais, em razão das condições climáticas favoráveis, apresentam, de modo geral, produção elevada de biomassa. Temperatura, insolação e precipitação elevadas fazem com que essas florestas produzam até três vezes mais biomassa do que as florestas temperadas e boreais, num mesmo intervalo de tempo (MARION, 1979, *apud* LOURENÇO, 2009). Na literatura pode-se encontrar diferentes trabalhos mostrando a influência do uso de nutrientes e da irrigação na produção final de biomassa seca (REED; TOMÉ, 1998; NEVES, 2000; HUNTER, 2001; STAPE, 2002; SILVA, 2006; STAPE et al., 2008). Todos estes trabalhos destacam diferentes acúmulos

de biomassa de acordo com as características genéticas das plantas e, principalmente, o manejo dado á água e aos nutrientes.

Os resultados observados vêm contribuir para a solidificação destas afirmações no que diz respeito aos efeitos positivos de um maior suprimento de água no crescimento e desenvolvimento do eucalipto, entre eles, Stape et al. (2004a) encontraram tendência semelhante a observada no presente trabalho quando avaliaram o efeito do suprimento de água sobre clones de *Eucalyptus grandis x urophylla*, na região nordeste da Bahia, observando um aumento de 32% na produção de biomassa nas parcelas sob efeito da irrigação. Estes autores constataram que o incremento na produção de madeira, observado no tratamento irrigado comparado ao não irrigado, foi significativamente maior no ano considerado normal com relação ao total precipitado, comparado às observações feitas em ano considerado chuvoso, o que salienta a importância do suprimento de água e o potencial uso da irrigação como opção de manejo.

Neste mesmo sentido, Hunter (2001), trabalhando com eucalipto (*E. grandis*) no sul da Índia, aplicou quatro diferentes níveis de água e observou um incremento significativo e linear na produção de madeira em árvores de três anos de idade.

3.2. Simulação das necessidades hídricas

As necessidades hídricas da cultura foram simuladas por meio do 'software' IRRIPLUS® e a lâmina de irrigação recomendada foi determinada. Assim, fixou-se esta lâmina como aquela que supriria 100% das necessidades da cultura e a partir dela estabeleceu-se os cenários para a simulação da produtividade no modelo 3-PG. Na Figura 3, são mostradas a lâmina real aplicada (*IR*) e a lâmina recomendada pelo IRRIPLUS® (*IRRI-1*), em base mensal.

Observa-se que a lâmina aplicada foi inferior a recomendada, sendo que ao final do ciclo a lâmina real aplicada foi de 4114,7 mm, enquanto que a lâmina

recomendada pelo IRRIPLUS® foi de 6374,0 mm. Ainda que o tratamento *IR* tenha se baseado nos valores de ET_o , o manejo da irrigação do experimento teve como premissa fixar seu valor máximo em 5 mm dia^{-1} , o que certamente contribuiu para que os valores aplicados tenham ficado abaixo daqueles recomendados pelo IRRIPLUS®, que, por sua vez, também se baseia nos valores de evapotranspiração (*ET*) para determinar a lâmina a ser aplicada para suprir as necessidades da cultura. Além disto, no manejo praticado na condução do experimento, houve meses em que não foi realizada irrigação ou, se realizada, foram aplicadas lâminas muito baixas, possivelmente apenas para a aplicação de fertilizantes, mesmo tendo sido registrados, no mês respectivo, elevados valores de *ET*.

É importante destacar que mesmo a lâmina real aplicada tendo sido inferior a recomendada, a cultura respondeu a este incremento no suprimento de água, como foi observado pelo aumento na produção de biomassa mostrado na Figura 3, esperando-se desta forma uma resposta ainda maior quando se aplicar a lâmina recomendada.

Estimou-se a umidade do solo para as condições *IR* e *IRRI-1* e *NI*. Nota-se, neste aspecto, a sensibilidade do programa em captar os efeitos das precipitações e irrigações aplicadas, característica destacada por Silva e Espíndula Neto (s.d.) quando estes autores compararam dados de água disponível no solo observados em campo e estimados pelo 'software', mostrando uma ótima concordância entre estes valores.

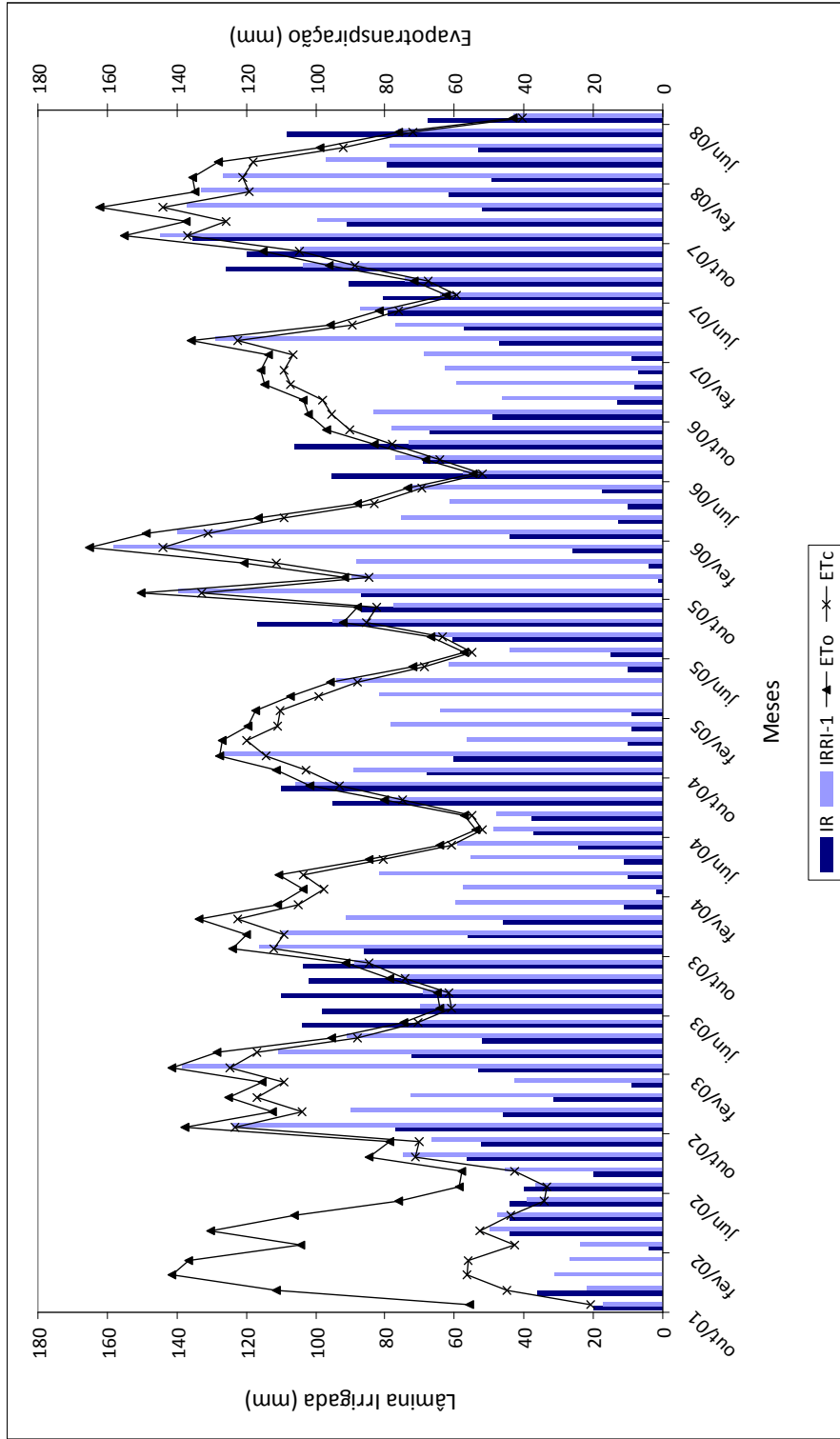


Figura 3 – Lâmina de irrigação aplicada (IR) e lâmina de irrigação recomendada pelo IRRIPUS® (IRRI-1), evapotranspiração de referência (ET_c) e evapotranspiração da cultura (ET_c), mensais, calculadas para a cultura do eucalipto e para as condições climáticas observadas no local do experimento, no período de out./2001 a jun./2008.

