

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Transpiração e eficiência do uso da água em árvores clonais de  
*Eucalyptus* aos 4 anos em áreas com e sem irrigação em Eunápolis,  
Bahia**

**Marina Shinkai Gentil**

**Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências. Área de concentração:  
Silvicultura e Manejo Florestal**

**Piracicaba  
2010**

Marina Shinkai Gentil  
Engenheiro Florestal

**Transpiração e eficiência do uso da água em árvores clonais de *Eucalyptus* aos 4 anos em áreas com e sem irrigação em Eunápolis, Bahia**

Orientador:  
Prof. Dr. **JOSÉ LUIZ STAPE**

**Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Silvicultura e Manejo Florestal**

**Piracicaba  
2010**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Gentil, Marina Shinkai

Transpiração e eficiência do uso da água em árvores clonais de *Eucalyptus* aos 4 anos em áreas com e sem irrigação em Eunápolis, Bahia / Marina Shinkai Gentil. - - Piracicaba, 2010.

71 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010.  
Bibliografia.

1. Água 2. Ecofisiologia vegetal 3. Eucalipto - Crescimento 4. Irrigação 5. Transpiração vegetal 6. Xilema I. Título

CDD 634.9734  
G338t

**"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"**

Aos meus pais, **PAULO** e **ELZA**, meus exemplos de vida.

Ao meu irmão **RENATO** e minha irmã **ELIZA**, meus grandes amigos.

Ao **RAFAEL**, meu grande companheiro.

## DEDICO

À minha avó **Takako Shinkai**.

Em memória de meus avôs **Paulo Antônio Gentil, Maria Piovezan Gentil e Massakatsu Shinkai**, pelas raízes.

## OFEREÇO



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, presente em todos os dias de minha vida.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ-USP) e ao Departamento de Ciências Florestais pela formação profissional.

Ao Prof. Dr. José Luiz Stape, pelos valiosos ensinamentos, dedicação e amizade que não faltaram em nenhum momento.

À empresa Veracel Celulose S/A, por meio dos Engenheiros David Evandro Fernandes e Sérgio Ricardo Silva, além de toda a equipe de campo e funcionários da Tecnologia Florestal pela oportunidade, profissionalismo e atenção despendidos ao longo de todo trabalho.

À toda equipe do Projeto BEPP (Brasil *Eucalyptus* Produtividade Potencial), ao IPEF (Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais), em especial aos pesquisadores Robert Hubbard (Rocky Mountain Research Station) e Jean Paul Laclau (CIRAD) pela oportunidade da realização do trabalho e do grande aprendizado propiciado.

Ao CNPq, pela bolsa de mestrado concedida.

Aos amigos e companheiros de trabalho Eng. Florestal Rodrigo Eiji Hakamada e Eng. Florestal José Henrique Bazani pela atenção e valiosa amizade.

Ao funcionário e amigo José Martins de Oliveira, ao pesquisador Juan Sinforiano Rojas e à aluna Aline Vergani pela dedicação e esforço para tornarem possíveis as atividades de campo.

Ao Grupo Florestal Monte Olimpo, meu grupo de estágio querido, por ter me proporcionado um aprimoramento de minha formação profissional e pessoal.

Aos amigos do LEFS (Laboratório de Ecofisiologia Florestal e Silvicultura), em especial a Ana Heloísa Marrichi, Otávio Campoe, Cristiane Zanni, Ana Paula Ferez e Juliana Biruel, pela importante colaboração e bons momentos vividos.

Às amigas de república durante a pós-graduação Selene Cristina de Pierre Castilho e Caroline Serrano pelos momentos de alegria e companheirismo.

Aos amigos Arthur Vrechi, Robson Minatel e Mateus Peressin pelo apoio, amizade e companheirismo.

À República Maga Donaire, minha Escola da vida.

Enfim a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho. Meu “muito obrigada”.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	
ABSTRACT.....	
1 INTRODUÇÃO .....	13
2 DESENVOLVIMENTO .....	17
2.1 A transpiração das plantas .....	17
2.2 Fatores que afetam a transpiração.....	18
2.2.1 Fatores Fisiológicos.....	18
2.2.2 Fatores Climáticos.....	20
2.2.3 Fatores edáficos.....	22
2.3 Fluxo Xilemático .....	23
2.4 Medidas de fluxo de seiva pelo Método de Granier .....	24
2.5 Modelo de Penman-Monteith .....	25
3 Material e Métodos.....	29
3.1 Caracterização da área experimental.....	29
3.2 Delineamento experimental.....	31
3.3 Avaliações .....	32
3.3.1 Dados meteorológicos.....	32
3.3.2 Fluxo de seiva e área de alburno .....	32
3.3.3 Calibração do Método de Granier .....	35
3.3.4 Avaliação do crescimento e eficiência do uso da água .....	36
3.3.5 Determinação da condutância da copa .....	37
3.3.6 Umidade do solo .....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
4.1 Calibração do método de Granier .....	42
4.2 Velocidade do fluxo de seiva.....	44
4.3 Área do Alburno .....	45
4.4 Transpiração .....	46
4.5 Biomassa e Crescimento.....	48
4.6 Eficiência do uso da água .....	53
4.7 Umidade no solo .....	55
4.8 Estimativa da transpiração pelo método de Penman-Monteith .....	58
5 CONCLUSÕES .....	63
REFERÊNCIAS .....	65





## RESUMO

### **Transpiração e eficiência do uso da água em árvores clonais de *Eucalyptus* aos 4 anos em áreas com e sem irrigação em Eunápolis, Bahia**

Conhecer o uso da água pelas árvores é fundamental para entender as interações entre o ambiente e as florestas e compreender seu crescimento por meio do entendimento dos processos que o governa. Objetivou-se com o trabalho determinar as taxas de transpiração, o crescimento e a eficiência do uso da água de árvores de *Eucalyptus*, por meio do método de Granier, em parcelas com e sem irrigação, além de compará-lo ao modelo de Penman-Monteith para estimativa da transpiração. O experimento foi realizado em um plantio de clone de *Eucalyptus*, instalado em março de 2001, no município de Eunápolis, BA. Para determinação da transpiração, foi avaliado o fluxo xilemático no período de agosto a dezembro de 2005, por meio de sondas instaladas no tronco das árvores. Para avaliação do crescimento das plantas, estimou-se o incremento de biomassa nos tratamentos a cada quatro meses, enquanto que a eficiência do uso da água (EUA) foi obtida pela razão entre o incremento de biomassa e quantidade de água transpirada no período. Adicionalmente, foi avaliada a variação da umidade no perfil do solo pelo sistema TDR nos dois tratamentos. Foi necessário calibrar o método de Granier, pois se observou que a equação original subestimou significativamente o uso de água. A densidade mensal do fluxo de seiva variou de 16,4 a 35,5 cm<sup>3</sup> cm<sup>-2</sup> hora<sup>-1</sup>, sem diferir entre os tratamentos. Enquanto a transpiração média das árvores irrigadas foi igual ou superior às não irrigadas, atingindo valores da ordem de 68 a 79 L arv<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, o incremento de biomassa foi superior no tratamento irrigado (16 kg planta<sup>-1</sup>) em relação ao não irrigado (10 kg planta<sup>-1</sup>), ou seja, o eucalipto não apresentou consumo de luxo de água, pois a água a mais transpirada pela árvores irrigadas foi efetivamente usada para auxiliar a fixação de carbono no tronco. A EUA não diferiu entre os tratamentos, com média de 1,0 g L<sup>-1</sup>. Observou-se que, independentemente do tratamento, árvores com maior biomassa inicial apresentaram EUA superior às árvores de menor porte durante o período do estudo. Obteve-se uma relação não linear entre condutância da copa e déficit de pressão de vapor, indicando que o eucalipto apresenta um controle estomático que limita a transpiração. Quando avaliado na escala mensal, o modelo de Penman-Monteith estimou com precisão a transpiração do eucalipto.

Palavras-chave: Fluxo xilemático; Sondas de Granier; Penman-Monteith



## ABSTRACT

### **Transpiration and water use efficiency in clonal 4 years-old *Eucalyptus* trees in irrigated and no irrigated areas in Eunápolis, Bahia**

Estimating the water use by trees is fundamental to understand the interactions between environment and plants and to know more about the processes that governs it. This work aimed to determine the transpiration rates, the growth and the water use efficiency of clonal *Eucalyptus* trees, using the Granier method, with or without irrigation, besides comparing it to the Penman-Monteith model for estimating transpiration. The experiment was accomplished in a *Eucalyptus* clonal plantation installed in March of 2001, in Eunapolis city, State of Bahia, Brazil. For determination of transpiration, the sap flow was evaluated in the period of August to December of 2005, using probes installed in the trees stems. To evaluate tree growth the biomass increment was considered in the treatments every four months, while the water use efficiency (WUE) was obtained by the ratio between the biomass increment and amount of water transpired in the period. Additionally, the variation of humidity was evaluated in the soil profile by the TDR system in both treatments. It was necessary to calibrate the Granier method because it was observed that the original equation underestimated the water use. The monthly sap flow density ranged from 16,4 to 35,5 cm<sup>3</sup> cm<sup>-2</sup> hour<sup>-1</sup> and not differing between treatments. While the average transpiration of the irrigated trees was equal or superior to the no irrigated ones, with values varying from 68 to 79 L day<sup>-1</sup> per tree, the biomass increment was superior in the irrigated treatment (16 kg tree<sup>-1</sup>) in relation to the no irrigated (10 kg tree<sup>-1</sup>). This results points that the *Eucalyptus* did not present luxury consumption of water, because the additional water transpired by the irrigated trees was used to allocate more carbon to the stem. The WUE did not differ between treatments, with average of 1,0 g L<sup>-1</sup>. It was observed that, independently of the treatment, trees with larger initial biomass presented highest WUE in relation to the smaller trees during the studied period. It was obtained a no linear relationship between canopy conductance and vapor pressure deficit, indicating that *Eucalyptus* presents a strong stomatal control that limit the transpiration. When used at monthly scale, Penman-Monteith model evaluated the transpiration of the *Eucalyptus* accurately.

Keywords: Sap flow; Granier probes; Penman-Monteith



## 1 INTRODUÇÃO

A área de plantio de *Eucalyptus* no mundo tem aumentado rapidamente nas últimas duas décadas, ultrapassando 19 milhões de hectares (IGLESIAS - TRABADO; WILSTERMANN, 2008).

Na Austrália, onde muitas espécies de eucalipto ocorrem naturalmente, o potencial produtivo é alto, mas raramente são alcançadas taxas máximas de produtividade, devido a limitações de água e disponibilidade de nutrientes (WHITEHEAD; BEADLE, 2004).

No Brasil, cuja área territorial é de 851 milhões de hectares, há 477 milhões ha de cobertura florestal. As plantações florestais, ocupando apenas 0,67% do território nacional, somam 5,74 milhões ha, sendo 3,55 milhões com eucalipto; 1,82 milhão com pinus e 370 mil de outras espécies, e os plantios de eucalipto concentram-se principalmente nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Bahia (SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA - SBS, 2007).

A escolha por este gênero é justificada pela sua alta produtividade e adaptabilidade a diferentes condições de solo e clima, sendo o uso cada vez maior de materiais genéticos clonais sítio-específicos, sendo o Brasil pioneiro no sistema de propagação clonal para regeneração de plantação de alta produtividade de *Eucalyptus* (GONÇALVES; MCNABB; GONÇALVES, 2002).

Esta alta produção de madeira é muito sensível à disponibilidade de recursos naturais como água, nutrientes e luz (LITTON; RAICH; RYAN, 2007) e, portanto, características que afetam a captura e o uso destes recursos pelas árvores influenciam diretamente no crescimento das plantas (ACKERLY et al., 2000). Dentre estes fatores, a água constitui um dos mais importantes recursos em todo o mundo (WAGNER et al., 2002).

Conhecer as interações entre o meio e as plantas faz parte da ecofisiologia florestal que visa compreender o crescimento florestal por meio do entendimento dos processos que o governa, para permitir manejar as florestas em sintonia com o uso dos recursos naturais (STAPE; RYAN; BINKLEY, 2004a).

Os conhecimentos de ecofisiologia podem ser implementados nos chamados modelos processuais que se baseiam no conhecimento da fisiologia da planta e da física do ambiente para fornecer informações sobre a produtividade potencial dos sítios, os efeitos do clima sobre o crescimento da floresta e entender os efeitos das práticas silviculturais (ALMEIDA; LANDSBERG; SANDS, 2004).

Há uma grande quantidade de trabalhos científicos sobre nutrição florestal na área de eucaliptocultura, mas o uso da água, em  $\text{m}^3/\text{ha}/\text{ano}$ , e a eficiência de seu uso, em kg madeira produzida por  $\text{m}^3$  de água transpirada não são ainda bem conhecidos, face à dificuldade metodológica de sua determinação (HATFIELD; SAUER; PRUEGER, 2001).

Este fato gera desconhecimento sobre os processos de controle que o *Eucalyptus* tem sobre a perda de água, e embora seja uma cultura que tenha se tornado uma paisagem familiar, ainda há um grande debate que se intensifica a medida que aumenta sua área plantada, principalmente no que diz respeito ao consumo de água e efeito no balanço hidrológico (LIMA, 1993).

Existem poucas informações de como a fertilidade e a quantidade de água no solo influenciam no uso da água através do desenvolvimento da copa (CAMPION; DYE; SCHOLLES, 2004). Segundo esses mesmos autores, o déficit de água no solo é o principal fator limitante do crescimento e uso da água em plantações florestais da África do Sul, mas para sua modelagem é necessário conhecer qual a taxa potencial de condutância estomática e transpiração.

Estudos apontam a deficiência hídrica como um dos principais fatores limitantes à produtividade florestal. O efeito do déficit hídrico no solo sobre o incremento corrente anual (ICA) das plantações de eucalipto mostrou que ele pode ser considerado um preditor do ICA (ALMEIDA; SOARES, 1997).

Além disso, a adaptação de espécies aos efeitos do clima pode ajudar no manejo de água em condições diferentes de umidade, razão pela qual o uso da água reflete a complexidade de fatores envolvidos na interação planta e ambiente (SILVA et al., 2004). De acordo com Olbrich et al. (1993), o conhecimento da eficiência do uso da água ajudaria a selecionar melhor as espécies de eucalipto para determinadas condições.

A medida direta da evapotranspiração florestal é extremamente difícil e onerosa, já que exige a instalação de equipamentos especiais, o que limita seu conhecimento e utilização prática. Por esse motivo, pesquisadores têm desenvolvido métodos que na maioria das vezes envolvem medidas físicas e que permitem estimar a transpiração por árvore, como é o caso de câmaras gasosas e os métodos térmicos que relacionam temperatura e o fluxo de seiva que passa pelo tronco.

Os sistemas de medição do fluxo xilemático estão sendo cada vez mais utilizados para quantificar o uso de água pelas árvores (GRANIER, 1985; DYE; OLBRICH, 1992; MARIN, 2003; HUBBARD et al., 2004; GARTNER et al., 2009). Juntamente com informações biométricas sobre o tamanho da árvore e sua distribuição, as medições de fluxo xilemático permitem estimar a transpiração de toda uma floresta (GRANIER, 1985).

Considerando esses aspectos e a necessidade de informações sobre o consumo hídrico em plantios de eucalipto, este trabalho teve o objetivo de determinar as taxas de transpiração, o crescimento e a eficiência do uso da água de árvores clonais de *Eucalyptus* em parcelas com e sem irrigação. Além disso, avaliou o desempenho do Modelo de Penman-Monteith para estimativa da transpiração por meio das avaliações diretas obtidas com a medição do fluxo xilemático. Assim, do ponto de vista científico, foram testadas as seguintes hipóteses:

- I. O uso da água no tratamento irrigado será maior (MYERS et al., 1996; WHITEHEAD; BEADLE, 2004; STAPE; BINKLEY; RYAN; GOMES, 2004) comparado ao tratamento não irrigado;
- II. A eficiência do uso da água das árvores do tratamento irrigado será igual (HUBBARD, et al., 2009) ou maior (STAPE; BINKLEY; RYAN; GOMES, 2004) em relação ao tratamento não irrigado;
- III. Dentro de um povoamento, as árvores dominantes, com maior biomassa, apresentam maior eficiência de uso da água quando comparadas às árvores de menor porte (BINKLEY, et al., 2002).





## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 A transpiração das plantas

A planta perde água na forma de vapor, por meio da transpiração e, ocasionalmente e em pequenas quantidades, também na forma líquida por gutação. A contribuição da gutação para o balanço hídrico da planta é insignificante, e em geral considera-se que, na planta, o único mecanismo envolvido na perda de água para a atmosfera ocorre por meio dos estômatos, a partir da transpiração (MARENCO; LOPES, 2005).

A transpiração pode ser considerada como um processo físico de difusão, ou seja, a intensidade da transpiração é proporcional à diferença entre a concentração de vapor d'água nas superfícies evaporantes e o conteúdo de vapor d'água da atmosfera (LARCHER, 2006).

Desse modo, a água no contínuo solo-planta-atmosfera é transportada de acordo com um gradiente de potencial hídrico, sempre do maior para o menor potencial. A demanda evaporativa do ar provoca perda de água por meio da transpiração, tornando necessária a reposição contínua de água para manter um nível apropriado de hidratação dos tecidos (MARENCO, LOPES, 2005).