Comparando-se as umidades do solo sob condições *IR* e *IRRI-1* (Figura 4), nota-se que a lâmina recomendada garantiria a manutenção da umidade do solo sempre acima da umidade de segurança, praticamente eliminando situações de déficit, ao contrário do observado no cenário *IR*, quando a umidade esteve, por diversos dias, próxima ao PMP. Esta situação foi bastante pronunciada também para as condições de sequeiro, *NI* (Figura 5), ainda que tenha sido observado um regime hídrico acima da média da região na maior parte do período estudado, porém evidenciando a sazonalidade dos eventos de chuva.

De acordo com Almeida et al. (2007), o crescimento da floresta é afetado pela disponibilidade de água, particularmente pela seca. Concordando com Souza et al. (2006) que afirmaram que a relação entre a disponibilidade hídrica e a produtividade florestal é concernente aos efeitos diretos e indiretos da deficiência de água no crescimento das árvores, tais como redução da fotossíntese e diminuição do aporte nutricional as plantas, entre outros, e Binkley et al. (2004) que concluíram em seu estudo que a eficiência no uso de recursos, como luz e nutrientes, aumenta com a maior disponibilidade de água. Assim, as diferenças entre as umidades do solo, observadas nos diversos cenários estudados, permitem avaliar opções de manejo que poderiam favorecer melhores rendimentos de determinado sítio de plantio, associando estudos de disponibilidade de água e respostas da cultura a diferentes aportes hídricos.

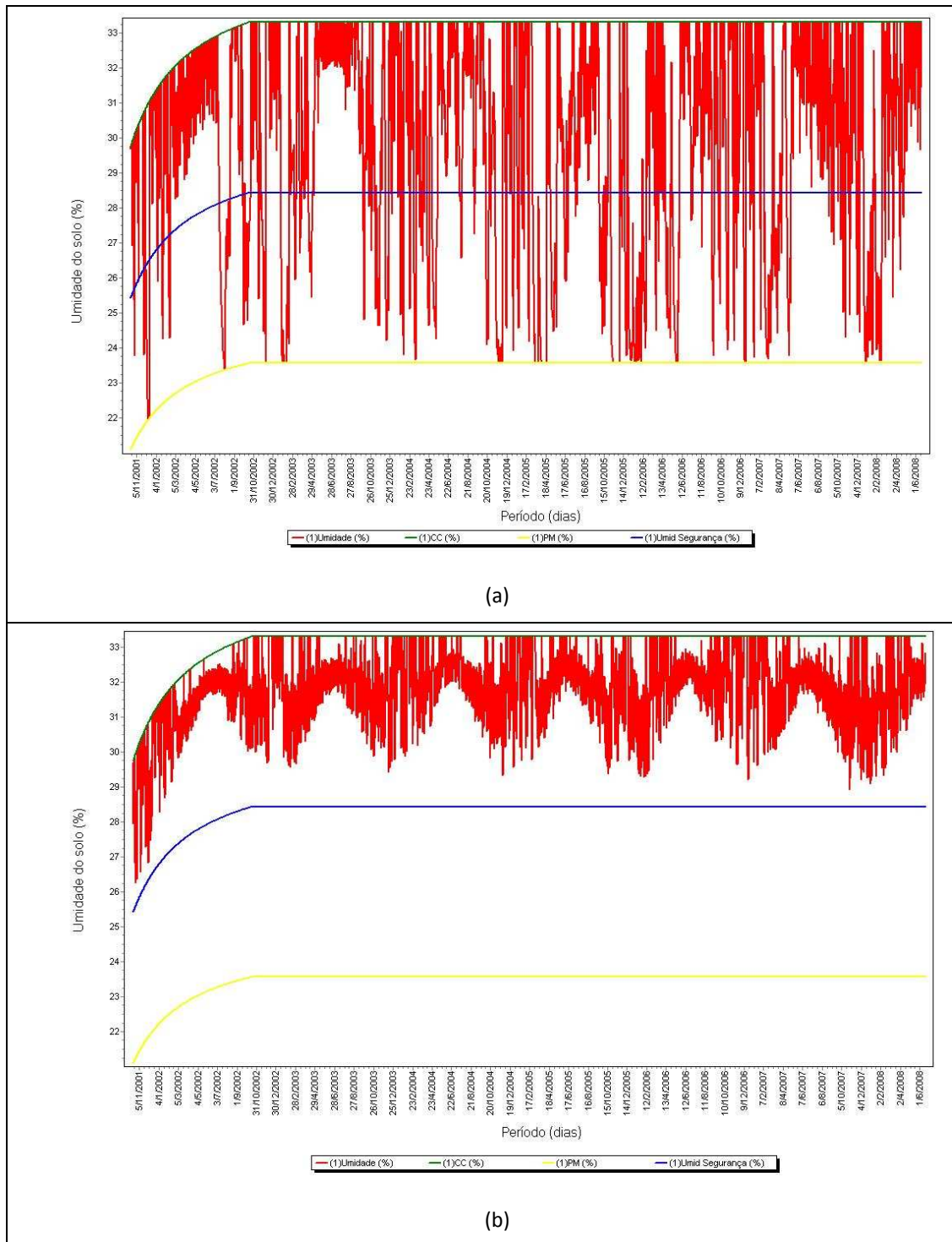


Figura 4 – Valores diários de umidade do solo estimada pelo IRRIPLUS® para as condições de (a) irrigação real aplicada – *IR* e (b) lâmina de irrigação recomendada pelo IRRIPLUS® - *IRRI-1*.

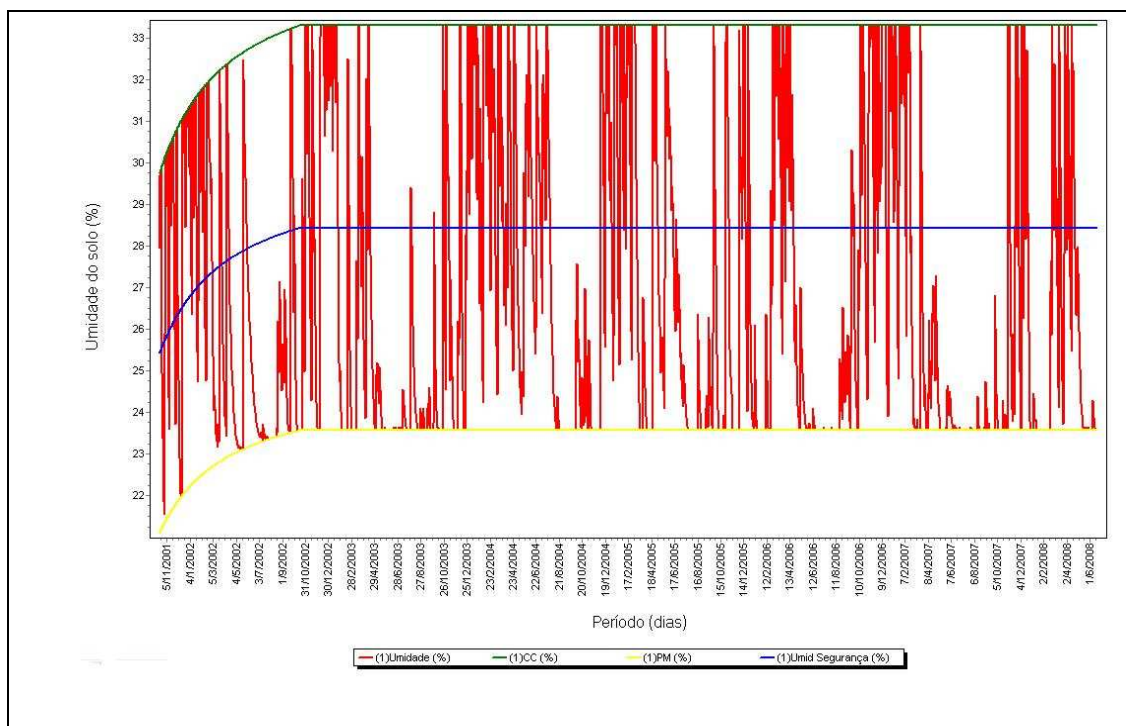


Figura 5 – Valores diários de umidade do solo estimada pelo IRRIPLUS® para as condições de sequeiro, tratamento controle - NI.

3.3. Estimativa da produtividade da cultura

A produtividade da cultura foi estimada pelo modelo 3-PG (LANDSBERG; WARING, 1997) utilizando a parametrização e calibração feita por Silva (2006) para a região Centro-Leste de Minas Gerais.

Inicialmente, a simulação foi rodada para os cenários reais NI e IR, a fim de se estabelecer uma comparação entre a simulação e os dados observados. Utilizou-se a variável biomassa da parte aérea (BPA) para se estabelecer esta comparação. Para o tratamento IR foi observado uma boa correlação entre os valores observados e simulados expressa pelo coeficiente de determinação $r^2 = 0,9959$ e o índice de concordância $d = 0,9974$, o que indicou que o 3-PG estimou com qualidade a biomassa da parte aérea (Figura 6).

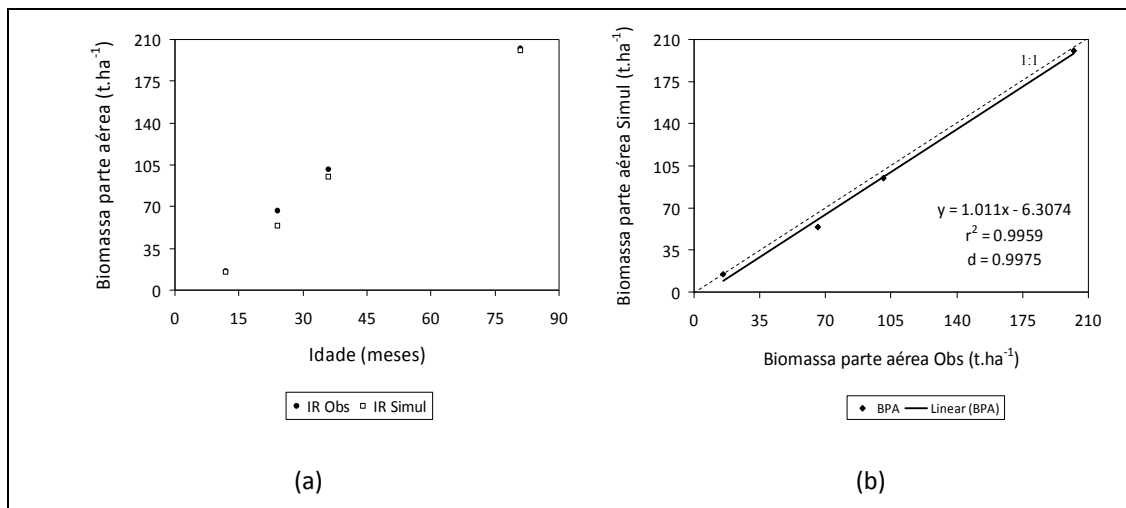


Figura 6 – Valores de biomassa da parte aérea (BPA) do eucalipto (a), observados e simulados pelo modelo 3-PG (calibração de SILVA, 2006) ao longo do ciclo da cultura do eucalipto, cultivada sob irrigação (tratamento IR), na região do Rio Doce-MG, no período de out./2001 a jun./2008; correlação entre a BPA observada e a BPA simulada (b).

Já para o tratamento *NI*, observou-se uma subestimativa do modelo com relação aos dados observados, conforme é possível observar na Figura 7a. Em modelos processuais o mais importante é que a declividade das equações não difira de 1. Um valor de declividade igual a 1, ou não diferente estatisticamente de 1, indica, ou reflete, o fato de que o tratamento dado pelo modelo aos processos envolvidos está bom. Os valores de r^2 e de d foram relativamente elevados, 0,9932 e 0,9967, respectivamente (Figura 7b).

Para o tratamento *IR-2/3* não foi possível fazer esta análise por haver apenas um ponto observado (ao final do ciclo), mas, vale destacar que a BPA observada neste tratamento foi igual a 186,0 t.ha⁻¹ enquanto que o valor estimado foi de 179,0 t.ha⁻¹, uma diferença pequena de apenas 3,9%.

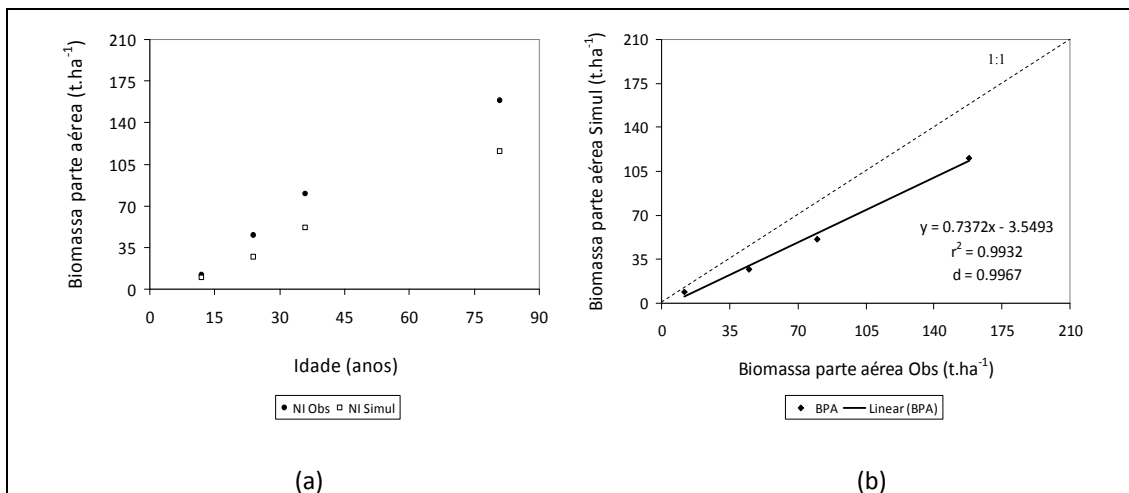


Figura 7 – Valores de biomassa da parte aérea (BPA) do eucalipto (a), observado e simulados pelo modelo 3-PG (calibração de SILVA, 2006) ao longo do ciclo da cultura do eucalipto, cultivada sem irrigação (tratamento NI), na região do Rio Doce-MG, no período de out./2001 a jun./2008; correlação entre a BPA observada e a BPA simulada pelo modelo 3-PG (b).

Esta diferença entre as correlações observadas nos tratamentos *IR* e *NI* se deu pelo fato de que a parametrização e calibração do modelo 3-PG utilizada, desenvolvida por Silva (2006), foi estabelecida com base em dados levantados no experimento em que se utilizou o tratamento sem limitação hídrica e nutricional. Portanto, o modelo foi executado considerando não haver limitação por água e por nutrientes, por isto simulou tão bem a biomassa para o tratamento *IR*, fato não observado com uma correlação tão alta para o tratamento *NI*. Isto indica uma particularidade do modelo 3-PG, a necessidade de parametrização e calibração do mesmo, por meio de ajustes dos valores dos parâmetros ou relacionamentos, para as condições específicas do sítio florestal trabalhado, para melhorar a acurácia das estimativas de produção.

Desta forma, a fim de estimar com maior coerência as variáveis de produtividade da cultura, ajustou-se uma calibração do modelo 3-PG que atendessem às condições de sequeiro e às características inerentes a região em

estudo, encontrando valores de BPA que se correlacionaram melhor aos dados observados e, por sua vez, proporcionaria uma estimativa mais coerente das demais variáveis. Este ajuste permitiu que se estimasse a produtividade da cultura em condições de sequeiro com maior acurácia de forma que o ganho proporcionado pelas diversas lâminas de irrigação simuladas em relação ao tratamento *NI*, pudesse ser determinado com segurança. Este novo estudo conjugou índices utilizados na parametrização e calibração do modelo propostas por Silva (2006) com índices propostos por Borges (2009) para condições de sequeiro (Anexo). A comparação entre os valores observados de BPA e aqueles estimados pela calibração ajustada do 3-PG é mostrada na Figura 8, tendo sido encontrada uma melhor correlação que na estimativa anterior, apesar do r^2 mais baixo, devido a maior dispersão dos dados.