As árvores perdem água para a atmosfera quando os estômatos se abrem para fixar dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) durante o processo de fotossíntese. Desse modo, se por um lado a atmosfera é a fonte de  $\text{CO}_2$  para as plantas, necessário para a fotossíntese, por outro lado a atmosfera relativamente seca pode desidratar a planta. Para satisfazer essas demandas contraditórias de maximizar a absorção de  $\text{CO}_2$  enquanto limitam a perda de água, as plantas desenvolveram adaptações para controlar a perda de água das folhas e repor a água perdida para a atmosfera (TAIZ; ZEIGER, 2004).

O movimento estomático é o principal mecanismo que controla as trocas gasosas das plantas terrestres. Em contrapartida, controles instantâneos da transpiração pelo estômato geralmente representam um impedimento adicional para a produtividade da floresta (GUCCI et al., 1996), devido à diminuição da captura de  $\text{CO}_2$ .

Existem inúmeros estudos que mostram que a interação entre os efeitos do índice de área foliar, déficit de pressão de vapor, déficit de água no solo, potencial de água na folha e diferentes espécies são os principais fatores que alteram a transpiração das florestas de eucalipto. Segundo Landsberg e Gower (1997), as taxas de transpiração são influenciadas pela demanda evaporativa do ar, quantidade de água no solo e condutância da copa, que por sua vez é controlada pela condutância estomática ( $g_s$ ) e área foliar.

## **2.2 Fatores que afetam a transpiração**

### **2.2.1 Fatores Fisiológicos**

A taxa de transpiração é influenciada pelas características da copa, ou seja, diferentes tipos de plantas podem ter taxas de transpiração variadas. Não somente o tipo de copa, como também o desenvolvimento da copa, o ambiente e o manejo devem ser considerados (ALLEN ET AL. (1998), 1998).

Com relação à cultura, a evapotranspiração depende de fatores como área foliar, estágio de desenvolvimento, arquitetura foliar, resistência do dossel e outros fatores que geralmente estão associados a um valor de coeficiente de cultura ( $K_c$ ) (MEDEIROS, 2002).

Segundo Norman e Campbell (1989 apud XAVIER; SOARES; ALMEIDA, 2002), a descrição da estrutura dos dosséis não é essencial somente no entendimento dos processos de troca entre planta e atmosfera, como energia e momento, como também podem revelar estratégias da planta no seu processo evolutivo, como adaptações físico-químicas.

Por meio da regulação da abertura estomática, a planta é capaz de modular as taxas transpiracionais de acordo com as possibilidades e as necessidades de seu balanço hídrico. Nesse sentido, plantas de locais úmidos diminuem o grau de abertura estomática e o tempo de abertura dos estômatos quando o balanço hídrico torna-se desfavorável, diminuindo assim seu consumo de água (LARCHER, 2006).

A restrição da perda de água por meio do fechamento dos estômatos e aumento da aquisição de água através do sistema radicular são mecanismos importantes para manter uma turgescência positiva, o crescimento e a sobrevivência das plantas (NGUGI et al., 2004).

Desse modo, a condutância estomática representa uma variável fundamental para prever o uso da água e a fotossíntese líquida (MACFARLANE et al., 2004 apud MARRICHI, 2009). Entender as influências do ambiente sobre a condutância estomática ( $g_s$ ) tem sido foco central das pesquisas fisiológicas de plantas há décadas, devido à relação entre  $g_s$  e aquisição de carbono (ADDINGTON et al., 2004 apud MARRICHI, 2009).

Soares e Almeida (2001) verificaram que o eucalipto exerce controle estomático eficiente sobre a transpiração durante a estação seca. Já a falta de um controle significativo da condutância estomática foi observada para seringueira, um dos fatores que ajudaria a justificar a queda acentuada de sua produção no período seco (CONFORTO; DYE; SCHOLLES, 2005).

A arquitetura da copa é outra característica que influencia a transpiração. O ângulo foliar das folhas, por exemplo, define a proporção de radiação solar que penetra na copa (WHITEHEAD; BEADLE, 2004). O eucalipto possui ângulos foliares que são geralmente mais próximos da vertical e que atingem cerca de 60° a 80° com a horizontal. Este tipo de adaptação reduz a quantidade de calor sensível produzida com a alta radiação incidente, principalmente nos horários próximos do meio dia, devido à redução da interceptação da luz (ANDERSON, 1981).

A densidade de área foliar, definida como o total da área de tecido fotossintético por unidade de volume do dossel, também se trata de um importante fator influenciador da transpiração. Pela integração da densidade de área foliar sobre o peso do dossel, surgiu o conceito de Índice de Área Foliar (IAF) (NETO, 2007).

Segundo Monteith (1977 apud NETO, 2007), o IAF determina o tamanho da interface “planta – atmosfera” e, portanto, desempenha um papel chave nas trocas de energia e massa entre o dossel e a atmosfera. Roberts e Rosier (1993), ao estudarem transpiração em *Eucalyptus*, demonstraram que a transpiração foi muito sensível aos valores de índice de área foliar. Já Leuning, Kriedemann e Mcmurtrie (1991)

encontraram efeitos combinados do índice de área foliar, sensibilidade da condutância estomática ao déficit de pressão de vapor e déficit de água no solo na transpiração para muitas espécies de *Eucalyptus*.

A morfologia vegetal está intimamente relacionada às condições físicas do ambiente, já que suas características básicas de sobrevivência estão relacionadas às questões de balanço hídrico e transporte hidráulico adequado, bem como à fixação de carbono no processo de fotossíntese (RICKLEFS; MILLER, 2000). A área foliar específica (AFE), que representa a área foliar projetada por unidade de massa foliar, também é uma característica que indica o custo - benefício entre o ganho e perda de carbono (WRIGHT et al., 2004).

A AFE está relacionada fortemente com as condições hídricas do ambiente em que a planta se encontra. Quando são cultivadas em ambientes com boa disponibilidade hídrica e nutricional, a AFE das folhas das árvores é maior, indicando uma forte adaptabilidade da espécie a condições favoráveis ao crescimento (POORTER; EVANS, 1998 apud NETO, 2007). No cerrado, por exemplo, a área foliar específica está diretamente relacionada com a capacidade de fixação de carbono (FRANCO et al. 2005) e ao ponto de perda de turgor das folhas, um importante parâmetro de relações hídricas (BUCCI et al., 2004).

### **2.2.2 Fatores Climáticos**

As taxas de transpiração são influenciadas pela demanda evaporativa do ar, quantidade de água no solo e condutância da copa, que por sua vez é controlada pela condutância estomática e área foliar. Os três fatores ambientais predominantes que controlam a condutância estomática da copa são: intensidade de luz, déficit de pressão de vapor e quantidade de água nas folhas (LANDSBERG; GOWER, 1997).

Segundo Pereira et al. (1998), a evapotranspiração é controlada pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de demanda de água para as plantas do solo. A disponibilidade de energia, por sua vez, é controlada pelo poder refletor da superfície, o coeficiente de reflexão ou albedo. Superfícies mais claras refletem mais que aquelas mais escuras, portanto, em uma vegetação mais

escura, como é o caso das florestas, a radiação solar reflete menos do que em uma cultura ou gramado.

Os fatores externos influenciam a transpiração na medida em que alteram a diferença de pressão de vapor entre a superfície da planta e o ar que a envolve. Portanto, a transpiração intensifica-se com a diminuição da umidade relativa e com o aumento da temperatura do ar (LARCHER, 2006). Segundo seu modelo, Sarmiento et al. (1985) concluíram que a transpiração das espécies lenhosas depende mais das condições atmosféricas do que da disponibilidade de água no solo.

A radiação é um importante fator climático, pois proporciona energia para a vaporização e remoção de vapor de água. A quantidade potencial de energia que alcança a superfície é determinada pelo local e época do ano, devido a diferentes posições do sol (MEDEIROS, 2002). Assim, a radiação depende do local (latitude), topografia da região e época do ano.

Amatya et al. (1992 apud MARRICHI, 2009) relataram que a radiação foi o elemento meteorológico mais importante no processo de evapotranspiração.

A temperatura do ar é um fator importante, pois é um elemento climático indicativo de energia no sistema estudado, já que a radiação absorvida pela atmosfera aumenta a temperatura do ar. Dessa forma a temperatura do ar interfere nas condições ambientais, interagindo com outras variáveis de importância para o processo de transpiração (MEDEIROS, 2002).

A diferença entre a pressão de vapor saturado e a atual define o déficit de pressão de vapor (DPV), isto é, o quanto de vapor é necessário para saturar determinado volume de ar. O DPV é um indicativo da demanda evaporativa do ar (MEDEIROS, 2002). Na maioria das espécies, um aumento no DPV ao redor da folha ou da planta resulta no fechamento do estômato (GUEHL; AUSSÉNAC, 1987). O controle da condutância estomática em função do DPV do ar é particularmente importante para que as plantas possam evitar uma perda excessiva de água em condições de alta demanda evaporativa da atmosfera (MIELKE, 1997).

Quanto maior o DPV, maior a tendência de a planta perder água, pois valores muito altos de DPV subtraem água da célula e, portanto, diminuem o valor do potencial hídrico do sistema celular (LARCHER, 2006). Dessa forma, o DPV impõe uma restrição

à transpiração, já que a condutância estomática e a condutância da copa diminuem com o aumento do déficit de pressão de vapor do ar (WHITEHEAD; BEADLE, 2004).

Quando o ar apresenta umidade relativa elevada, o gradiente de difusão que move a perda de água é aproximadamente 50 vezes maior do que o gradiente que promove a absorção de  $\text{CO}_2$  (TAIZ; ZEIGER, 2004), daí a importância do controle estomático para evitar altas taxas de transpiração. Nesse sentido, o DPV é uma variável que impulsiona a transpiração e altos valores ao longo do dia causam o fechamento estomático e reduzem o crescimento (ALMEIDA, 2003).

### 2.2.3 Fatores edáficos

Do mesmo modo que a transpiração depende da demanda evaporativa do ar para controlar o aparato estomático das plantas, a quantidade de água no solo e a capacidade do solo para fornecer água às raízes também determina a taxa de transpiração, portanto, o contato entre sistema radicular e o solo é essencial para o abastecimento de água das plantas (TAIZ; ZEIGER, 2004).

À medida que as plantas absorvem água do solo, o conteúdo de água (potencial hídrico) do solo decresce e sua condutividade hidráulica diminui drasticamente. Dessa forma, à medida que mais espaços do solo são preenchidos por ar, a água pode deslocar-se por canais menos numerosos e menores, e a condutividade hidráulica diminui. Em solos muito secos, o potencial hídrico do solo pode tornar-se inferior ao potencial hídrico no ponto de murcha permanente. Nesse ponto, mesmo que toda a perda de água por transpiração cesse, as plantas podem não recuperar a pressão de turgor, indicando que o potencial hídrico do solo atingiu níveis inferiores ou iguais ao potencial osmótico das plantas (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Em solos secos, a adsorção de água à matriz do solo é tão forte que o movimento da água no solo e a extração pelas plantas são muito reduzidos. Como consequência, falta água às plantas, mesmo que ainda haja quantidade significativa de água no solo, devido à água não estar disponível às mesmas (TAIZ; ZEIGER, 2004).

A transpiração é razoavelmente constante com o aumento do déficit de água no solo até este atingir um valor crítico, a partir do qual a transpiração é alterada

bruscamente. Esse valor crítico de déficit de água no solo diminui com o aumento da demanda evaporativa do ar (WHITEHEAD; BEADLE, 2004).

A habilidade do desenvolvimento das raízes varia conforme as espécies e, como o contato íntimo entre a superfície radicular e o solo é essencial para a absorção efetiva de água, conseqüentemente o padrão do sistema radicular influencia significativamente a transpiração e a redução de água do solo (GARTNER et al., 2009).

Além desses fatores mencionados, baixos níveis de fertilidade do solo e presença de horizontes que apresentem resistência à penetração das raízes podem limitar o desenvolvimento da copa e reduzir a evapotranspiração.

### **2.3 Fluxo Xilemático**

Como a planta se justapõe entre as diferenças dos valores de potencial hídrico do solo em relação à atmosfera, um fluxo de água é colocado em movimento no interior da planta na direção da atmosfera (LARCHER, 2006).

Dentro da planta, a água pode ser transportada a curtas distâncias, como o transporte de célula a célula ou a longas distâncias, por meio do xilema, seguindo um gradiente de potencial hídrico (LARCHER, 2006).

O transporte de água de longa distância ocorre através do xilema desde as raízes, passando pelo caule até as folhas (MARENCO; LOPES, 2005). Estruturalmente o xilema é constituído por três tipos de células: elementos de vaso, fibras e parênquima do xilema. Os componentes mais característicos do xilema primário são os elementos de vaso que conduzem água e nutrientes inorgânicos (MENEZES, SILVA; PINNA, 2003).

O xilema secundário mais interno perde gradualmente as funções de condução e, com a morte das células vivas do lenho, perde também as funções de reservas de alimentos. Com o tempo a madeira perde água e substâncias de reserva, tornando-se infiltrada com vários compostos orgânicos, tais como óleos, gomas, resinas, substâncias fenólicas, materiais corantes e aromáticos. Algumas dessas substâncias impregnam as paredes, outras penetram no lume da célula. A região do lenho que



passa por essas modificações denomina-se cerne. A parte mais externa do lenho e que é funcional é denominada alborno (MENEZES; SILVA; PINNA, 2004).

Medições diretas do fluxo xilemático para árvores individuais têm sido comumente usados para espécies de *Eucalyptus* no mundo todo. Estas mensurações promovem estimativas de taxas de transpiração através de cálculos que incorporam variação do fluxo xilemático com o tamanho do alborno da árvore (WHITEHEAD; BEADLE, 2004). Os primeiros relatos de medidas diretas de fluxo de seiva em plantas foram feitos por Huber (1932 apud MARSHALL, 1958).

Diversos métodos podem ser utilizados para estimar o fluxo de seiva de uma planta e, atualmente, um dos mais utilizados refere-se ao uso de sensores que estimam o fluxo de seiva dentro da planta, como é o método de Granier (1985).

## **2.4 Medidas de fluxo de seiva pelo Método de Granier**

O método de dissipação térmica, conhecido por método de Granier em virtude de seus fundamentos teóricos terem sido propostos por Granier (1985), é bem conhecido entre os fisiologistas e hidrologistas da área florestal pela sua simplicidade, alto grau de precisão e de confiabilidade, além do relativo baixo custo (LU et al. 2004).

O autor relacionou a velocidade de dissipação de calor, aplicado em determinado local do tronco da árvore, com o fluxo de seiva. O método exige fornecimento de uma pequena quantidade de calor de forma constante através de uma sonda de dissipação térmica inserida num ponto do tronco ou caule (DELGADO ROJAS, 2003).

O método de dissipação térmica envolve a inserção perpendicular de duas sondas termopares na mesma linha axial do ramo ou tronco, sendo que a sonda superior é aquecida constantemente a uma potência elétrica de aproximadamente 0,2 W e a inferior mede a temperatura ambiente da madeira (Figura 1). O princípio do método é de que a variação da temperatura entre as duas sondas é proporcional ao fluxo de seiva ocorrido em um intervalo de tempo analisado. A máxima diferença de temperatura entre as duas sondas significa que o fluxo de seiva é mínimo ou nulo, enquanto que a mínima diferença significa uma taxa máxima de fluxo de seiva através da área de transporte (xilema).

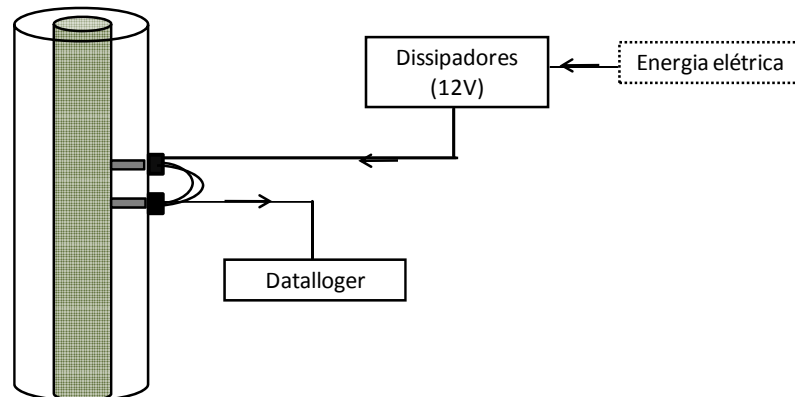


Figura 1 - Esquema do sensor de Granier inserido perpendicularmente no tronco de uma árvore. Observa-se a conexão dos termopares ao sistema de aquisição de dados e da sonda superior a uma fonte de energia. (Adaptado de LU et al., 2004)

Para calcular a quantidade de água utilizada pela planta, o método exige a determinação mais exata possível da área condutiva de seiva do lenho, denominada, alburno. A determinação da área efetiva do xilema exige a retirada de uma amostra do lenho ou a destruição total da planta, podendo ser um procedimento desvantajoso desse método em relação a outros.

Em uma condição hídrica normal da planta, a variação do fluxo de seiva acompanha normalmente a demanda atmosférica do ambiente em função da radiação solar, temperatura, vento e umidade do ar. No período noturno pode existir ainda um pequeno fluxo de seiva através do tronco, para suprir a deficiência hídrica da parte aérea da planta que ocorre devido à transpiração do período diurno; este fluxo tende ao mínimo ou nulo ao final da noite, estando o solo com boa disponibilidade hídrica (ANGELOCCI, 2002).

## 2.5 Modelo de Penman-Monteith

A comissão Internacional de irrigação e drenagem (ICID) e a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), consideram o método de Penman-Monteith (PM) como padrão de cálculo da evapotranspiração de referência, a partir de dados meteorológicos (SMITH, 1991; ALLEN et al., 1998). Estimativas de

transpiração através da equação de Penman-Monteith para diversas espécies de *Eucalyptus* têm sido aceitas no mundo todo (WHITEHEAD; BEADLE, 2004).

Segundo Peres (1994), Penman desenvolveu sua equação incorporando a velocidade do vento, relacionando-a a superfície de água livre, a partir de duas premissas: i) que as fontes e sumidouros de calor sensível ocorrem em um mesmo plano, por exemplo, a lâmina de uma folha; ii) que a pressão de vapor da superfície evaporante seja igual à pressão de vapor de saturação da água a temperatura da superfície, relacionada ao calor latente.

Penman (1948 apud PERES, 1994) não incluiu a função de resistência à transferência de vapor d'água em sua equação original. A equação, combinada com o termo aerodinâmico e resistência da superfície de uma cobertura vegetal, é chamada de equação de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965) eq. (1):

$$E = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta(R_n - S) + 86400 \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{1/g_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{g_a}{g_c}\right)} \quad (1)$$

Em que:

$E$  = transpiração ( $L d^{-1}$ )

$\lambda$  = fluxo de calor latente de evaporação ( $\lambda = 2450000 J kg^{-1}$ );

$\Delta$  = declividade da curva de pressão de saturação de vapor ( $0,13 kPa ^\circ C^{-1}$ );

$R_n$  = saldo de radiação ( $W m^{-2}$ );

$S$  = fluxo de calor no solo ( $MJ m^{-2}$ ),  $S=0$  diário;

$\rho_a$  = densidade absoluta do ar,  $\rho_a = 1 kg m^{-3}$ ;

$\gamma$  = coeficiente psicrométrica ( $kPa ^\circ C^{-1}$ );

$C_p$  = calor específico do ar seco ( $1004 J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$ );

$(e_s - e_a)$  = déficit de pressão de vapor ( $kPa$ );

$g_a$  = condutância aerodinâmica ( $m s^{-1}$ );

$g_c$  = condutância da copa ( $m s^{-1}$ ).

A condutância aerodinâmica ( $g_a$ ) é obtida utilizando a equação apresentada por Allen et al. (1998):

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{Z_m - d}{Z_{0m}}\right] \ln\left[\frac{Z_h - d}{Z_{0h}}\right]}{k^2 U_z} \quad (2)$$

$$g_a = \frac{1}{r_a} \quad (3)$$

Em que:

$r_a$  = resistência aerodinâmica ( $\text{m s}^{-1}$ )

$Z_m$  = altura de medição da velocidade do vento (m); = 20m

$d$  = deslocamento do plano zero do perfil do vento (m);  $d = 2/3 h$ ;

$Z_{0m}$  = parâmetro de rugosidade para momentum (m); = 0,123 h;

$K$  = constante de von Kármán,  $K = 0,41$ ;

$U_z$  = velocidade do vento a uma altura  $Z$  ( $\text{m s}^{-1}$ );

$Z_h$  = altura de medição da umidade do ar (m); = 20 m;

$Z_{0h}$  = parâmetro de rugosidade para calor sensível e vapor d'água (m) = 0,1  $Z_{0m}$

$h$  = altura da planta (m)

Com a introdução da relação entre resistência ao fluxo de vapor da folha ( $r_c$ ) e a resistência aerodinâmica ( $r_a$ ), Monteith descreveu o papel da turbulência atmosférica no processo de transporte de vapor d'água e as características fisiológicas da planta (SENTELHAS, 1998).

A teoria da grande folha ("big leaf") adotada por Monteith (1965 apud PEREIRA et al. 1998) assume que todas as folhas estão expostas às mesmas condições ambientais.

Modelos que estimam a condutância da copa são freqüentemente usados na conjunção com Penman-Monteith para predizer taxas de evapotranspiração. A aplicação dessa equação requer estimativas de propriedade aerodinâmicas e ao nível de copa, e a relativa magnitude entre esses dois componentes determinam o grau de associação entre a vegetação e a atmosfera, além do controle da transpiração em função da disponibilidade de energia e do déficit de saturação do ar (JARVIS; MCNAUGHTON, 1986).

Predições de uso da água pelas árvores devem ser verificadas comparando-se com medições de fluxo xilemático atuais, no qual são comumente mensuradas usando a técnica de velocidade de pulso de calor (CAMPION; DYE; SCHOLLES, 2004).

Angelocci (1996) utilizou o modelo de Penman-Monteith para a estimativa da transpiração máxima de macieiras em pomares com bom suprimento hídrico no solo, encontrando boa relação com o fluxo de seiva diário determinado pelo método de balanço de calor. Zhang et al. (1997) utilizaram o modelo de Penman-Monteith para a estimativa da transpiração máxima de *Pyrus serotina* ("Asian pears") e comparou os resultados com o fluxo de seiva pelo método de balanço de calor, obtendo boa relação entre ambos.

Marin (2003) ao estimar a transpiração máxima com o modelo adaptado de Penman-Monteith verificou boa correlação com os valores integrados de fluxo de seiva para *Coffea arabica*. Campion, Dye e Scholes (2004) também obtiveram boas correlações para *Eucalyptus grandis* entre as taxas de transpiração determinadas pelos métodos de Penman-Monteith e dados de fluxo de seiva.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da área experimental

Este trabalho faz parte de uma rede experimental criada em 2001, denominada BEPP (Brasil *Eucalyptus* Produtividade Potencial), sendo um projeto de pesquisa cooperativa entre 2 universidades (ESALQ/USP e Colorado State University), 7 empresas florestais (Aracruz, Bahia Sul Celulose, Cenibra, Copener Florestal, International Paper, VCP e Veracel) e a Rocky Mountain Research Station do USDA (United States Department of Agriculture).

O projeto BEPP visa abordar os conceitos ecofisiológicos associados ao crescimento florestal. Para tanto, definiram-se tópicos básicos de pesquisa e um delineamento experimental único foi implantado em várias localidades brasileiras, constituindo uma rede experimental com ampla variabilidade genética, ambiental e de manejo, fortalecendo a caracterização e interpretação das variáveis ecofisiológicas.

O experimento deste estudo foi realizado no Projeto BEPP pertencente à empresa Veracel Celulose S/A e consiste em um plantio de clone de *Eucalyptus* de alta produtividade, instalado em março de 2001, no município de Eunápolis - BA (16° 21'S, 39° 34'W). O solo da área do experimento é classificado como ARGISSOLO AMARELO distrófico (EMBRAPA, 2006), com relevo suave ondulado e altitude de 187 m. A análise química foi realizada segundo metodologia descrita em Raji et al. (2001) (Tabela 1), enquanto que para análise granulométrica utilizou-se o método do densímetro (CAMARGO et al., 1986) (Tabela 2). Foi o primeiro cultivo de eucalipto neste solo, sendo o mesmo ocupado anteriormente por pastagem.

Tabela 1 - Atributos químicos do solo da área experimental

Prof. cm	P mg dm <sup>-3</sup>	MO g dm <sup>-3</sup>	pH CaCl <sub>2</sub>	K	Ca	Mg	H+Al mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	Al	SB	T	V %	Sat. Al <sub>3</sub> <sup>+</sup> %
0-20	7	26	4,3	1,7	28	7	33	2	37	70	53	5
20-40	3	9	4,9	1,1	27	5	19	1	33	52	63	3
40-60	3	6	4,3	1,0	11	3	25	3	15	40	38	17
60-80	2	3	3,9	0,2	3	1	31	12	4	35	11	75
80-100	2	2	3,9	0,1	3	1	26	10	4	30	13	71

Tabela 2 - Atributos físicos do solo da área experimental

Prof. Cm	Argila	Silte	Areia			
			Total	Grossa	Média	Fina
			----- % -----			
0-20	30	3	68	39	21	8
20-40	44	5	51	28	15	8
40-60	51	5	44	22	13	9
60-80	49	5	46	24	14	8
80-100	57	3	40	21	12	7

Segundo Köppen o clima local é classificado como Af, ou seja, chuvoso, quente e úmido. Levando em consideração um histórico de dados climáticos de 15 anos (de 1994 a 2009), as temperaturas máxima, mínima e média da região é de 29, 19 e 23 °C, respectivamente, enquanto a radiação solar global média é de 18,5 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> e a precipitação pluviométrica anual de 1.256 mm.

Segundo o balanço hídrico climatológico da região pelo método de Thornthwaite e Mather (1955), efetuado em planilhas eletrônicas conforme Rolim et al. (1998) e considerando uma capacidade de água disponível (CAD) de 148 mm até 1,5 m de profundidade (obtidos na área experimental), pode-se observar que a precipitação pluviométrica é bem distribuída ao longo do ano, com chuvas mais intensas nos meses de novembro a abril e menos intensas nos demais. Assim como para pluviosidade, a evapotranspiração de referência é maior nos meses de novembro a abril, sendo muito semelhante à evapotranspiração real ao longo do ano (Figura 2). Portanto, trata-se de uma região com condições climáticas e hídricas favoráveis ao crescimento do eucalipto, permitindo a obtenção de elevadas produtividades.

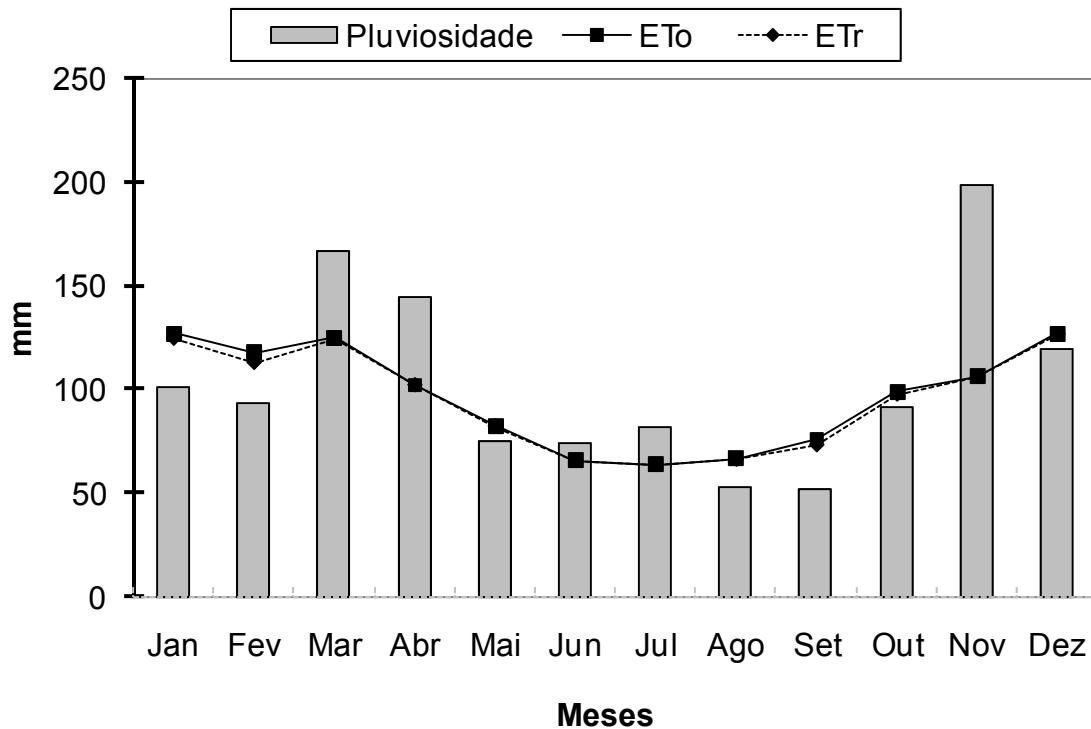


Figura 2 - Balanço hídrico regional normal mensal para o município de Eunápolis/BA, pelo método de Thornthwaite & Mather (1955). ETo = Evapotranspiração de referência; ETr = Evapotranspiração potencial

### 3.2 Delineamento experimental

O experimento completo do Projeto BEPP foi instalado no delineamento experimental de blocos ao acaso, com 4 repetições, sendo as parcelas compostas de 144 plantas (12 linhas de 12 plantas) no espaçamento de 3 x 3 m.

O fluxo xilemático foi avaliado em 7 árvores do tratamento irrigado e em 6 do tratamento não irrigado, que representaram as repetições. Essas avaliações foram realizadas no período de agosto a dezembro de 2005.

A irrigação objetivou garantir a disponibilidade hídrica para a floresta ao longo de todo o seu crescimento. O sistema de irrigação adotado foi por gotejamento e diariamente foi feito o controle da quantidade de água utilizada nas irrigações.



### **3.3 Avaliações**

#### **3.3.1 Dados meteorológicos**

Os dados de meteorológicos (precipitação pluviométrica, temperatura máxima, mínima e média, velocidade do vento, radiação global, umidade relativa e pressão atmosférica) foram obtidos em uma estação meteorológica que armazenava os dados em um Datalogger CR1000/CR10X da Campbell, instalado a cerca de 200 metros do experimento.

#### **3.3.2 Fluxo de seiva e área de alburno**

Para a determinação do fluxo de seiva, adotou-se o método de sondas de Granier (GRANIER, 1985). Esse dispositivo consta de duas sondas de 2 mm de diâmetro e 2 cm de comprimento, que foram inseridas no lenho das árvores, separadas por uma distância vertical de 15 cm. As sondas contêm um termopar de cobre-constantan no centro de uma agulha hipodérmica. Além do termopar, a sonda superior possui uma resistência elétrica, alimentada por uma bateria de 12 volts, provocando um aumento de temperatura no local de inserção da sonda.

Estes sensores de fluxo foram instalados nas árvores, ligados a um datalogger (CR10x e AM16/32, Campbell Sci. In., Logan, UT), alimentado por rede de energia local o qual passa por um transformador diminuindo sua tensão de 220 volts para de 12 volts. As informações de temperatura foram geradas a cada 15 segundos, sendo que a média desses dados foi gravada a cada 15 minutos no datalogger.

As sondas foram colocadas nos troncos das árvores aproximadamente a 1,30 m da superfície do solo, para evitar o aquecimento por condução de calor do solo. As sondas foram envolvidas com isopores presos com fita isolante e o conjunto foi vedado por um papel com manta aluminizada para diminuir o efeito da temperatura externa e a incidência direta do sol, além de uma folha de plástico para evitar a infiltração de água da chuva e ataques de insetos.

A equação de Granier (1985) (eq. (4)) estima a densidade de fluxo de seiva ( $u$ ) a partir de uma constante  $k$  (eq. (5)), obtida a partir da temperatura medida pelos sensores instalados nas árvores.

$$u = 119 \times k^{1,23} \quad (4)$$

Em que:

$u$  = densidade de fluxo de seiva, em ( $\text{kg cm}^{-2} \text{h}^{-1}$ )

$k$  = constante que relaciona as temperaturas medidas pelos sensores, obtidas conforme (5)

$$k = \frac{\Delta T_m - \Delta T}{\Delta T} \quad (5)$$

Em que:

$\Delta T_m$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) = diferença máxima de temperatura entre os dois sensores, que normalmente acontece durante a madrugada;

$\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) = diferença de temperatura medida em cada instante.

Para o cálculo do fluxo ( $F$ ) (eq. (6)), multiplicou-se a densidade de fluxo de seiva ( $u$ ) pela área do alburno ( $A_a$ ), a qual foi estimada para cada árvore com medições na altura da sonda superior.

$$F = u \cdot A_a \quad (6)$$

Em que:

$F$  = fluxo de seiva na árvore, em  $\text{L s}^{-1}$ ;

$u$  = densidade do fluxo de seiva em ( $\text{kg cm}^{-2} \text{h}^{-1}$ )

$A_a$  = área do alburno ( $\text{cm}^2$ ), estimado a partir de eq.(7).

Para estimar a área do alburno das árvores em que foram instalados os sensores, foram selecionados 12 indivíduos de cada tratamento (não irrigado e irrigado) com diâmetros de tronco variados. As árvores foram cortadas e retirados discos com 1 cm de espessura, sendo que cada disco foi colocado contra o sol para permitir a visualização da área translúcida do alburno (Figura 3). Em seguida, mediram-se todos os comprimentos do diâmetro da circunferência que delimita internamente e externamente a área translúcida, para o cálculo da área, conforme a eq. (7):

$$A_a = \left[ \pi \left( \frac{DT1}{2} \right) \cdot \left( \frac{DT2}{2} \right) \right] - \left[ \pi \left( \frac{DC1}{2} \right) \cdot \left( \frac{DC2}{2} \right) \right] \quad (7)$$

Em que:

$A_a$  = Área do alburno, em  $\text{cm}^2$ ;

DT1 = Diâmetro total sem casca 1, em cm;

DT2 = Diâmetro total sem casca 2, em cm;

DC1 = Diâmetro do cerne 1, em cm;

DC2 = Diâmetro do cerne 2, em cm.