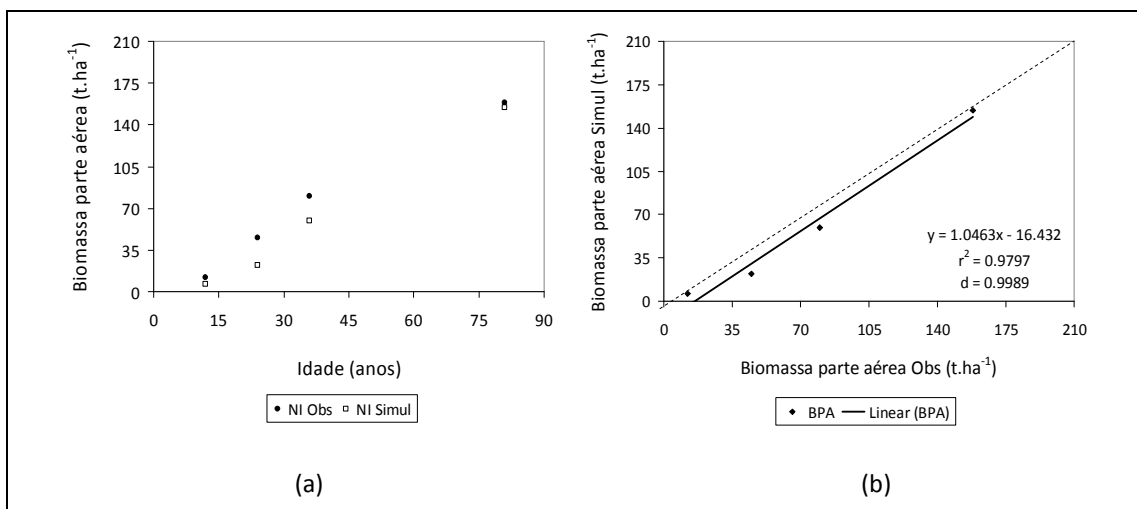


Figura 8 – Valores de biomassa da parte aérea (BPA) do eucalipto (a), observado e simulados pelo modelo 3-PG (calibração ajustada, SILVA, 2006 e BORGES, 2009) ao longo do ciclo da cultura do eucalipto, cultivada sem irrigação (tratamento NI), na região do Rio Doce-MG, no período de out./2001 a jun./2008; correlação entre a BPA observada e a BPA simulada pelo modelo 3-PG (b).

Quanto aos ajustes feitos no modelo, Stape et al. (2004c) relatam que encontraram uma alta correlação entre os dados observados e os dados simulados pelo 3-PG em trabalho desenvolvido na região nordeste do estado da Bahia, mas salientam que, de maneira geral, o 3-PG requer um razoável nível de calibração local, conforme observado nas comparações feitas nesse trabalho. De acordo com estes autores, a superioridade do 3-PG foi especialmente evidente em captar os efeitos das variações interanuais na precipitação e adição de fertilizantes.

Diante da boa correlação encontrada para *BPA*, foram estimadas as variáveis *DAP*, *Ht*, *V* e *IMA* para os cenários *NI*, *IR*, *IR-2/3*, *IRRI-1*, *IRRI-2* e *IRRI-3* (Figuras 9, 10, 11 e 12). As lâminas totais aplicadas em cada um destes cenários e o ganho relativo dos valores finais destas variáveis, estimados para os tratamentos irrigados comparados ao *NI*, são apresentados na Tabela 7.

Inicialmente, destaca-se o comentário feito por Stape et al. (2004c), de que o 3-PG capta bem as variações interanuais na precipitação, observada nas curvas geradas para o tratamento *NI*, onde a cultura está somente sob o efeito das precipitações no que diz respeito ao suprimento hídrico. Para este tratamento, as curvas de todas as variáveis simuladas apresentam uma oscilação, mais evidente na curva do *IMA*, que vai sendo atenuada nas outras curvas a medida que se aumenta a lâmina de irrigação aplicada. Neste contexto, evidenciam-se dois aspectos, primeiro a sensibilidade do modelo com relação às variações no suprimento de água, bem retratado na Figura 13, se firmando como uma ferramenta segura para a predição da produtividade sob diversas estratégias de manejo, considerando a afirmação de Almeida e Soares (1997) de que a deficiência hídrica é um dos principais fatores limitantes da produtividade florestal, podendo este fator ser considerado um preditor desta produtividade. E, o segundo aspecto, é a confirmação de que com a irrigação, e conseqüente redução nos eventos de déficit hídrico, a cultura apresenta um crescimento mais homogêneo ao longo do ciclo, garantindo maiores produtividades ao final.

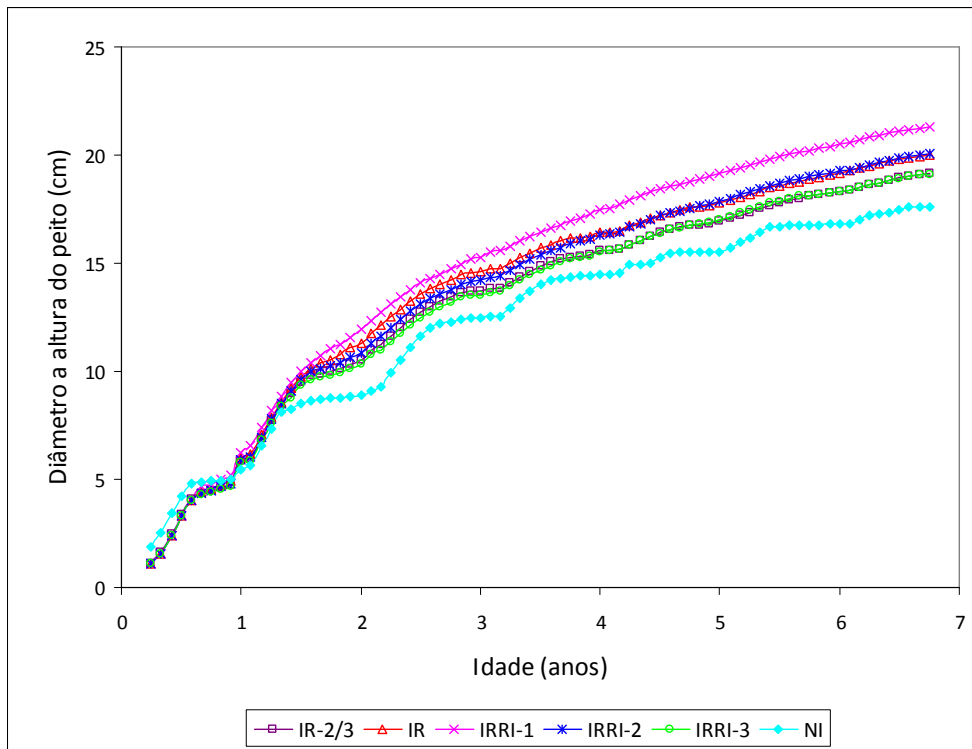


Figura 9 – Diâmetro a altura do peito (DAP), em cm, estimado pelo 3-PG ao longo do ciclo produtivo da cultura do Eucalipto sob seis diferentes cenários de disponibilidade de água, no período de out/2001 a jun/2008. Cenários: NI = sem irrigação; IR-2/3 = 2/3 da lâmina de irrigação real aplicada; IR = lâmina de irrigação real aplicada; IRR1-1 = lâmina de irrigação recomendada pelo IRRIPLUS; IRR1-2 = 2/3 da lâmina de irrigação recomendada pelo IRRIPLUS; IRR1-3 = 1/2 da lâmina de irrigação recomendada pelo IRRIPLUS.

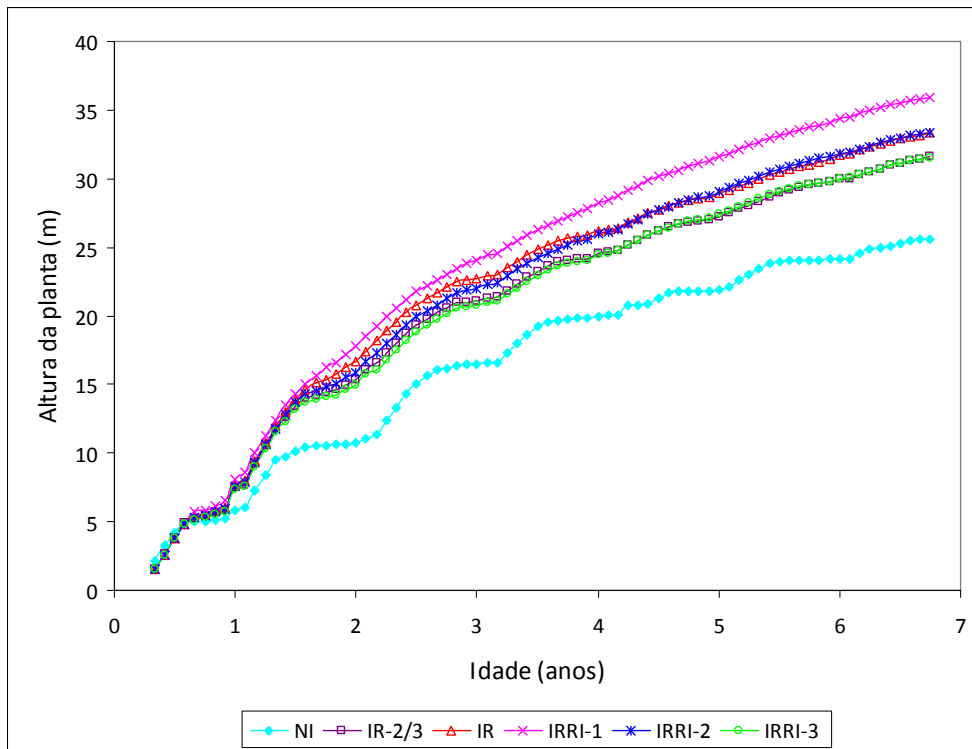


Figura 10 – Altura total da planta (Ht), em m, estimada pelo 3-PG ao longo do ciclo produtivo da cultura do Eucalipto sob seis diferentes cenários de disponibilidade de água, no período de out/2001 a jun/2008. Cenários: NI = sem irrigação; IR-2/3 = 2/3 da lâmina de irrigação real aplicada; IR = lâmina de irrigação real aplicada; IRRI-1 = lâmina de irrigação recomendada pelo IRRIPLUS; IRRI-2 = 2/3 da lâmina de irrigação recomendada pelo IRRIPLUS; IRRI-3 = 1/2 da lâmina de irrigação recomendada pelo IRRIPLUS.