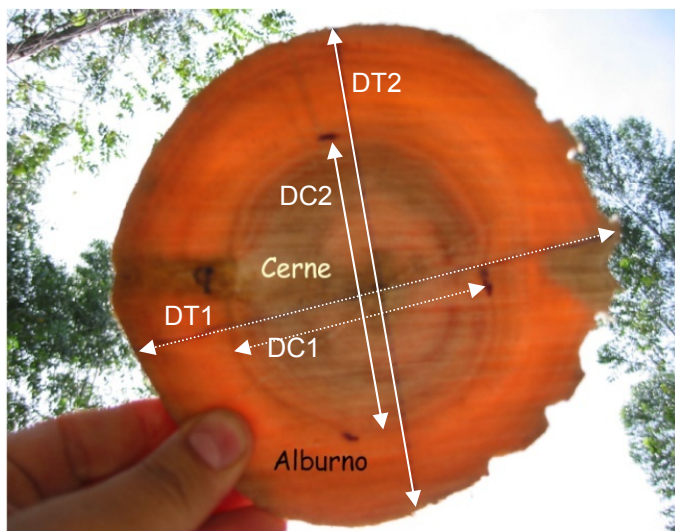


Figura 3 - Diâmetro total sem casca (DT1 e DT2) e diâmetro do cerne (DC1 e DC2) em um disco colocado contra o sol

Com os resultados de área do alburno e diâmetro do caule desses indivíduos (obtido após a remoção da casca no local da medição), foi efetuada regressão não-linear para obtenção de uma equação para estimar a área do alburno a partir do diâmetro do caule das árvores. Esse procedimento foi adotado tendo em vista que as árvores em que estavam instalados os sensores não poderiam ser abatidas para avaliação *“in situ”* da área do alburno.

### **3.3.3 Calibração do Método de Granier**

Considerando que estimativas de velocidade do fluxo de seiva usando a equação desenvolvida por Granier (GRANIER, 1985) podem subestimar o uso de água da árvore quando comparado com outras estimativas (ALMEIDA; LANDSBERG; SANDS, 2007), foi desenvolvida uma curva de calibração específica para o clone estudado neste trabalho.

A calibração foi realizada em 4 árvores do mesmo clone estudado no sítio da Veracel, com idade de 5 anos, do experimento BEPP situado na Fazenda Areão, pertencente à ESALQ/USP, no município de Piracicaba/SP (22° 42' 30" S e 47° 38' 00" W). O trabalho de calibração do método foi realizado no Laboratório de Ecofisiologia Florestal e Silvicultura da ESALQ/USP, em Piracicaba, situado cerca de 2 km do Experimento da Fazenda Areão.

As árvores foram derrubadas no local do diâmetro a altura do peito (DAP), onde foram retiradas seções de 0,36 m de comprimento que foram imediatamente imersos em água e transportados para o laboratório. No laboratório, esses segmentos foram conectados a um sistema hidráulico pressurizado (FERNANDEZ et al., 2001; DELGADO ROJAS; FOLEGATTI, ANGELOCCI, 2007). Para forçar a passagem de água pelo xilema, o sistema possuía um tanque de nitrogênio líquido com capacidade de fornecimento de pressão de até 100 bar, conforme esquema apresentado na Figura 4.

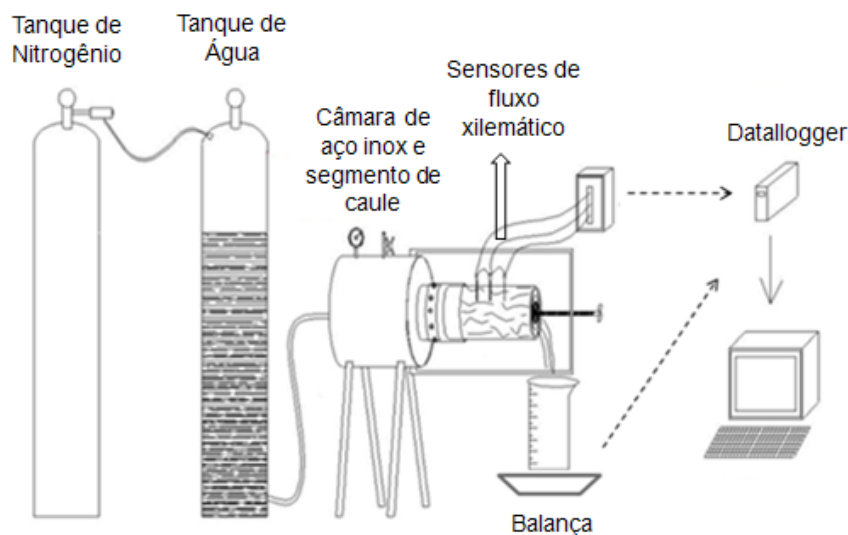


Figura 4 - Esquema do sistema hidráulico utilizado para simular o fluxo de seiva (Adaptado de DELGADO ROJAS, FOLEGATTI E ANGELOCCI, 2006)

Após a instalação dos sensores de fluxo xilêmico nos segmentos de caule, o sistema forneceu a pressão requerida de 5 bar, suficiente para quebrar a resistência capilar dos vasos, permitindo assim a passagem de água pelo xilema da árvore.

As medições da vazão de água foram realizadas por uma balança tipo célula de carga modelo S-20 instalada no final do segmento de caule. Foram realizadas leituras instantâneas (a cada segundo) da temperatura dos sensores e da quantidade de água que passava pelo xilema, sendo os dados armazenados em um datalogger CR 10X. Para obtenção do  $\Delta T_{max}$  o sistema era despressurizado e esperava-se o tempo necessário para a estabilização do valor térmico das sondas.

Depois de realizadas as medições, os segmentos de tronco eram retirados do sistema e discos com 1 cm de espessura foram cortados para a medição da área do alburno.

### 3.3.4 Avaliação do crescimento e eficiência do uso da água

Para avaliação do crescimento das parcelas, a cada quatro meses foram realizadas medições do diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total nas 36 árvores úteis de cada parcela.

Para obter a relação entre o DAP e a biomassa das árvores, em outubro de 2005 foram selecionadas 12 árvores de cada tratamento para a quantificação de biomassa. As árvores foram escolhidas seguindo diferentes classes de DAP, na qual foram obtidas a altura total e o lenho foi cortado e pesado, obtendo-se assim o peso úmido total do lenho de cada árvore. Foram retiradas subamostras e colocadas em estufa a 65° durante 72 horas para a determinação da umidade, permitindo obter a massa de material seco.

Com a relação entre biomassa e o DAP dessas árvores, foi gerada uma equação que permitiu estimar o incremento de biomassa das árvores monitoradas pelos sensores de fluxo de seiva, nas quais foram realizadas medições do DAP a cada quatro meses, conforme especificado anteriormente.

Com os dados de volume de água transpirada em determinado período e o incremento da biomassa do tronco neste mesmo período, foi calculada a eficiência do uso da água pela eq. (8)

$$EUA = \frac{\Delta Biomassa}{T} \quad (8)$$

Em que:

EUA = Eficiência do uso da água, em g L<sup>-1</sup>;

$\Delta$ Biomassa = Biomassa final – Biomassa inicial, em g;

T = Transpiração, em L.

### 3.3.5 Determinação da condutância da copa

Com os dados de transpiração obtidos pelo fluxo xilemático, a condutância da copa ( $g_c$ ) foi calculada por meio da inversão da equação de Penman Monteith (eq. (9)), procedimento também adotado por Champion, Dyes e Scholes (2004):

$$g_c = DL \cdot \left( \frac{g_a \cdot E \cdot \lambda \cdot \gamma}{(\Delta \cdot R_n + \rho_a \cdot C_p \cdot (e_s - e_a) \cdot g_a - \lambda \cdot E \cdot (\Delta + \gamma))} \right) \quad (9)$$

Em que:

$g_c$  = condutância da copa ( $m \ s^{-1}$ )

$DL$  = comprimento do dia (s);

$g_a$  = condutância aerodinâmica ( $m \ s^{-1}$ ). Usou-se valor fixo de  $0,2 \ m \ s^{-1}$ , um valor representativo para florestas com copas.

$E$  = dados de transpiração diário (mm) derivados dos dados do fluxo xilemático;

$\lambda$  = fluxo de calor latente de evaporação ( $2450000 \ J \cdot kg^{-1}$ );

$\gamma$  = constante psicrométrica ( $kPa \ ^\circ C^{-1}$ );

$\Delta$  = declividade da curva de pressão de saturação de vapor ( $0,13kPa \ ^\circ C^{-1}$ );

$R_n$  = Saldo de radiação ( $W \ m^{-2}$ ).

$\rho_a$  = densidade do ar ( $1 \ kg \ m^{-3}$ );

$C_p$  = calor específico do ar seco ( $1004 \ J \ kg \ ^\circ C^{-1}$ );

$e_s - e_a$  = Déficit de pressão de vapor (kPa).  $e_s - e_a$  médio das horas de luz do dia (6:00h as 18:00h).

### 3.3.6 Umidade do solo

O monitoramento da umidade do solo foi realizado por meio do sistema TDR (Time Domain Reflectometry), utilizando-se o Modelo Trase. Os sistemas TDR foram instalados em três trincheiras de cada tratamento. Em cada trincheira a umidade do solo foi avaliada em 5 profundidades: 15, 50, 200 e 300 cm. Em cada profundidade foram instalados três sensores em locais distintos a partir da planta: a) na linha; b) a 2/3 de distância entre a planta e a entrelinha e c) na entrelinha. Esse procedimento foi adotado visando avaliar a variação de umidade em todo o perfil do solo, tanto no sentido vertical quanto horizontal a partir da planta. Para calibração dos sensores, na época de instalação dos mesmos compararam-se os dados obtidos pelos sensores ( $U_{TDR}$ ) com amostras retiradas em posições semelhantes no perfil do solo para

determinação da umidade pelo método gravimétrico ( $U_g$ ). Obteve-se uma equação  $U_{TDR} = 0,97 \times U_g$ , ou seja, os dados de umidade foram muito semelhantes entre os dois métodos.

Para o cálculo de armazenamento de água em cada tratamento, utilizou-se o procedimento descrito em Libardi (2005), considerando a umidade volumétrica obtida em cada horizonte como sendo a média dos três locais e somando o armazenamento de água em cada horizonte até a profundidade de 1,5 m, conforme eq. (10):

$$h_{i,1,5\text{ m}} = (\theta_i \times z) \times 1000 \quad (10)$$

Em que:

$h$  = armazenamento de água no dia  $i$  até 1,5 m de profundidade, em mm;

$\theta$  = umidade volumétrica obtida no dia  $i$ , em  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ;

$z$  = profundidade do horizonte, em m.





#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se que no ano de 2005, a pluviosidade acumulada foi de 1.313 mm, bem próxima da média histórica da região, de 1.255 mm (Figura 5). O período de avaliação (agosto a dezembro) contemplou meses com chuvas abundantes e um mês sem chuva (outubro), assim como um aumento gradativo da temperatura média (Figura 5).

De agosto a dezembro de 2005, a pluviosidade foi de 619 mm e a irrigação de 171,7 mm (Tabela 3), as parcelas irrigadas receberam um total de 790,7 mm, ou seja, 27,8% a mais de água em relação ao tratamento sem irrigação.

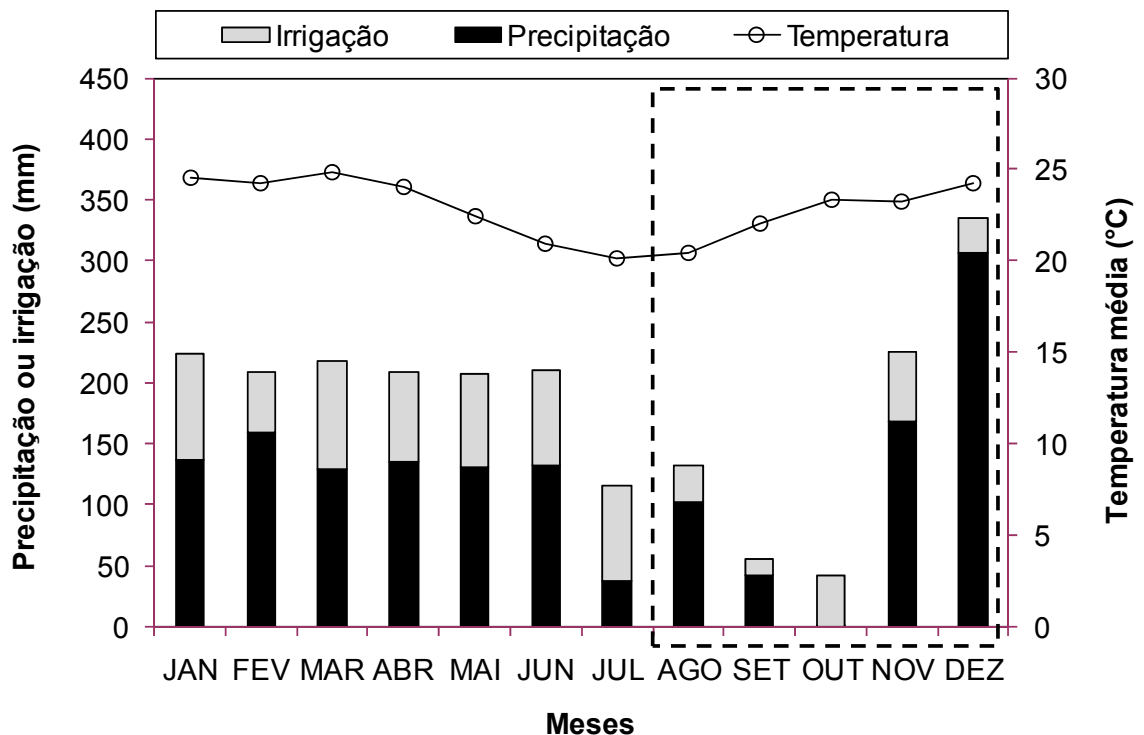


Figura 5 - Temperatura, precipitação e irrigação média mensal do ano de 2005 no município de Eunápolis/BA. A linha pontilhada representa o período de avaliação do fluxo de seiva

Tabela 3 - Temperatura média, radiação, precipitação e irrigação realizada no tratamento irrigado de agosto a dezembro de 2005

Mês	Temperatura média °C	Radiação MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>	Precipitação mm	Irrigação mm
Agosto	20,4	13,8	101,8	31,06
Setembro	22,0	15,1	42,0	13,50
Outubro	23,4	18,8	0,4	41,23
Novembro	23,2	17,3	167,8	57,39
Dezembro	24,2	18,2	141,6	28,50
Média ou total	22,7	16,6	619,0	171,7

#### 4.1 Calibração do método de Granier

Com os dados de vazão do fluxo de água e as mensurações dos sensores de Granier, foi possível obter uma curva de variação da densidade do fluxo de seiva ( $u$ ) em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$  pelo coeficiente  $K$  (Figura 6).

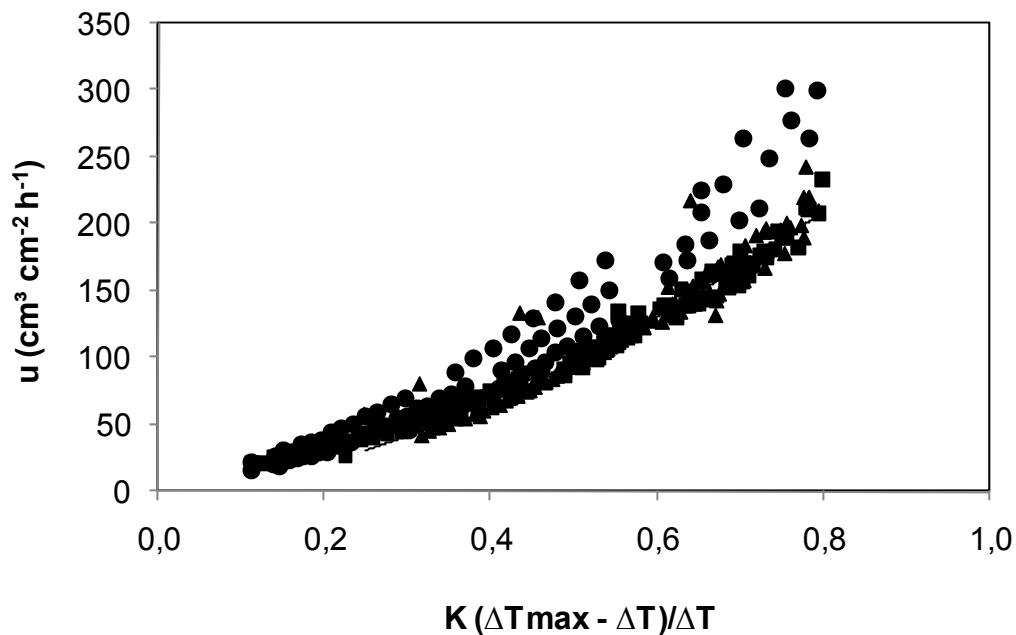


Figura 6 - Curva de calibração específica para um clone de *Eucalyptus grandis x urophylla* usado para calcular a densidade de fluxo ( $n = 4$ )

As variações do coeficiente K foram calculadas em função da diferença de temperatura fornecida pelos sensores inseridos no segmento de tronco. Já a densidade de fluxo  $u$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) foram os dados de vazão medidos diretamente do sistema hidráulico e multiplicados pela área medida do alburno.

Assim, a nova equação gerada foi:

$$u = 304,46 . K^{1,606} \quad (11)$$

Em que:

$u$  = densidade de fluxo ( $\text{cm}^3 . \text{cm}^{-2} . \text{h}^{-1}$ );

K = constante que relaciona as temperaturas.

Embora Granier, Siegwolf e Kostner (1996) observaram que a equação original (Granier, 1985) pode ser utilizada independentemente da espécie de árvore e anatomia da madeira, os dados obtidos neste trabalho evidenciam a necessidade de ajuste nos dados. O estudo de calibração mostrou que o fluxo de seiva calculado pela equação original de Granier ( $u = 119 . K^{1,23}$ ) subestimou significativamente o uso de água da árvore, como pode ser observado na Figura 7.

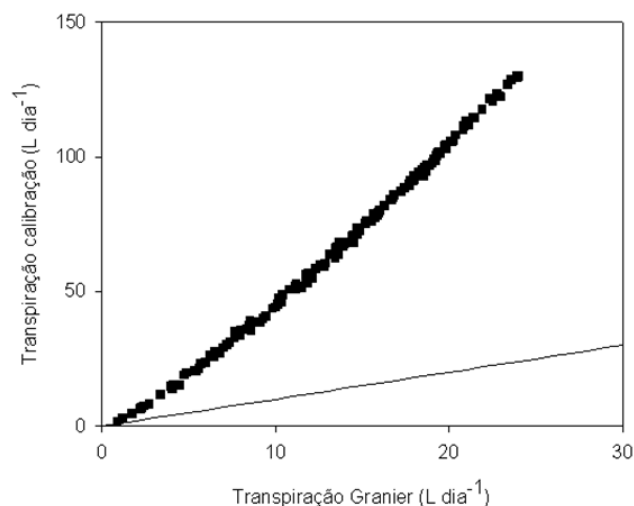


Figura 7 - Relação entre transpiração calculada pela equação de calibração e através da equação de Granier

Smith e Allen (1996) observaram que a técnica desenvolvida por Granier deva ser calibrada para cada nova espécie estudada, pelo menos até que uma calibração com fundamentos físicos seja desenvolvida. Segundo Fernandez et al. (2001) no caso do método de pulso de calor, existe uma ruptura do tecido do xilema que está associado à inserção dos sensores na árvore. Conseqüentemente a velocidade do fluxo de seiva mensurada deve ser corrigida pelos efeitos da colocação das sondas e ferimentos ocasionados ao lenho.

Swanson e Whitfield (1981) foram os primeiros a desenvolver fatores de correção derivados de soluções numéricas para fluxo de calor e água nos poros médios das plantas. Green e Clothier (1988) também investigaram estes fatores de correção para duas espécies de árvores, no qual macieiras apresentaram o comportamento esperado, diferentemente do ocorrido para plantas de kiwi.

Segundo Clearwater et al. (1998), uma outra possível fonte de erro do método de Granier pode ocorrer se os sensores estiverem em contato com áreas do xilema não condutoras, como cerne ou a casca, podendo gerar subestimativa da velocidade do fluxo. Estes autores desenvolveram uma equação que pode ser aplicada para correção, caso se conheça o comprimento e a proporção do xilema inativo.

Delgado Rojas et al. (2007) em um estudo de calibração desenvolvido para *Eucalyptus grandis* observaram que a equação de Granier subestimou 2,65 vezes o valor obtido em laboratório. Esses resultados dão suporte aos resultados encontrados neste trabalho, evidenciando que sempre que possível deve-se realizar calibração do método de Granier para diversos tipos de planta que se pretende trabalhar.

## **4.2 Velocidade do fluxo de seiva**

Embora não houve diferença significativa entre os tratamentos em relação à densidade mensal do fluxo de seiva, em todos os meses o fluxo foi maior no tratamento não irrigado em relação ao irrigado (Figura 8). A tendência de maior fluxo no tratamento sem irrigação pode ser explicada pelo fato de haver uma maior área de alburno no tratamento irrigado, o que reduz a densidade do fluxo de seiva, lembrando que esse parâmetro é influenciado pela área de transporte da seiva de cada árvore. De maneira

geral, para os dois tratamentos, houve aumento da densidade de fluxo de seiva do mês de agosto para os meses seguintes, com temperaturas mais elevadas.

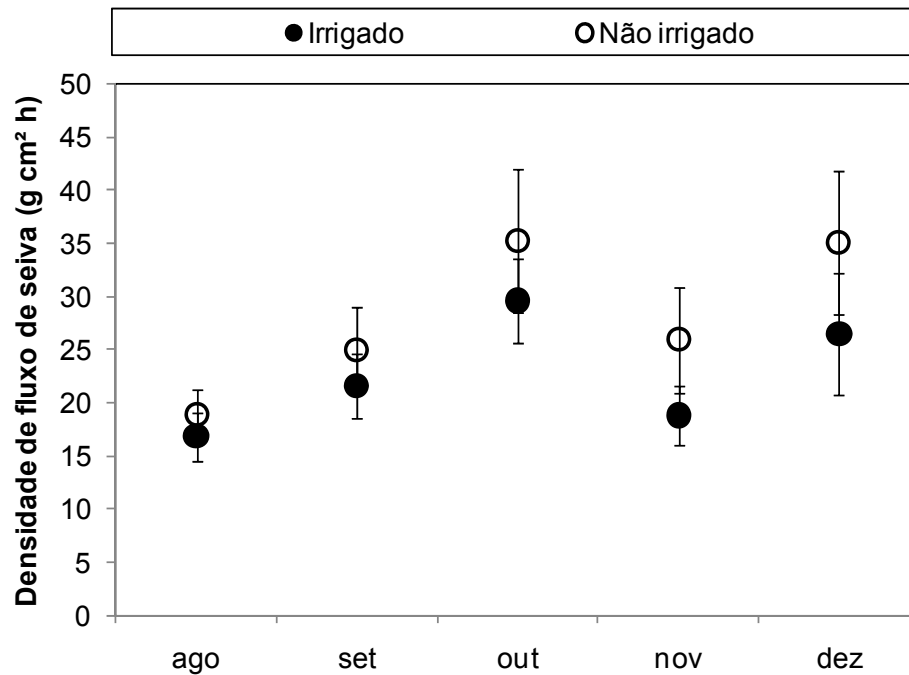


Figura 8 - Média mensal de densidade de fluxo de seiva nos tratamentos irrigado e não irrigado de agosto a dezembro de 2005. As barras representam o erro padrão da média para n=7 para tratamento irrigado e n=6 para tratamento não irrigado

### 4.3 Área do Alburno

Obteve-se uma equação bastante consistente entre a área do alburno e o diâmetro do caule obtido nas árvores abatidas para essa finalidade (Figura 9). Dessa maneira, foi possível estimar a área de alburno das árvores nas quais os sensores estavam instalados, permitindo assim obter a transpiração por planta por meio da multiplicação entre a densidade de fluxo e a área do alburno de cada árvore.

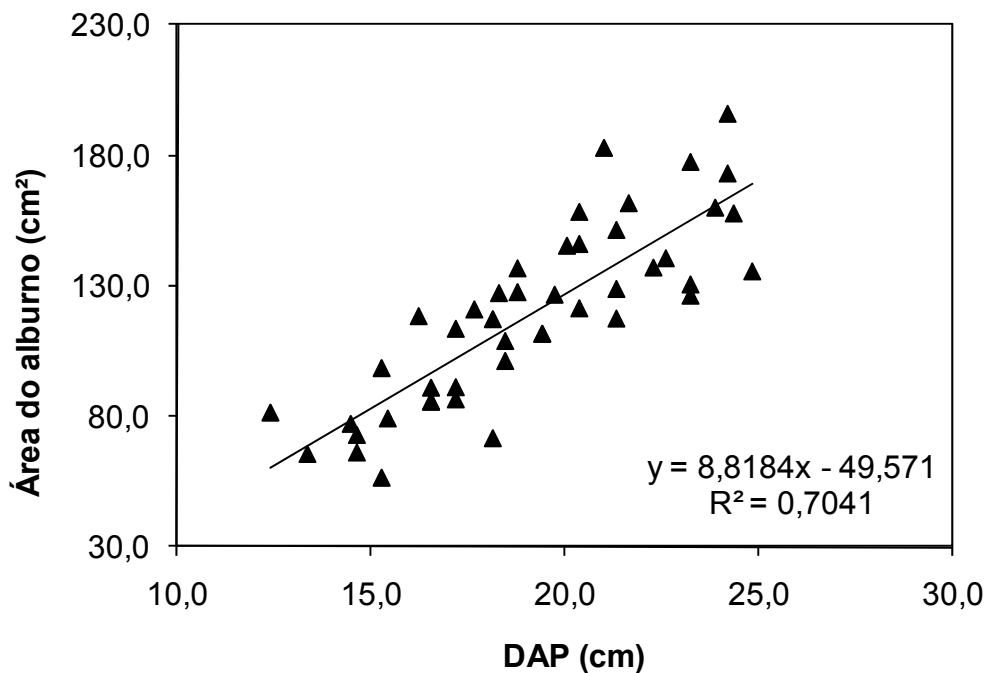


Figura 9 - Relação entre a área do alburno e diâmetro a altura do peito (DAP) para a determinação da equação de regressão, n = 44

#### 4.4 Transpiração

Apesar de uma menor velocidade de fluxo de seiva ( $u$ ) nas árvores do tratamento irrigado (Figura 8), como a área do alburno foi ligeiramente superior neste tratamento, a transpiração diária das árvores irrigadas foi superior às não irrigadas no período de agosto a dezembro de 2005 (Figura 10). A transpiração média diária por árvore no tratamento irrigado foi de 68 litros ao longo do período de agosto a dezembro de 2005, atingindo um máximo de 79 litros. Já no tratamento não irrigado a transpiração média diária por árvore foi de 68 litros no mesmo período, atingindo um máximo de 72 litros (Figura 10).

Entre os meses estudados a transpiração foi bastante variável na escala diária, evidenciando que as plantas respondem aos estímulos do ambiente, como radiação e déficit de pressão de vapor, de maneira bastante dinâmica.

Vertessy et al (1995) encontraram fluxos diários de  $25 \text{ L dia}^{-1}$  em *Eucalyptus regnans* na Austrália. Também em estudo na Austrália, através do lisímetro de balança, realizado por Dunin e Mackay (1982 apud LIMA, 1993) encontraram valores que

variaram 1 a 7mm dia<sup>-1</sup> em *Eucalyptus maculata* com 7 a 9 anos. Segundo Biddescombe et al. (1979 apud LIMA, 1993) em condições de verão *Eucalyptus saligna* transpirou em média 23 L arv<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> e *Eucalyptus globulus* 37 L arv<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>.

Delgado Rojas et al. (2006) ao analisarem *Eucalyptus grandis* com 2 anos de idade no Brasil, encontraram uma variação de 0,7 L arv<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> a 26,54 L arv<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>. Já Soares e Almeida (2001) encontraram valores de 1,1 a 5,8mm por dia para *Eucalyptus grandis* na região de Aracruz, ES.

Ou seja, os resultados de transpiração encontrados neste trabalho são superiores aos encontrados na literatura, possivelmente devido às condições climáticas favoráveis na região do estudo (Sul da Bahia), assim como condições ideais de umidade do solo ao longo do ano devido às chuvas bem distribuídas ao longo do ano, conforme verificado na Figura 5 e Tabela 3. Ruprecht e Stoneman (1993 apud WHITEHEAD, 2004) afirmaram que altas taxas de produtividade estão freqüentemente associadas com altas taxas de uso da água. Quando comparado com outras espécies, Sansígolo (1979 apud LIMA, 1993) encontrou taxas de aproximadamente 60 L arv<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> para *Pinus caribaea* com dez anos de idade em Piracicaba, SP. Larcher (1980) apresentou valores máximos de taxa de transpiração para algumas espécies temperadas, por exemplo, 73 L arv<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> para *Quercus sp*, 140 L arv<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> para *Betula pendula* e 32 L arv<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> para *Fagus salvia*.

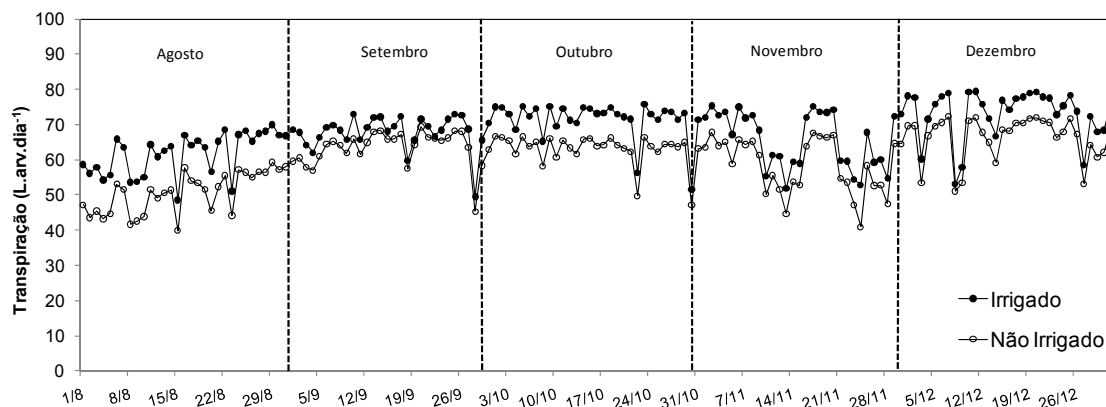


Figura 10 - Transpiração média de plantas de *Eucalyptus* com quatro anos de idade, para os tratamentos irrigado e não irrigado, durante o mês de agosto e dezembro de 2005



Quando considerada a transpiração em escala mensal, as árvores irrigadas transpiram mais ou semelhantemente as não irrigadas (Figura 11). O mês de outubro foi o mês em que houve maior quantidade de água transpirada em ambos os tratamentos, com uma pequena queda na transpiração em novembro para os dois tratamentos.

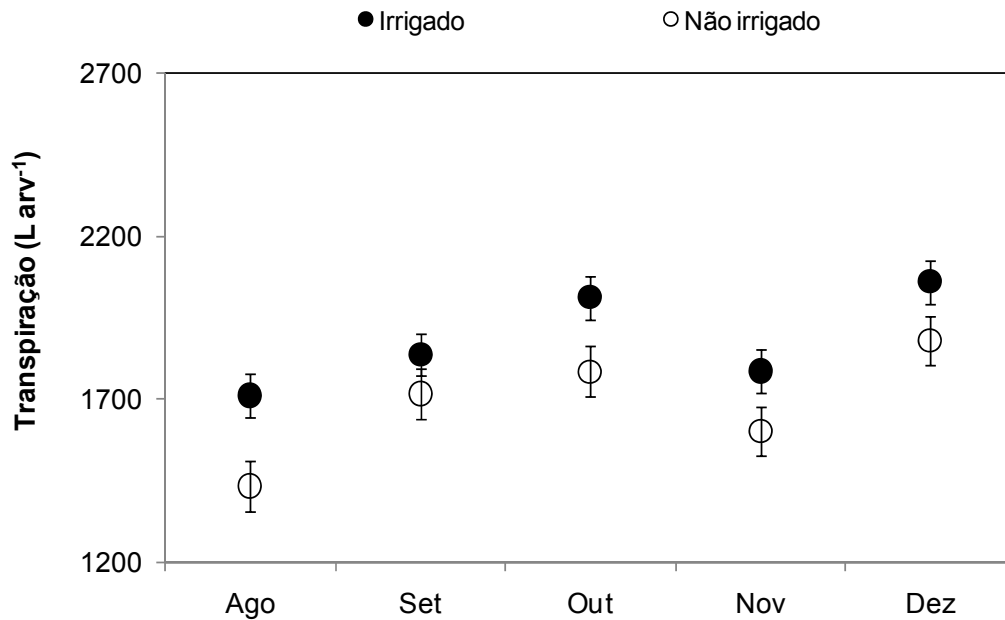


Figura 11 - Transpiração mensal em litros nos meses de agosto a dezembro de 2005, para os tratamentos irrigado e não irrigado

#### 4.5 Biomassa e Crescimento

Para o cálculo da eficiência do uso da água foi necessário obter além da transpiração de água pelas plantas, o incremento de biomassa durante determinado período. Para tanto, ajustaram-se os dados de diâmetro à altura do peito (DAP) e biomassa medida das avaliações destrutivas a uma equação consistente, que permitiu estimar a biomassa do tronco a partir de dados de DAP das árvores avaliadas (Figura 12).

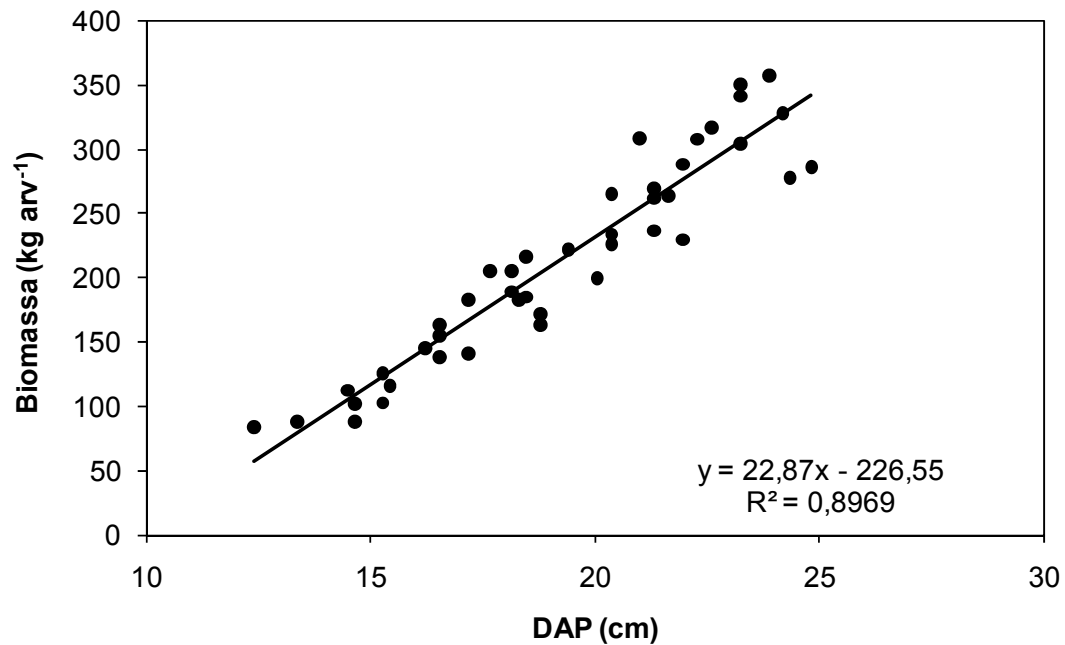


Figura 12 - Relação entre Biomassa DAP (diâmetro à altura do peito) para a determinação da equação de regressão

As árvores do tratamento irrigado apresentaram maior diâmetro à altura do peito (DAP) e maior altura do que as árvores do tratamento não irrigado (Tabela 4), na avaliação realizada no final do experimento (dezembro de 2005). Embora a área do alburno média foi ligeiramente superior no tratamento irrigado, os valores não diferiram entre os tratamentos possivelmente devido à variação obtida nos dados, confirmado pelo coeficiente de variação relativamente alto para essa variável.