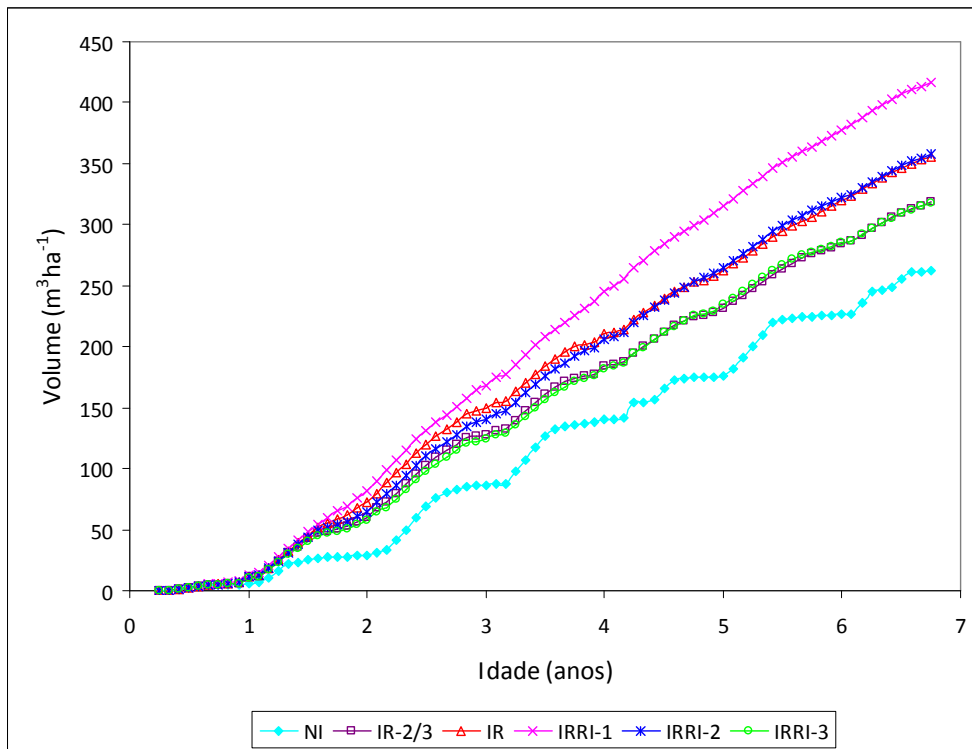


Figura 11 – Volume (V), em $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, estimado pelo 3-PG ao longo do ciclo produtivo da cultura do Eucalipto sob seis diferentes cenários de disponibilidade de água, no período de out/2001 a jun/2008. Cenários: NI = sem irrigação; IR-2/3 = 2/3 da lâmina de irrigação real aplicada; IR = lâmina de irrigação real aplicada; IRR1-1 = lâmina de irrigação recomendada pelo IRRIPLUS; IRR1-2 = 2/3 da lâmina de irrigação recomendada pelo IRRIPLUS; IRR1-3 = 1/2 da lâmina de irrigação recomendada pelo IRRIPLUS.

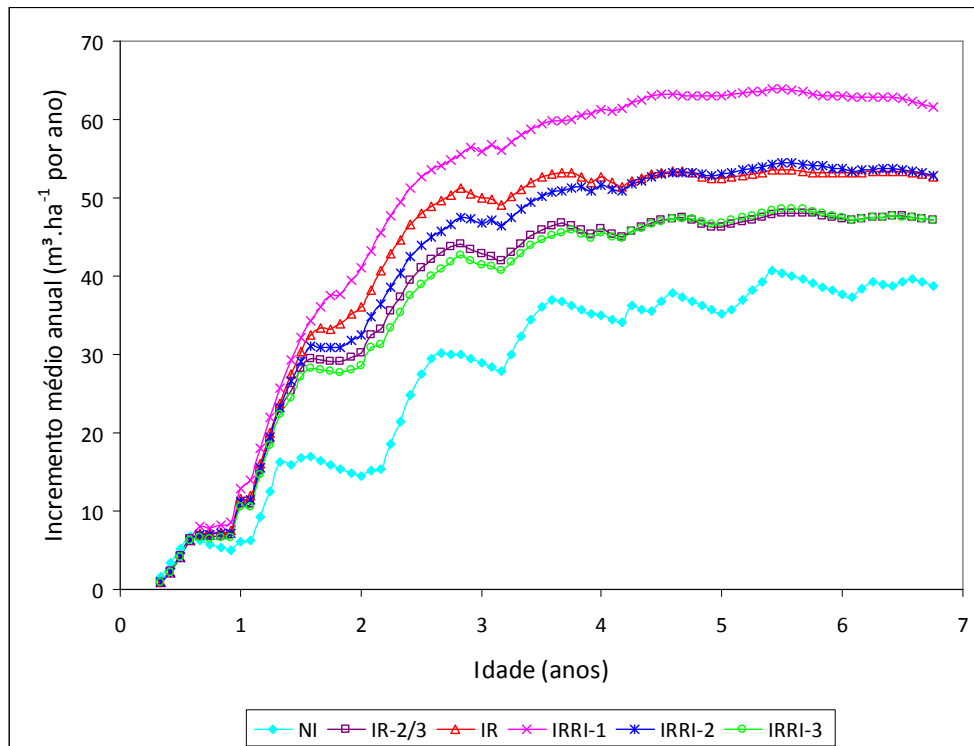


Figura 12 – Incremento médio anual (IMA), em $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ por ano, estimado pelo 3-PG ao longo do ciclo produtivo da cultura do Eucalipto sob seis diferentes cenários de disponibilidade de água, no período de out/2001 a jun/2008. Cenários: NI = sem irrigação; IR-2/3 = 2/3 da lâmina de irrigação real aplicada; IR = lâmina de irrigação real aplicada; IRRI-1 = lâmina de irrigação recomendada pelo IRRIPPLUS; IRRI-2 = 2/3 da lâmina de irrigação recomendada pelo IRRIPPLUS; IRRI-3 = 1/2 da lâmina de irrigação recomendada pelo IRRIPPLUS.

Tabela 7 – Lâmina total aplicada em cada cenário testado, diâmetro a altura do peito (DAP), altura total da planta (Ht), volume (V) e incremento médio anual (IMA) estimados e seu ganho relativo devido ao incremento na lâmina aplicada

Variável	Cenários de disponibilidade de água					
	NI	IR-2/3	IR	IRRI-1	IRRI-2	IRRI-3
	Lâmina (mm)/Incremento (%)¹					
Lâmina total (Prec + Irri)	8645	11548/25	12760/32	15017/42	12894/33	11832/27
	Valor estimado/Ganho relativo (%)²					
<i>BPA</i> (m ³ .ha ⁻¹)	154,5	179,2/14	200,6/23	234,3/34	201,4/23	179,2/14
<i>DAP</i> (cm)	17,6	19,2/8	20,0/12	21,3/17	20,0/12	19,1/8
<i>Ht</i> (m)	25,6	31,6/19	33,1/23	35,9/29	33,4/23	31,5/19
<i>V</i> (m ³ .ha ⁻¹)	262,0	318,7/18	355,9/26	416,2/37	357,4/27	317,8/18
<i>IMA Max</i> (m ³ .ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	40,7	48,1/15	53,6/24	63,9/36	54,4/25	48,6/16

¹ Incremento na lâmina aplicada em relação ao tratamento NI .

² Ganho percentual dos valores da variável estimada em relação a estimativa feita para o tratamento NI.

No que tange a comparação entre as lâminas realmente aplicadas e aquelas sugeridas pelo IRRIPPLUS®, observa-se na Tabela 7 que a lâmina aplicada no tratamento *IR* foi equivalente a 2/3 da lâmina sugerida (*IRRI-2*), o mesmo se observou entre as lâminas aplicadas em *IR-2/3* e *IRRI-3*, tendo sido constatado respostas também equivalentes nos valores das variáveis estimadas sob estas condições.

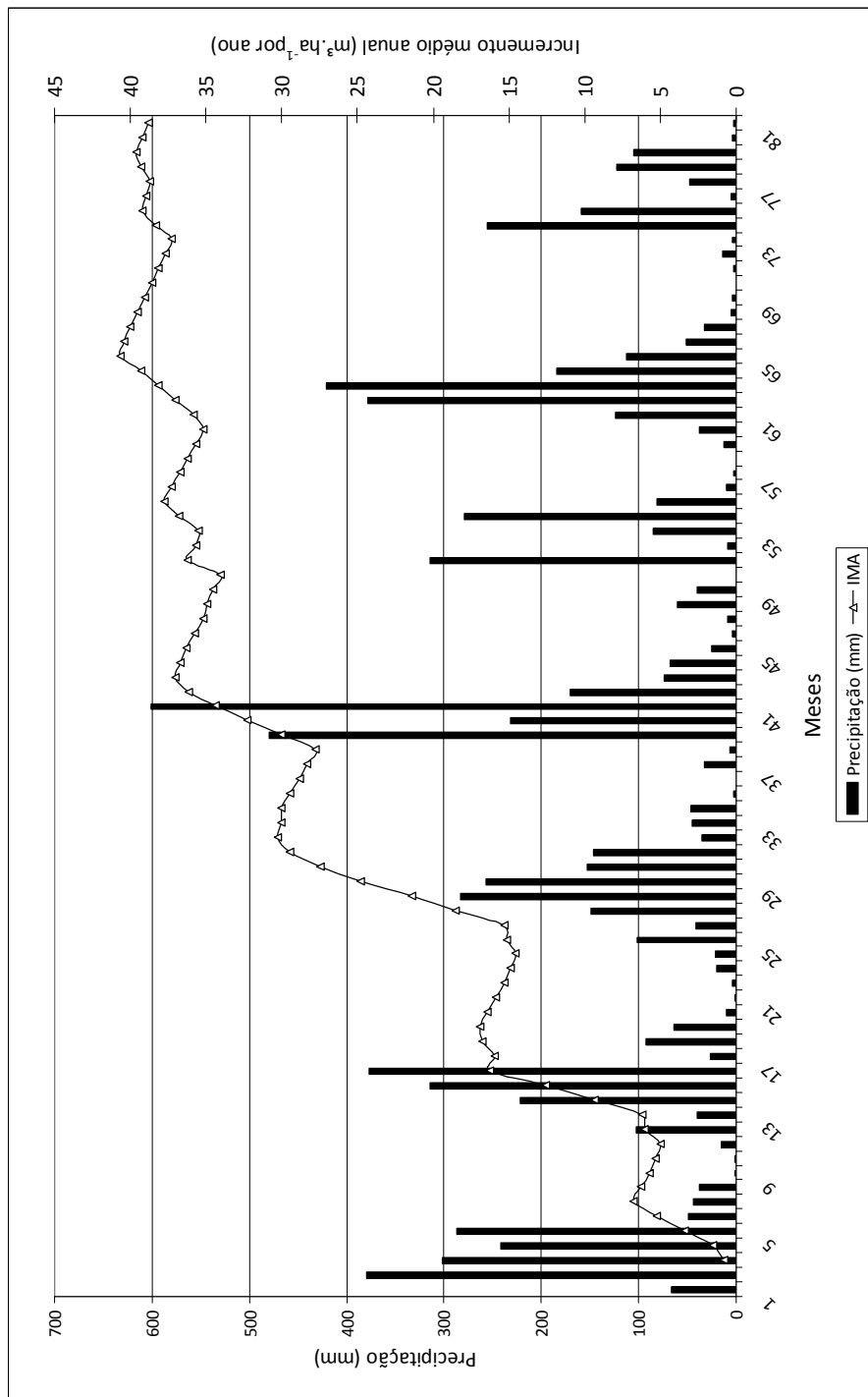


Figura 13 – Incremento médio anual (IMA), em $m^3 \cdot ha^{-1}$ por ano, estimado pelo 3-PG ao longo do ciclo produtivo da cultura do eucalipto sob tratamento NI (sem irrigação) e precipitações mensais ocorridas, na região do Rio Doce-MG, no período de out./2001 a jun./2008.

Observa-se um aumento gradual dos valores das variáveis simuladas à medida que se aumentou a lâmina aplicada, dando destaque no presente trabalho às variáveis IMA e BPA (Figura 14), conforme encontrado por Hunter (2001) em trabalho desenvolvido na Índia, quando foi testado o efeito de quatro lâminas de irrigação sobre a biomassa seca de duas diferentes espécies de eucalipto, ambas responderam linearmente ao incremento no suprimento de água.

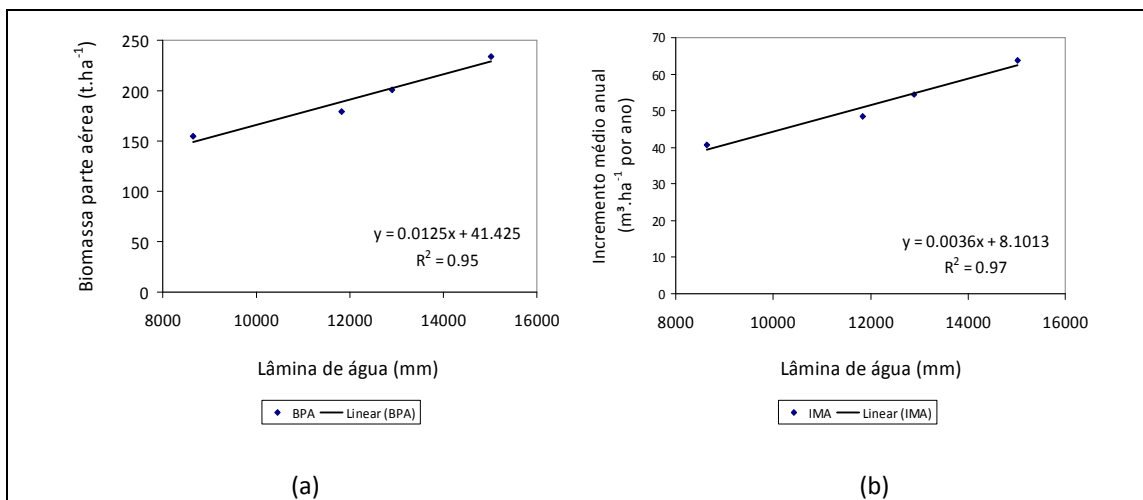


Figura 14 – Biomassa da parte aérea final (BPA) (a) e incremento médio anual máximo (IMA) (b) estimados pelo modelo 3-PG em função de diferentes lâminas de irrigação recomendadas pelo ‘software’ IRRIPPLUS®, para a região do Rio Doce-MG.

São poucos os trabalhos que testam diversas lâminas de irrigação, a maioria deles propõe tratamentos irrigados e não irrigados, conjugados a fertirrigação, além das dificuldades encontradas na condução de experimentos em plantios florestais devido a longa duração dos ciclos de plantio e a necessidade de áreas extensas para que se tenha uma boa representatividade dos eventos a serem avaliados, desta forma, obter informações confiáveis advindas de simulações pode trazer contribuições valiosas tanto para

trabalhos de pesquisa como para auxiliar nas práticas relacionadas ao manejo do plantio.

Por meio dos resultados aqui obtidos é possível afirmar que a irrigação gera efeitos positivos sobre a produtividade do eucalipto. Evidencia-se o aspecto de que, para região estudada, houve um ganho real quando aplicada uma lâmina inferior àquela que seria recomendada, ou seja, maior produtividade nos tratamentos IR quando comparados com NI, com um ganho relativo de 23% em BPA, ainda que a lâmina aplicada em IR devesse ser maior, considerando as condições climáticas, exigências da cultura e solo, conforme recomendado pelo IRRIPLUS®. Os ganhos observados nas estimativas feitas pelo 3-PG quando aplicada a lâmina IRRI-1 indicam que ainda há “espaço” para o crescimento e aumento da produtividade da cultura, lembrando que as simulações foram feitas sob condições nutricionais ótimas, tendo como limitação, ou fonte de variação, somente o suprimento de água.