Tabela 4 - Valores médios de diâmetro à altura do peito (DAP), altura e área do alburno para os tratamentos irrigado e não irrigado

Variáveis	Irrigado	Não irrigado	F	CV(%)
DAP (cm)	20,9 a	17,7 b	5,8*	12,4
Altura (m)	30,3 a	27,8 b	7,62*	5,7
Área do alburno (cm <sup>2</sup> )	121,3 a	114,4 a	0,4 <sup>NS</sup>	22,2

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>NS</sup> não significativo. Médias seguidas de letras diferentes na linha diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade

Quanto à biomassa, no período de agosto a dezembro de 2005 o incremento médio foi de 16 kg planta<sup>-1</sup> no tratamento irrigado e de 10 kg planta<sup>-1</sup> no tratamento não irrigado, evidenciando que a irrigação promoveu um maior crescimento das plantas e maior incremento de biomassa nesse período (Figura 13). Ou seja, o eucalipto não apresentou consumo de luxo de água, pois a água a mais transpirada pelas árvores irrigadas foi efetivamente usada para auxiliar a fixação de carbono no tronco.

Stape et al. (2004b) ao estudarem *Eucalyptus gradis x urophylla* na Bahia na região de Entre Rios, observaram que a irrigação aumentou a produtividade em madeira em 52%.

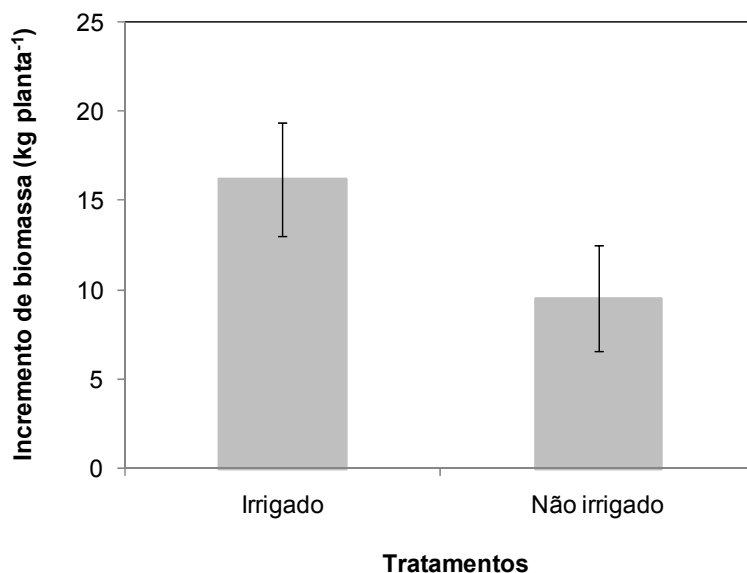


Figura 13 - Incremento de biomassa das plantas de eucalipto nos tratamentos irrigado e não irrigado, no período de agosto a dezembro de 2005. As barras representam o desvio padrão da média para n=6

Árvores maiores apresentaram uma transpiração superior às árvores de menor porte (Figura 14). Árvores com maior biomassa inicial apresentaram uma estrita relação com incremento em biomassa (Figura 15). Dessa maneira, obteve-se relação significativa entre incremento em biomassa das árvores e a transpiração acumulada nesse período evidenciando que as árvores que cresceram mais, apresentaram maior transpiração (Figura 16).

Segundo Binkley et al. (2002), ao longo do ciclo da floresta a tendência é haver maior competição entre as plantas, as árvores dominantes passam a usar grandes quantidades de recurso, reduzindo a proporção de recurso disponível para as árvores dominadas. Boyden, Binkley e Stape (2008) em um estudo realizado com *Eucalyptus* em Mogi Guaçu, SP observaram que a competição entre as árvores reduziu substancialmente o crescimento de árvores pequenas, cerca de 77%, comparado a 3% de redução das árvores dominantes.

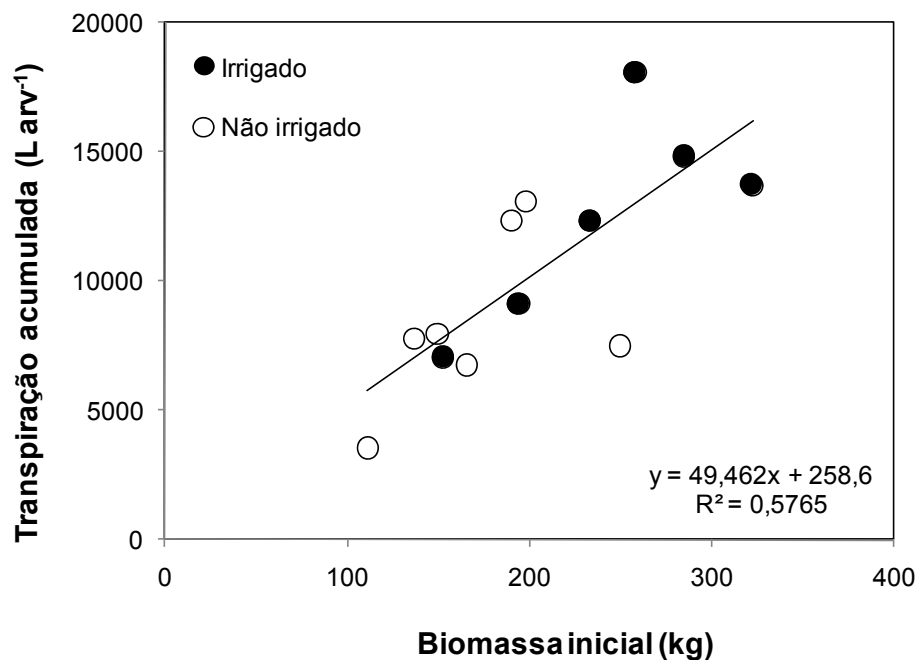


Figura 14 - Transpiração acumulada em função biomassa inicial por árvore, do período de agosto a dezembro de 2005

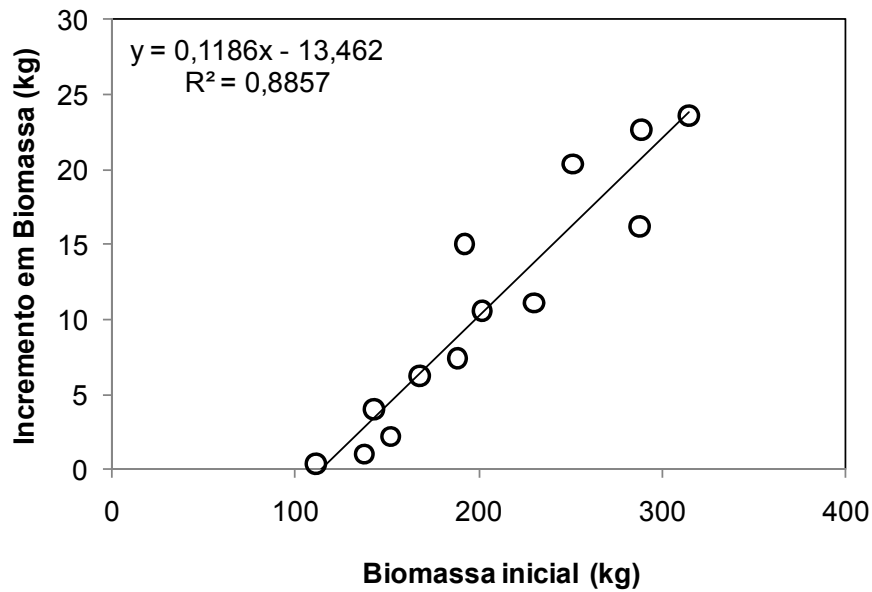


Figura 15 – Incremento em biomassa de agosto a dezembro de 2005 em função da biomassa inicial da árvore

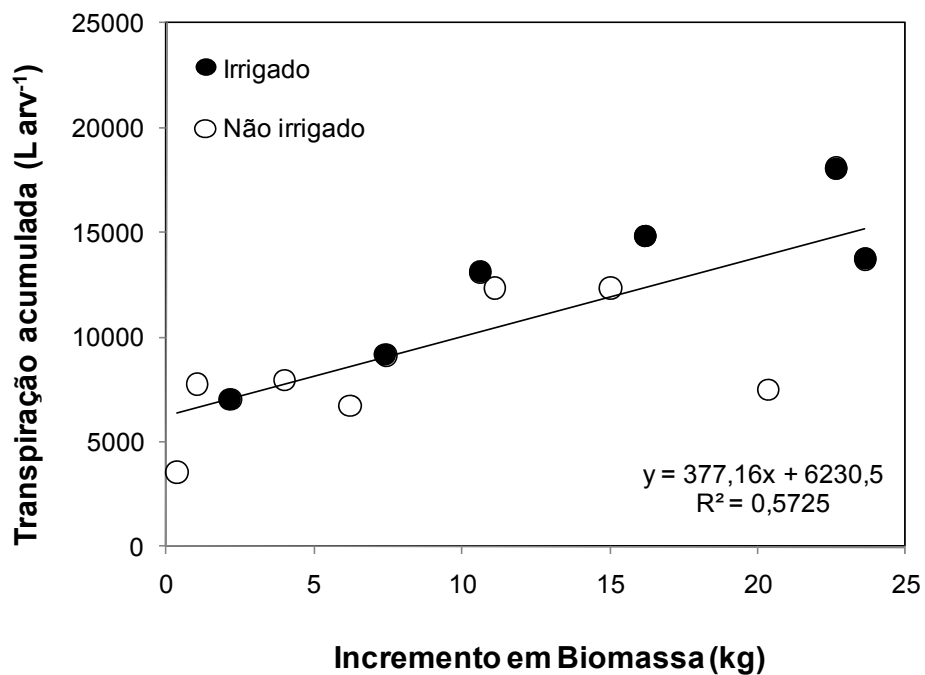


Figura 16 - Transpiração acumulada em função do incremento em biomassa inicial por árvore, do período de agosto a dezembro de 2005

#### 4.6 Eficiência do uso da água

Assim como para a transpiração, as árvores de maior biomassa inicial apresentaram uma eficiência do uso da água superior às árvores de menor porte (Figura 17). Como as árvores de maior porte inicial foram as que apresentaram um maior incremento em biomassa (Figura 15), pode-se dizer que a eficiência de uso da água é diretamente proporcional ao incremento em biomassa das árvores tendo em vista a correlação significativa que foi obtida entre incremento em biomassa e eficiência do uso da água para os dois tratamentos. (Figura 18).

Em um estudo no Hawaii com *Eucalyptus saligna* com 5,5 anos de idade, Binkley et al. (2002) observaram que árvores com maior interceptação de luz, maior quantidade de N na copa e maior uso de água, tiveram maiores taxas de crescimento por unidade de recurso utilizado. A eficiência do crescimento em biomassa do tronco por unidade de recurso utilizado foi 2 vezes maior nas árvores dominantes.

Uma possível explicação para uma menor alocação de C no tronco das árvores dominadas, é que as mesmas podem estar desviando C para outros tecidos, como por exemplo, para as raízes ou para a respiração. Além disso, pode haver uma menor capacidade fotossintética das árvores dominadas, implicando em uma menor eficiência do uso da luz, de N e água em relação às dominantes (BINKLEY et al., 2002).

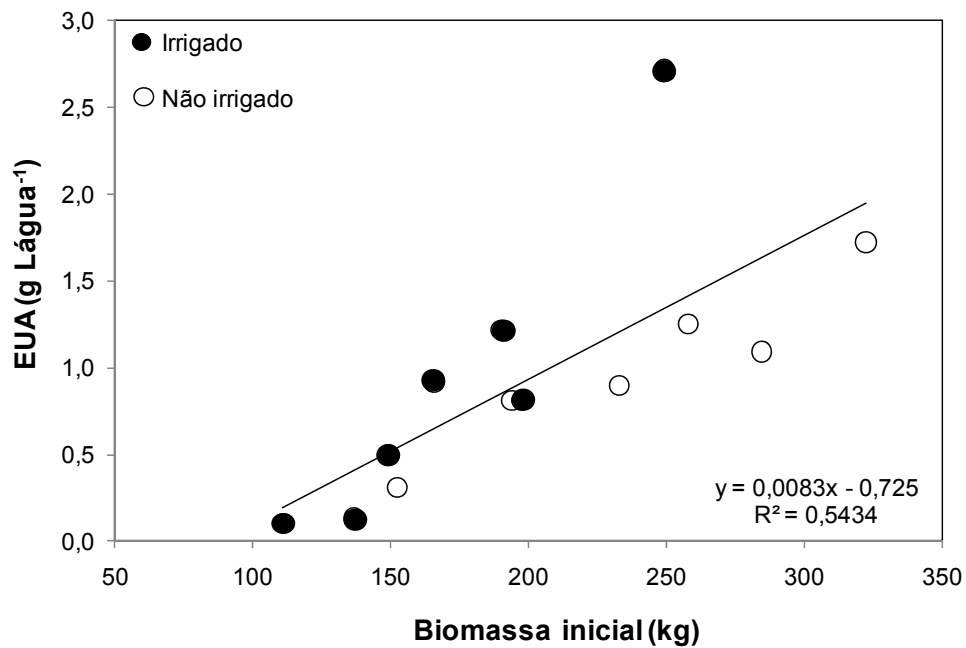


Figura 17 - Relação entre eficiência do uso da água e biomassa inicial das árvores, do período de agosto a dezembro de 2005

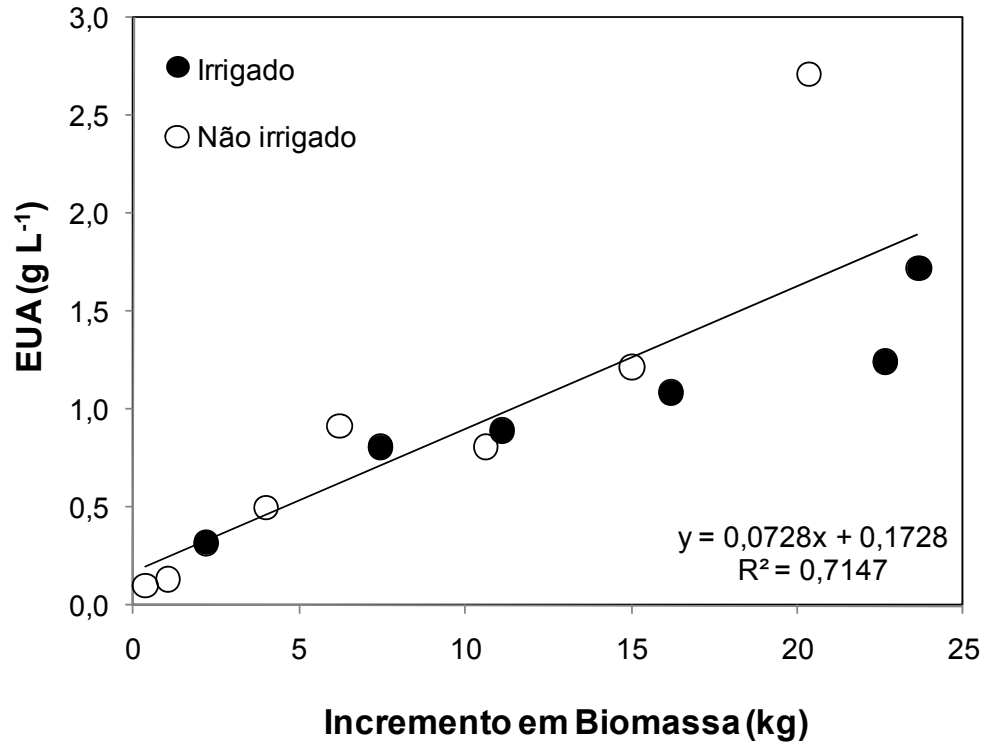


Figura 18 – Relação entre eficiência do uso da água e incremento em biomassa seca do período de agosto a dezembro de 2005

No tratamento irrigado a EUA variou de 0,3 a 1,7 g L<sup>-1</sup>, enquanto no tratamento não irrigado a variação foi de 0,1 a 2,7 g L<sup>-1</sup>. Ambos os tratamentos apresentaram EUA média de 1,0 ± 1,47 g L<sup>-1</sup>, a um intervalo de confiança de 5%.

Stape et al. (2004) obtiveram EUA para *Eucalyptus* em torno de 3 g L<sup>-1</sup> para uma parcela não irrigada e 4 g L<sup>-1</sup> para uma parcela irrigada, em um ano com precipitação de 1.770 mm. Em um ano com precipitação de 1.210 mm, a EUA foi de 2 g L<sup>-1</sup> na parcela não irrigada e de 3 g L<sup>-1</sup> na irrigada. Ou seja, independente da condição de chuva, o tratamento irrigado apresentou maior EUA em seu trabalho.