4. CONCLUSÕES

As estimativas de biomassa da parte aérea da cultura do eucalipto feitas por meio do modelo 3-PG apresentaram uma boa correlação com os dados observados nos tratamentos *IR* e *NI*, o que permitiu que as demais variáveis (*DAP*, *V*, *H_t* e *IMA*) fossem estimadas com segurança, sob as mesmas condições e sob influência das lâminas de irrigação recomendadas pelo ‘software’ IRRIPLUS®.

As variáveis avaliadas apresentaram incremento positivo quando submetidas aos diferentes cenários de disponibilidade hídrica, respondendo linearmente ao acréscimo no suprimento de água, apresentando ganhos relativos proporcionais ao acréscimo nas lâminas aplicadas.

O modelo 3-PG foi sensível às variações das precipitações, o que o caracteriza como uma útil ferramenta de predição da produtividade de plantios florestais, desde que bem calibrado para as condições do sítio de plantio em estudo.

5. REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 308 p. (FAO Irrigation and Drainage, 56).

ALMEIDA, A.C.; SOARES, J.V. Análise da influência da variabilidade hidrometeorológica interanual no crescimento de plantações de eucalipto. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL IUFRO SOBRE SILVICULTURA E MELHORAMENTO GENÉTICO DE EUCALIPTOS, 1997, Salvador. **Anais...** Salvador: IUFRO, 1997.

ALMEIDA, A.C.; LANDSBERG, J.J. Evaluating methods of estimating global radiation and vapor pressure deficit using a dense network of automatic weather stations in coastal Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, n. 118, p. 237-250, 2003.

ALMEIDA, A.C.; MAESTRI, R.; LANDSBERG, J.J.; SCOLFORD, J.R.S. Linking process-based and empirical forest models in eucalyptus plantations in Brazil. In: AMARO, A.; TOMÉ, M. (Eds.). **Modelling forest systems**. Wallingford, UK: CABI, 2003. p. 63-74, 2003.

ALMEIDA, A.C.; LANDSBERG, J.J.; SANDS, P.J.; AMBROGI, M.S.; FONSECA, S.; BARDDAL, S.M.; BERTOLUCCI, F.L. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in fast growing Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, n. 193, p. 167-177, 2004a.

ALMEIDA, A.; LANDBERG, L.; SANDS, P.J. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, n. 193, p. 179-195, 2004b.

ALMEIDA, A.C.; SOARES, J.V.; LANDBERG, J.J.; REZENDE, G.D. Growth and water balance of *Eucalyptus grandis* hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. **Forest Ecology and Management**, n. 251, p. 10-21, 2007.

AMARAL, G. **Características químicas e físicas de diferentes classes de solos da zona metalúrgica mineira e produtividade de eucalipto**. 2000. 98 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2009**: ano base 2008. Brasília, 2009. 120 p.

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

BINKLEY, D.; STAPE, J.L.; RYAN, M.G. Thinking about efficiency of resource use in forests. **Forest Ecology and Management**, n. 193, p. 5-16, 2004.

BORGES, J.S. **Parametrização, calibração e validação do modelo 3-PG para eucalipto na região do Cerrado de Minas Gerais**. 2009. 77 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

CALDER, I.R. Water use of eucalypts – a review. In: CALDER, I.R.; HALL, R.L.; ADLARD, P.G. (Eds.). **Growth and water use of forest plantations**. Chichester: Wiley, 1992. p. 167-179.

CALDER, I.R. Water use by forests, limits and controls. **Tree Physiology**, n. 18, p. 625-631, 1998.

COOPS, N.C.; WARING, R.H. Assessing forest growth across southwestern Oregon under a range of current and future global change scenarios using a process model, 3-PG. **Global Change Biology**, n. 7, p. 15-29, 2001a.

COOPS, N.C.; WARING, R.H. Estimating maximum potential site productivity and site water stress of the Eastern Siskiyou Mountains of southwestern Oregon using a satellite driven process model, 3-PGS. **Can. J. For. Res.**, n. 31, p. 143-154, 2001b.

COOPS, N.C.; WARING, R.H.; LANDSBERG, J.J. Assessing forest productivity in Australia and New Zealand using a physiologically-based model driven with averaged monthly weather data and satellite-derived estimates of canopy productivity. **Forest Ecology and Management**, n. 104, p. 113-127, 1998a.

COOPS, N.C.; WARING, R.H.; LANDSBERG, J.J. The development of a physiological model (3-PGS) to predict forest productivity using satellite data. In: NABUURS, G.; NUUTINEN, T.; BARTELINK, H.; KOORHONEN, M. (Eds.). Forest scenario modelling for ecosystem management at landscape level. **EFI Proceedings**, p. 173-191, 1998b.

CORDEIRO, E.A. **Diagnóstico e manejo da irrigação na cultura do mamoeiro na região Norte do Estado do Espírito Santo**. 2006. 100 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

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

DYE, P.J. Modelling growth and water use in four *Pinus patula* stands with the 3-PG process-based model. **South Africa Forestry Journal**, n. 191, p. 53-63, 2001.

DYE, P.J. Verification of 3-PG growth and water-use predictions in twelve *Eucalyptus* plantations stands in Zululand, South Africa. **Forest Ecology and Management**, n. 193, p. 197-218, 2004.

ESPREY, L.J.; SANDS, P.J.; SMITH, C.W. Understanding 3-PG using a sensitivity analysis. **Forest Ecology and Management**, n. 193, p. 235-250, 2004.

FACCO, A.G. **Modelagem e simulação geoespacial dos componentes do balanço hídrico para plantios de eucalipto em áreas de relevo ondulado**. 2004. 87 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

HUNTER, I. Above ground biomass and nutrient uptake of three tree species (*Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus grandis* and *Dalbergia sissoo*) as affected by irrigation and fertilizer, at 3 years of age, in southern India. **Forest Ecology and Management**, n. 144, p. 189-199, 2001.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Avibook, 1990. 649 p.

LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, n. 95, p. 209-228, 1997.

LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H.; COOPS, N.C. Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. **Forest Ecology and Management**, n. 172, p. 199-214, 2003.

LIMA, W.P. **Impacto ambiental do eucalipto**. 2.ed. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo, 1996. 301 p.

LOURENÇO, H.M. **Crescimento e eficiência do uso de água e nutrientes em eucalipto fertirrigado**. 2009. 145 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MAESTRI, R.; SANQUETTA, C.R.; MACHADO, S.A.; SCOLFORO, J.R.S.; CORTE, A.P.D. Viabilidade de um projeto florestal de *Eucalyptus grandis* considerando o seqüestro de carbono. **Floresta**, v. 34, n. 3, p. 347-360, 2004.

MANTOVANI, E.C.; VICENTE, M.R.; ALVES, M.E.B.; BOMFIM NETO, H. Irrigação como fator de qualidade do café. In: ZAMBOLIM, L. **Boas práticas agrícolas na produção de café**. Viçosa: UFV, 2006. p. 117-165.

MARION, G.M. Biomass and nutrient removal in long-rotation stands. In: IMPACT OF INTENSIVE HARVESTING OF FOREST NUTRIENT CYCLING, 1979, Syracuse. **Proceedings...** Syracuse: Suny, 1979. p. 98-110.

MENEZES, A.A. **Produtividade do eucalipto e sua relação com a qualidade e a classe de solo**. 2005. 98 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MIELKE, M.S.; OLIVA, M.A.; BARROS, N.F.; PENCHEL, R.M.; MARTINEZ, C.A.; ALMEIDA, A.C. Stomatal control of transpiration in the canopy of a clonal *Eucalyptus grandis* plantation. **Trees**, n. 13, p. 152-160, 1999.

MUDRIK, A.S. **Manejo da irrigação por gotejamento em cafeeiros nas condições edafoclimáticas do cerrado do triângulo mineiro**. 2005. 82 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

NEVES, J.C.L. **Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo**. 2000. 191 p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ.

NUNES, V.V.; BOMFIM NETO, H.; MANTOVANI, E.C.; ZAMBOLIM, L.; COSTA, L.C.; SOUZA, A.F.; VICENTE, M.R. Incidência e severidade da cercosporiose em cafeeiros irrigados por gotejamento sob diferentes lâminas de irrigação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA, 8, 2006, Araguari. **Anais...** 2006. p. 89-93.

OLIVEIRA, A.A.K.; LEITE, A.S. **Projeto Leste: Folha Ipatinga – SE.24-Z-D-II, escala 1:100.000**. Belo Horizonte: SEME/COMIG/CPRM, 2000. v. 20, 58 p.