Em outro trabalho com diferentes níveis de pluviosidade conduzido com *Eucalyptus* no norte da Bahia, região próxima ao do presente estudo, Stape et al. (2004b) obtiveram EUA de 1,59, 2,24 e 3,21 g L<sup>-1</sup> respectivamente para ambientes de alta (1.276 mm ano<sup>-1</sup>), média (1.055 mm ano<sup>-1</sup>) e baixa (886 mm ano<sup>-1</sup>) precipitação.

Em plantas de *Ochroma pyramidale*, uma pioneira C<sub>3</sub> de rápido crescimento, a eficiência instantânea do uso da água foi de 2 g L<sup>-1</sup> (Marenco & Lopes, 2005). Silva et al. (2004) obtiveram uma EUA em mudas de *Eucalyptus grandis* de 3,54 g L<sup>-1</sup> e 3,56 g L<sup>-1</sup> para *Eucalyptus citriodora*.

#### 4.7 Umidade no solo

Ocorreu variação significativa do armazenamento de água no solo ao longo dos meses para ambos os tratamentos, porém em todos os meses o armazenamento foi superior no tratamento irrigado (Figura 19).

Observa-se que essa variação foi dependente da transpiração de água pelas plantas (Figura 11). A transpiração foi crescente de agosto a outubro, com conseqüente diminuição no armazenamento de água no solo, sendo este causado pelo consumo pelas plantas, lembrando que em outubro não ocorreu precipitação pluviométrica e a irrigação foi somente de 40 mm. Em novembro a transpiração teve uma leve queda e a chuva foi abundante (170 mm), além da própria irrigação (57 mm), favorecendo o reabastecimento do armazenamento de água no solo. Em dezembro a transpiração voltou a aumentar, porém as chuvas e irrigação (307 e 29 mm, respectivamente)



favoreceram a manutenção de um elevado armazenamento de água no solo para ambos os tratamentos.

Mesmo no tratamento sem irrigação, praticamente não houve restrição hídrica ao crescimento do eucalipto ao longo dos meses do estudo. Em setembro e outubro, no tratamento sem irrigação, o armazenamento de água no solo ficou próximo do armazenamento de água no nível do ponto de murcha permanente, indicando que pode ter ocorrido alguma limitação ao fornecimento de água pelo solo às plantas. Entretanto, como não houve diminuição brusca na transpiração pelas plantas não irrigadas nesses meses (Figura 11), supõe-se que o nível de déficit hídrico que essas plantas foram submetidas provavelmente não limitou o crescimento das plantas. Além disso, isso pode indicar que as plantas conseguiram absorver água de camadas mais profundas do solo do que 1,5 m, profundidade que foi considerada no cálculo de armazenamento apresentado na Figura 20.

Esses resultados demonstram que o tipo de cobertura vegetal, assim como o estágio fenológico que estas se encontram, apresentam influência marcante na variação do armazenamento de água no solo devido à transpiração da superfície vegetal.

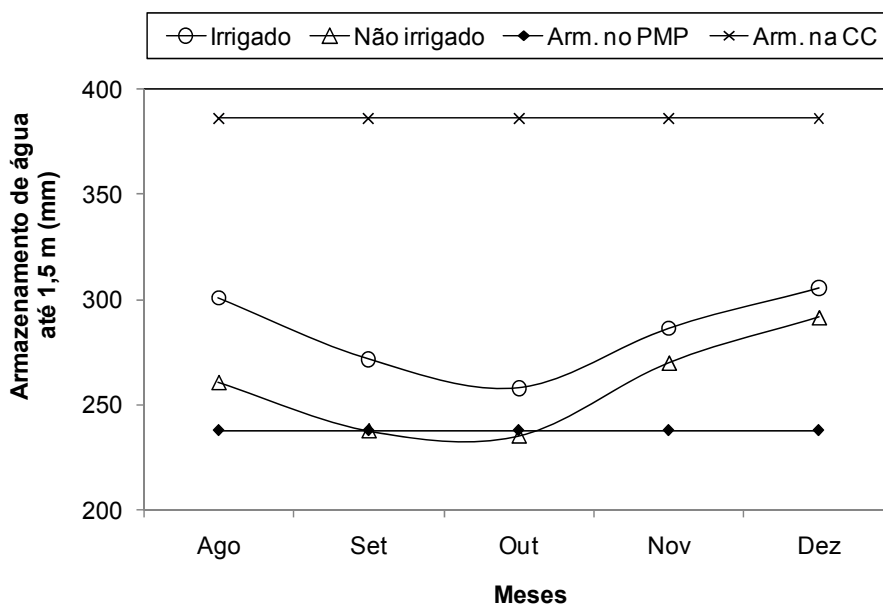


Figura 19 - Variação no armazenamento de água no solo (mm) até a profundidade de 1,5 m, para os tratamentos: a) Irrigado e b) Não irrigado. Arm no PMP = armazenamento de água no solo no ponto de murcha permanente (-1.500 kPa); Arm na CC = armazenamento de água no solo na capacidade de campo (-10 kPa)

No tratamento não irrigado, a umidade na camada superficial do solo foi inferior em todos os meses em relação ao tratamento irrigado (Figura 19). Conforme esperado, nos meses mais chuvosos a umidade do solo foi superior em todo o perfil do que nos meses menos chuvosos, independente do tratamento. Para ambos os tratamentos e na maioria dos meses, a umidade do solo decresce até a profundidade de cerca de 1,0 m e aumenta até a profundidade de 3,0 m. Isso pode indicar que as raízes do Eucalipto absorvem água do solo preferencialmente da camada até 1,0 m, diminuindo a umidade do solo nessa camada, e menos intensamente das camadas mais profundas, nas quais a umidade atinge valores maiores até do que na superfície. Na camada superficial, embora ocorra absorção de água pelas raízes do eucalipto, o restabelecimento do conteúdo de água devido às chuvas ou irrigações (no tratamento irrigado) são mais freqüentes, mantendo o conteúdo de água sempre maior na superfície do que nas camadas próximas de 1,0 m. Além disso, de maneira geral o conteúdo de água na profundidade de 3,0 m é inferior no tratamento irrigado para todos os períodos quando comparado ao tratamento não irrigado.

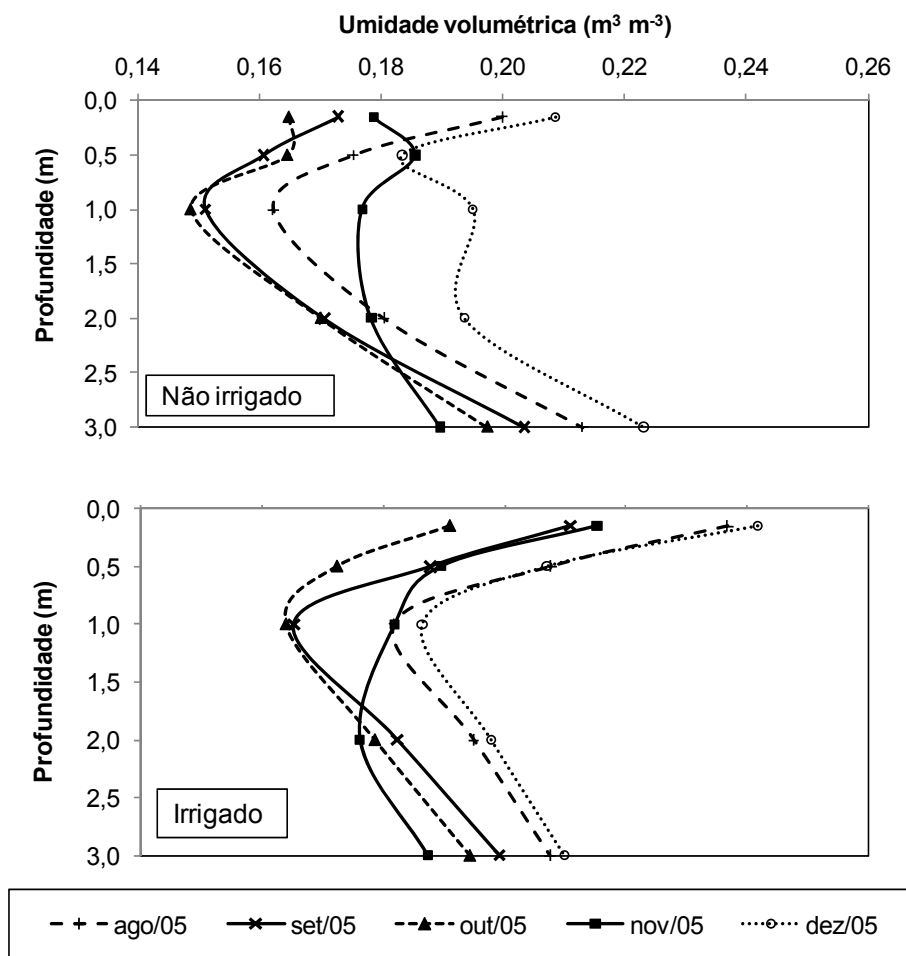


Figura 20 - Variação da umidade do solo média para os meses de agosto a dezembro de 2005, nos tratamentos irrigado e não irrigado, no perfil do solo

#### 4.8 Estimativa da transpiração pelo método de Penman-Monteith

Os dados de transpiração obtidos dos dados de fluxo xilemático da parcela irrigada e não irrigada foram usados para parametrizar a equação de Penman-Monteith e calcular a condutância da copa ( $g_c$ ) eq.(9) nos dois tratamentos para o período estudado (agosto a dezembro de 2005).

Desse modo, com os dados de condutância da copa e do déficit de pressão de vapor do período fez-se uma relação entre DPV (kPa) e  $g_c$  ( $m\ s^{-1}$ ), obtendo-se através dessa relação, uma equação do tipo potência  $y = a \cdot x^{-b}$  para ambos os tratamentos (Figura 21).

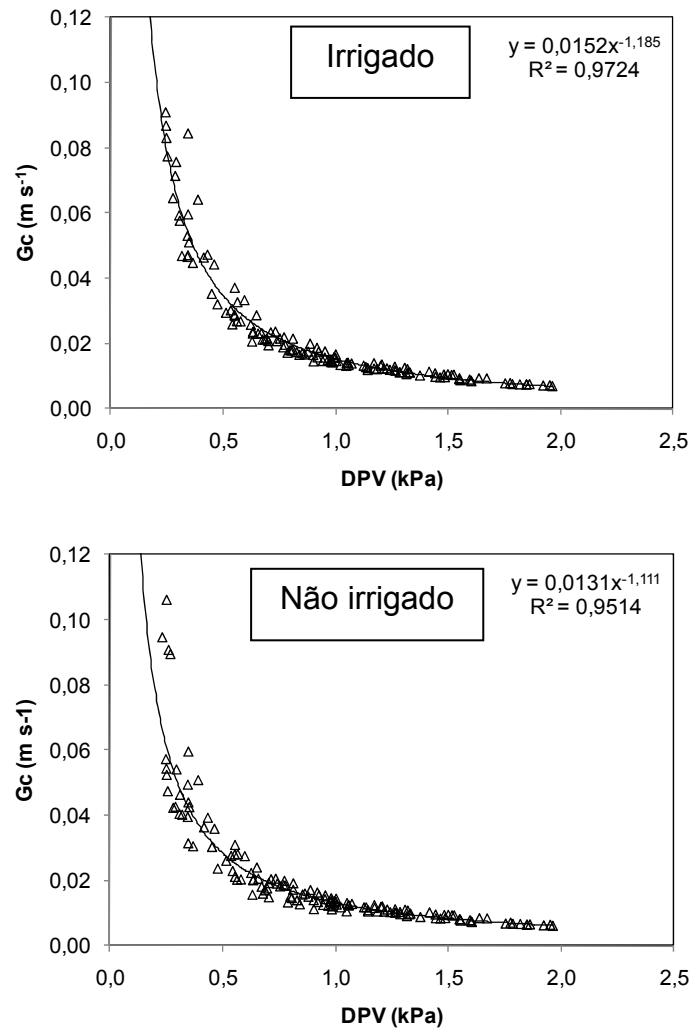


Figura 21 - Relação do déficit de pressão de vapor (DPV) e condutância da copa ( $g_c$ ) calculado através da eq. (3). Sendo a regressão da equação obtida  $y = a.x^{-b}$

Observa-se que em ambos os tratamentos existe uma resposta não linear da condutância da copa em relação ao déficit de pressão de vapor. Dye e Olbrich (1993) observaram semelhante relação entre déficit de pressão de vapor e condutância estomática em *Eucalyptus grandis*, assim como Campion, Dye e Scholes (2004) observaram mesmo comportamento entre condutância da copa calculada pelo método de Penman-Monteith e o déficit de pressão de vapor também para *Eucalyptus grandis*.

Baseado em mensurações feitas em folhas de *Eucalyptus grandis*, Leuning (1990) mostrou que a relação hiperbólica é a melhor relação que explica a resposta

entre a condutância estomática e o déficit de pressão de vapor (DPV) e que essa relação pode ser representada pela função exponencial. Esse mesmo autor ao estudar *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus nitens* mostrou que houve uma redução de 20 e 90% na condutância estomática para cada 1.1 e 3.7 kPa de déficit de pressão de vapor, respectivamente.

Lima et al. (2003) observaram queda linear de  $g_s$  para espécies de *Eucalyptus* frente ao DPV. Essa queda da condutância estomática com o aumento do DPV é comportamento conhecido e essencial para a sobrevivência das plantas, mantendo seu estatus hídrico (SCHULZE; HALL, 1982).

Marrichi (2009) ao estudar 7 clones diferentes no Brasil, mostrou que em média os clones apresentaram aos 16 meses uma queda de aproximadamente  $0,2 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  na condutância, para cada 1 kPa de aumento no DPV, e aos 36 meses a queda foi menor, de aproximadamente  $0,1 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para cada 1 kPa de aumento do DPV.

McNaughton e Jarvis (1983 apud LIMA, 1993) observaram que essa estrita relação entre condutância estomática e o DPV foram verificados em pelo menos duzentas espécies florestais. Lima (1993) afirmou que essa resposta estomática ao DPV significa a existência de um limite para a transpiração das espécies florestais, já que se pode observar que os estômatos permanecem quase fechados quando o DPV é alto.

Com a obtenção desta equação média geral, foi possível parametrizar o método de PM com estimativas de condutância da copa em função do déficit de pressão de vapor para a espécie estudada. Observa-se que houve uma boa correlação entre os valores de transpiração reais obtidos com os sensores de fluxo xilemático e estimados pelo método de PM, para ambos os tratamentos (Figura 22). Entretanto, observa-se que a partir de novembro o método de PM apresentou uma sensível subestimativa da transpiração quando comparado à obtida pelo fluxo de seiva.

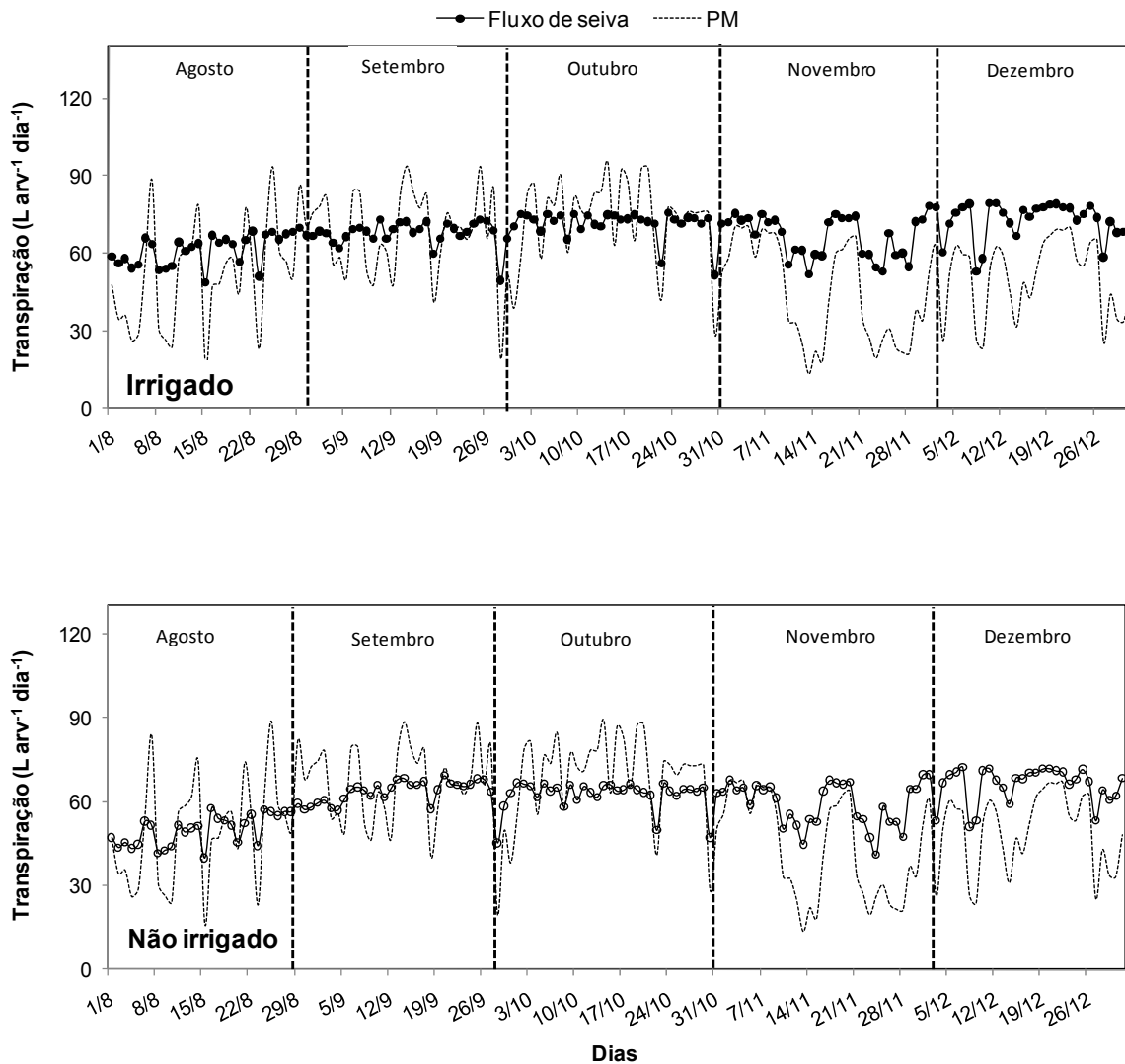


Figura 22 - Relação entre a transpiração estimada pelo método de Penman-Monteith e transpiração mensurada pelos sensores de fluxo xilemático nos tratamentos irrigado e não irrigado, na escala diária

Quando considerada a escala mensal, os dois métodos apresentaram resultados ainda mais semelhantes, especialmente para os meses de agosto a outubro, quando os valores foram praticamente iguais (Figura 23). Assim como ocorreu para a escala diária, o método de PM apresentou sensível subestimativa da transpiração nos meses de novembro e dezembro quando considerada a transpiração mensal das plantas.