PASSIOURA, J.B. Simulation models: science, snake oil, education or engineering? **Journal of Agriculture**, n. 88, p. 690-694, 1996.

REED, D.; TOMÉ, M. Total aboveground biomass and net dry matter accumulation by plant component in young *Eucalyptus globulus* in response to irrigation. **Forest Ecology Management**, v. 103, p. 21-32, 1998.

SANDS, P.J.; LANDSBERG, J.J. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. **Forest Ecology and Management**, n. 163, p. 273-292, 2002.

SILVA, G.G.C. **Nutrição, crescimento e sua modelagem em povoamentos de eucalipto em resposta à disponibilidade de água e nutrientes**. 2006. 102 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SILVA, J.G.F.; ESPÍNDULA NETO, D. **Análise da demanda, eficiência de uso de água e rentabilidade de diferentes culturas**. Linhares, [s.d.]. 73 p. (Relatório de Pesquisa não publicado).

SOUZA, M.J.H.; RIBEIRO, A.; LEITE, H.G.; LEITE, F.P.; MINUZZI, R.B. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em três regiões da Bacia do Rio Doce. **Revista Árvore**, v. 30, n. 3, p. 399-410, 2006.

STAPE, J.L. **Production ecology of clonal eucalyptus plantations in northesastern Brazil**. 2002. 225 p. Tese (Doutorado) - Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; GOMES, A.N. Water use, water limitation, and water use efficiency in a *Eucalyptus* plantation. **Bosque**: Valdivia, Chile, v. 25, n. 2, p. 35-41, 2004a.

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

STAPE, J.L.; RYAN, M.G.; BINKLEY, D.; Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis* e *urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrientes. **Forest Ecology and Management**, n. 193, p. 219-234, 2004c.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**, v. 255, p. 920-930, 2008.

TOMAZELLO FILHO, M. **Efeito da irrigação e fertilização nas propriedades do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* x *urophylla***. 2006. 146 p. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura Luis de Queiróz, Piracicaba, SP.

TONELLO, K.C.; TEIXEIRA FILHO, J. Respostas fisiológicas de dois clones de eucalipto submetidos a diferentes potenciais hídricos. In: SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL, 2007, Taubaté. **Anais...** Taubaté: IPABHi, 2007. p. 287-294.

TICKLE, P.K.; COOPS, N.C.; HAFNER, S.D. Assessing forest productivity at local scales across a native eucalypt forest using the spatial model, 3PGSPATIAL. **Forest Ecology and Management**, n. 152, p. 275-291, 2001.

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

WHITEHEAD, D.; HALL, G.M.J.; WALCROFT, A.S.; BROWN, K.J.; LANDSBERG, J.J.; TISSUE, D.T.; TURNBULL, M.H.; GRIFFIN, K.L.; SCHUSTER, W.S.F.; CARSWELL, F.E.; TROTTER, C.M.; JAMES, I.L.; NORTON, D.A. Analysis of the growth of rimu (*Dacrydium cupressinum*) in South Westland, New Zealand, using process-based simulation models. **Int. J. Biometeorol**, n. 46, p. 66-75, 2002.

ANEXO

Tabela 1A – Valores dos principais parâmetros das diferentes parametrizações do modelo 3-PG utilizadas neste trabalho

Parâmetro	Símbolo	Unidade	P1	P2	P3
Biomassa inicial de folhas	W_F	t/ha	0,18	0,18	0,18
Biomassa inicial de stem (tronco + galhos)	W_S	t/ha	0,14	0,14	0,14
Biomassa inicial de raiz	W_R	t/ha	0,12	0,12	0,12
Partição folha/stem para D = 2 cm	pFS2	-	1	1,64	1,64
Partição folha/stem para D = 20 cm	pFS20	-	0,09	0,15	0,15
Constante do relacionamento entre massa do stem vs DAP	stemConst	-	0,1076	0,020	0,020
Potência do relacionamento entre massa do stem vs DAP	stemPower	-	2,51	3,11	3,11
Fração máxima da PPL para raízes	pRx	-	0,5	0,5	0,5
Fração mínima da PPL para raízes	pRn		0,1	0,1	0,1
Taxa de queda de "litter" para plantios em idade adulta	gammaFx	1/mês	0,1	0,07	0,07
Taxa de queda de "litter" para t = 0	gammaF0	1/mês	0,001	0,001	0,001
Idade em que a taxa de queda de "litter" tem valor médio	tgammaF	mês	12	4	4

Continua...

Tabela 1A, continuação

Parâmetro	Símbolo	Unidade	P1	P2	P3
Taxa média de ciclagem radicular	Rttover	1/mês	0,015	0,025	0,025
Temperatura mínima para o crescimento	Tmin	°C	8	8	8
Temperatura ótima para o crescimento	Topt	°C	25	25	25
Temperatura máxima para o crescimento	Tmax	°C	40	40	40
Valor de 'm' quando FR = 0	m0	-	0	0	0
Valor de f_N quando FR = 0	fN0	-	0,5	0,5	0,5
Potência de $(1 - FR)$, na expressão do f_N	fNn	-	1	1	1
Taxa de fertilidade do solo (FR)	FR	-	0,9	0,9	1
Parâmetro relacionado com disponibilidade de água no solo	Soil Class	-	C	C	C
Idade máxima do "stand" para computar a idade relativa	MaxAge	Ano	9	9	9
Potência da idade relativa na função para f_{age}	nAge	-	4	4	4
Idade relativa para dar $f_{age} = 0,5$	rAge	-	0,95	0,95	0,95
Área foliar específica para plantios em idade inicial	SLA0	m ² /kg	17	13,74	17
Área foliar específica para plantios em idade adulta	SLA1	m ² /kg	8,24	7,56	8,24
Idade na qual a área foliar específica = $\frac{1}{2}(\sigma_0 + \sigma_1)$	tSLA	ano	0,81	1,23	0,81
Coefficiente de extinção da RFAA pelo dossel	K	-	0,47	0,5	0,5
Idade de fechamento do dossel	fullCanAge	Ano	1	2	2
Máxima proporção de chuva interceptada pelo dossel	MaxIntcptn	-	0,15	0,15	0,15
IAF em que a interceptação de água pelo dossel é máxima	LAlmaxIntcptn	m ² /m ²	3,33	3,33	3,33
Eficiência quântica máxima do dossel	Alpha	-	0,07	0,08	0,08
Relação PPL/PPB	Y	-	0,47	0,5	0,5
Máxima condutância do dossel	MaxCond	m/s	0,02	0,02	0,02
IAF em que a condutância do dossel é máxima	LAlgcx	m ² /m ²	3,33	3,33	3,33

Continua...

Tabela 1A, continuação

Parâmetro	Símbolo	Unidade	P1	P2	P3
Define a resposta estomática ao déficit de pressão do vapor	CoeffCond	mbar ⁻¹	0,04	0,0324	0,0324
Condutância da camada limítrofe do dossel	BLcond	m/s	0,2	0,2	0,2
Massa de lenho máxima para cada 1000 árvores/ha	wSx1000	kg/arv.	300	300	300
Fração de galho e casca para plantios em idade inicial	fracBB0	-	0,79	0,59	0,59
Fração de galho e casca para plantios em idade adulta	fracBB1	-	0,11	0,19	0,19
Idade na qual a fração de galhos e casca = ½(PBB0+ PBB1)	tBB	Ano	1,35	2,17	2,17
Densidade básica mínima – plantios em idade inicial	rhoMin	t/m ³	0,356	0,382	0,382
Densidade básica máxima – plantios em idade adulta	rhoMax	t/m ³	0,500	0,505	0,505
Idade na qual a densidade básica = ½ (ρ0 + ρ1) 4 4 4	tRho	ano	2,1	2,264	2,264
Constante do relacionamento entre Altura vs DAP	aH	-	0,88563 3	0,67	0,67
Potência do relacionamento entre Altura vs DAP	nHB	-	1,21067	1,27	1,27
Constante do relacionamento entre Volume vs DAP	aV	-	-	0,0256	0,0256
Potência do relacionamento entre Volume vs DAP	nVB	-	-	3,22	3,22

P1 = Silva (2006); P2 = Borges (2009); P3 = parametrização ajustada com base em P1 e P2; D = diâmetro; Soil class = item de inicialização do 3-PG relacionado com a disponibilidade de água no solo; C = indica a classe textural do solo (muito argiloso); IAF = índice de área foliar; PPL = produção primária líquida e PPB = produção primária bruta; RFAA = radiação fotossinteticamente ativa absorvida.