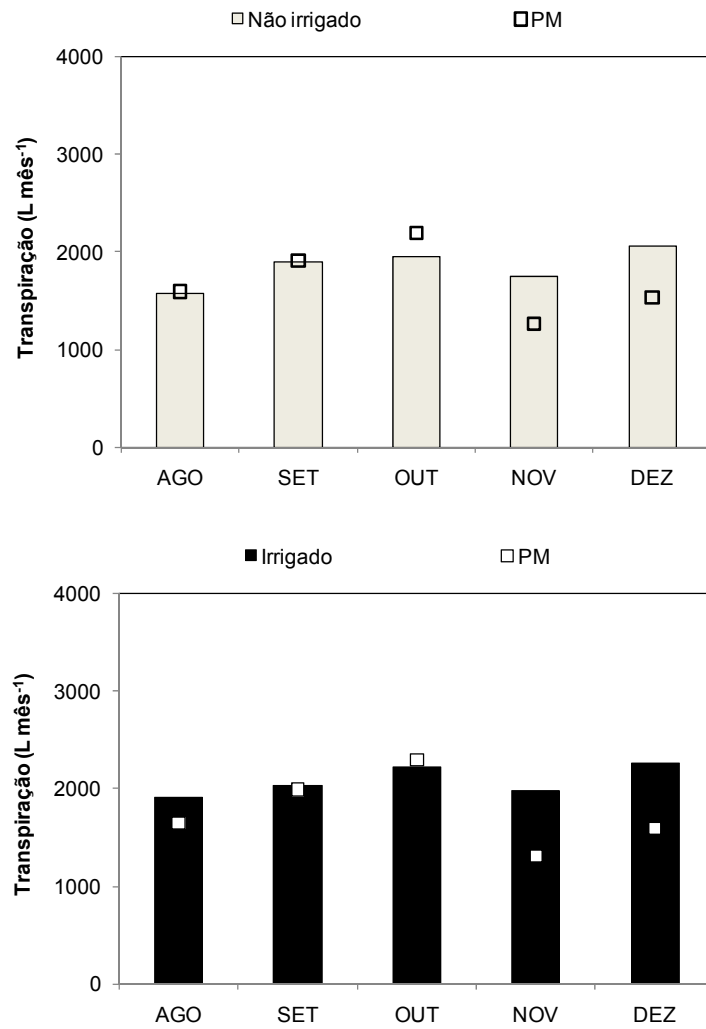


Figura 23 – Transpiração mensal de eucalipto obtido por meio dos sensores de fluxo e estimado pelo método de Penman-Monteith, para os tratamentos irrigado e não irrigado

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no estudo de fluxo de seiva pelo método de Granier, em árvores clonais de *Eucalyptus* com 4 anos de idade e cultivadas no município de Eunápolis, BA, em parcelas com e sem irrigação, durante os meses de agosto a dezembro de 2005, pode-se concluir:

- É necessário calibrar o método de sondas de Granier (GRANIER, 1985) para a espécie de árvore em estudo, a fim de obter estimativas mais confiáveis da transpiração das plantas;
- A transpiração média das árvores irrigadas foi igual ou superior às não irrigadas, atingindo valores da ordem de 68 a 79 L arv<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>,
- Não houve diferença na eficiência do uso da água entre os tratamentos não irrigado e irrigado, com médias de 1,0 g L<sup>-1</sup>;
- Árvores com maior biomassa apresentam maior transpiração acumulada no período, incremento em biomassa e eficiência de uso da água do que árvores de menor porte;
- O método de Penman-Monteith obteve boas estimativas da transpiração do eucalipto quando comparado aos resultados obtidos pelo fluxo de seiva.

Assim, retomando as hipóteses iniciais do estudo, verifica-se que:

- I. O uso da água no tratamento irrigado será maior (MYERS et al., 1996; WHITEHEAD; BEADLE, 2004; STAPE; BINKLEY; RYAN; GOMES, 2004) comparado ao tratamento não irrigado. **Corroborada;**
- II. A eficiência do uso da água das árvores do tratamento irrigado será igual (HUBBARD et al., 2009) ou maior (STAPE; BINKLEY; RYAN; GOMES, 2004) em



relação ao tratamento não irrigado. **Corroborada, sendo a eficiência do uso da água igual entre os tratamentos irrigado e não irrigado;**

- III. Dentro de um povoamento, as árvores dominantes, com maior biomassa, apresentam maior eficiência de uso da água quando comparadas às árvores de menor porte (BINKLEY, et al., 2002). **Corroborada.**

## REFERÊNCIAS

ACKERLY, D.D.; DUDLEY, S.A.; SULTAN, S.E.; SCHMITT, J.; COLEMAN, J.S.; LINDER, C.R.; SANDQUIST, D.R.; GEBER, M.A.; EVANS, A.S.; DAWSON, T.E.; LECHOWICZ, M.J. The evolution of plant ecophysiological traits: recent advances and future directions. **BioScience**, Washington, v. 50, n. 11, p. 979-995, 2000.

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

ALMEIDA, A. **Application of a process-based model for predicting and explaining growth in *Eucalyptus* plantations**. 2003. 232 p. Thesis (Doctor of Philosophy) – The Australian National University, Canberra, 2003.

ALMEIDA, A.C.de.; SOARES, J.V. Análise da influência da variabilidade hidrometeorológica interanual no crescimento de plantações de Eucalipto. In: CONFERÊNCIA IUFRO SOBRE SILVICULTURA E MELHORAMENTO DE EUCALIPTOS, 1997. Salvador. **Anais...** Salvador, 1997, v.4, p.54-61.

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

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 Management**, Amsterdam, v.251, p.10-21, 2007.

ANDERSON, M.C. The geometry of leaf distribution in some south-eastern Australian forests. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.25, p.195-205, 1981.

ANGELOCCI, L.R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera. Introdução ao tratamento biofísico**. O autor, 2002. 68p.

ANGELOCCI, L.R. **Estimativa da transpiração máxima de macieiras (*Malus spp.*) em pomares pelo método de Penman-Monteith**. 1996. 103p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

BUCCI, S. J.; GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F. C.; SCHOLZ, F. G.; FRANCO, A. C.; BUSTAMANTE, M. Functional convergence in hydraulic architecture and water relations of tropical savanna trees: from leaf to whole plant. **Tree Physiology**, Victoria, v.24, p.891-899, 2004.

BINKLEY, D.; STAPE, J.L.; RYAN, M.G.; BARNARD, H.R.; FOWNES J. Age-related decline in forest ecosystem growth: an individual-tree, stand-structure hypothesis. **Ecosystems**, Springer-Verlag, v.5, p.58-67, 2002.

BOYDEN, S.; BINKLEY, D.; STAPE, J.L.; Competition among *Eucalyptus* trees depends on genetic and resource supply. **Ecology**, Washington, DC, v.89, n.10, p.2850-2859, 2008.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106).

CAMPION, J.M.; DYE, P.J.; SCHOLLES, M.C.; Modelling maximum canopy conductance and transpiration in *Eucalyptus grandis* stands not subject to soil water deficits. **Southern African Forestry Journal**, Menlo Park, n.202, p.3-11, 2004.

CLEARWATER, M.J.; MEINZER, F.C.; ANDRADE, J.L.; GOLDSTEIN, G.; HOLBROOK N.M. Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. **Tree Physiology**, Victoria , v.19, p.681-687, 1998.

CONFORTO, E.C.; CAVALCANTE, J.R.; PESSOA, J.D.C.; MORENO, R.M.B.; MATTOSO, L.H.C. Variação sazonal das trocas gasosas, turgescência relativa do tronco e produtividade em dois cultivares de seringueira em Votuporanga, SP, Brasil. **Acta Botânica Brasilica**, São Paulo, v.19, n.4, p. 733-740, 2005.

DELGADO ROJAS, J.S.D. **Avaliação do uso de fluxo de seiva e da variação do diâmetro do caule e de ramos na determinação das condições hídricas de citros, com base para o manejo de irrigação**. 2003. 129p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

DELGADO ROJAS, J.S.D.; FOLEGATTI, M.V.; ANGELOCCI L.R. Calibração do método de sonda de dissipação térmica na determinação do fluxo de seiva em cafeeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2006. Jaboticabal. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2006. 1 CD-ROM.

DELGADO ROJAS, J.S.D. ; RANGER, J. ; LACLAU, J.P. ;NOUVELLON, Y. **Influência da adubação em plantação de *Eucalyptus grandis* sobre o consumo de água estimado por fluxo de seiva**. Paris: INRA, 1990. 30p. (Relatório Técnico Científico apresentado ao Institut National de la Recherche Agronomique.).

DYE, P. J; OLBRICH, B.W. Estimating transpiration from 6-year-old *Eucalyptus grandis* trees: development of a canopy conductance model and comparison with independent sap flux measurements. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v.16, p.45-53, 1993.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA Produção de informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006. 306 p.

FERNANDEZ, J.E.; PALOMO, M.J.; DIAZ-ESPEJO, A.; CLOTHIER, B.E.; GREEN, S.R.; GIRON, I.F.; MORENO, F. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.51, p.99-123, 2001.

FRANCO A.C.; BUSTAMANTE M.; CALDAS L.S.; GOLDSTEIN G.; MEINZER F.C.; KOZOVITS A.R.; RUNDEL P. ; CORADIN V.T.R. Leaf functional traits of Neotropical savanna trees in relation to seasonal water deficit. **Trees**, Berlin, v.19, p.326-335, 2005.

GARTNER, K.; NADEZHDINA, N.; ENGLISCH, M.; ČERMAK, J.; LEITGEB, E. Sap flow of birch and Norway spruce during the European heat and drought in summer 2003. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.258, p.590–599, 2009.

GONÇALVES, A.N.; MCNABB, K.; GONÇALVES, J. Clonal propagation of *Eucalyptus* in Brazilian nurseries. **Forest and Conservation**, New York, v. 54, p. 165-168, 2002.

GRANIER, A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. **Annales des Sciences Forestières**, Versailles, v.42, n.2, p.193-200, 1985.

GRANIER, A. ; SIEGWOLF, R. ; KOSTNER, B. ; Estimates of water vapor flux and canopy conductance of scots Pine at the tree level utilizing different xylem sap flow methods. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v.53, p.105-113, 1996.

GREEN, S.R.; CLOTHIER, B.E. Water use of kiwifruit vines and apple trees by the heat-pulse technique. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.39, p.115–123, 1988.

GUCCI, R.; MASSAI, R.; XILOYANNIS, C.; FLORE, J.A. The effect of drought and vapour pressure deficit on gas exchange of young kiwifruit (*Actinidia deliciosa* var. *deliciosa*) vines. **Annals of Botany**, Oxford, v. 77, p. 605-613, 1996.

GUEHL, J.; AUSSÉNAC, G. Photosynthesis decrease and stomatal control of gas exchange in *Abies alba* Mill. in response to vapour pressure difference. **Plant Physiology**, Rockville, v. 83, p. 316-322, 1987.

HATFIELD, J.L.; SAUER, T.J.; PRUEGER, J.H. Managing soils to achieve greater water use efficiency: a review. **Agronomy Journal**, Oxford, v.93, p.271-280, 2001.

HUBBARD, R.M.; RYAN, M.G.; GIARDINA, C.P. ; BARNARD, H. The effect of fertilization on sap flux and canopy conductance in a *Eucalyptus saligna* experimental forest. **Global Change Biology**, Colorado, v.10, p. 427–436, 2004.

HUBBARD, R.M.; STAPE, J.L.; RYAN, M.; ALMEIDA, A.C.; DELGADO ROJAS, J.S.D. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam (in press), 2009.

IGLESIAS TRABADO, G.; WILSTERMANN, D. Eucalyptus universalis. Cultivated eucalypt forests global map 2008. **GIT Forestry Consulting's Eucalyptologics**. Disponível em: <<http://git-forestry-blog.blogspot.com/2008/09/eucalyptus-global-map-2008-cultivated.html>>. Acesso em: 23 set. 2009.

JARVIS, P.G.; MCNAUGHTON, K.G. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. **Advances in Ecological Research**, New York, v.15, p.1-19, 1986.

LANDSBERG, J.J.; GOWER, S.T. Applications of physiological ecology to forest management. San Diego: Academic Press, 1997. 344p.

LARCHER, W. **Physiological plant ecology**. Springer-Verlag, 1980. 303p.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RiMa, 2006. 550 p.

LEUNING, R. Modelling stomatal behavior and photosynthesis of *Eucalyptus grandis*. **Australian Journal of Plant Physiology**, Victoria, v.17, p.154-175, 1990.

LEUNING, R.; KRIEDEMANN, P.E.; MCMURTRIE, R.E., Simulation of evapotranspiration by trees. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.19, p.205-221, 1991.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 329p.

LIMA, W.P.; JARVIS, P.; RHIZOPOULOU, S. Stomatal responses of *Eucalyptus* species to elevated CO<sub>2</sub> concentration and drought stress. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n.2, p. 231-238, 2003.

LIMA, W.P. **Impacto ambiental do eucalipto**. São Paulo: EDUSP, 1993. 251p.

LITTON, C.M.; RAICH, J.W.; RYAN, M.G. Carbon allocation in forest ecosystems (review article). **Global Change Biology**, Oxford, v. 13, p. 2089-2109, 2007.

LU, P.; URBAN, L.; PING Z. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. **Acta Botanica Sinica**, Beijing, v. 46, n.6, p.631-646, 2004.

MARRICHI, A.H.C. **Caracterização da capacidade fotossintética e da condutância estomática em sete clones comerciais de *Eucalyptus* e seus padrões de resposta ao déficit de pressão de vapor**. 2009. 104p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

MARIN, F.R. **Evapotranspiração e transpiração máxima em café adensado**. 2003. 134p. Tese (Doutorado em Física do ambiente agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

MARENCO, R.A.; LOPES, N.F. **Fisiologia vegetal: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral**. Viçosa: Artmed, 2005. 451 p.

MARSHAL, D.C. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. **Plant Physiology**, Rockville, v.33, n.6, p.385-396, 1958.

MENEZES, L.N. ; SILVA, D.C. ; PINNA, G.F.A.M. **Anatomia vegetal**. Viçosa : UFV, 2003. p. 303-325.

MEDEIROS, A.T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE**. 2002. 120p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MIELKE, M.S. **Regulação fisiológica e ambiental das trocas gasosas num plantio clonal de híbridos de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden**. 1997. 92 p. Tese (Doutorado em Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. **Symposium of the Society for Experimental Biology**, Swansea, v.19, p. 205–234, 1965.

NETO, C.J.G. **Calibração do uso de fotos hemisféricas, do LAI – 2000 e do Ceptômetro para a estimativa do índice de área foliar em plantações de eucalipto**. 2007. 58p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

NGUGI, M.R.; HUNT, D.D.; DOLEY, D.; RYAN, P.; DART, P. Selection of species and provenances for low-rainfall areas: physiological responses of *Eucalyptus cloeziana* and *Eucalyptus argophloia* to seasonal conditions in subtropical Queensland. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 141-156, 2004.

OLBRICH, B.W.; LE ROUX, D.; POUTER, A.G; BOND, W.J.; STOCK, W.D. Variation in water use efficiency and  $\delta^{13}\text{C}$  levels in *Eucalyptus grandis* clones. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.150, p.615-633, 1993.

PEREIRA, A.R.; PEREIRA, F.A.C; MAGGIOTTO, S.R.; VILLA NOVA, N.A.; FOLLEGATTI, M.V. Penman-Monteith reference evapotranspiration in a tropical climate. **Conference on Agricultural and Forest Meteorology**, Albuquerque, v.23, p.2-12, 1998.

PERES, J.G. **Avaliação do modelo de Penman-Monteith, padrão FAO, para estimar a evapotranspiração de referência nas condições climáticas do Estado de São Paulo**. 1994. 116p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

RICKLEFS, R.E.; MILLER, G.L. **Ecology**. New York: Freeman, 2000. 822p.

ROBERTS, J.M.; ROSIER, P.T.W. Physiological studies in young *Eucalyptus* stands in southern India and derived estimates of forest transpiration. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.24, p.103-118, 1993.

SARMIENTO, G.; GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F. Adaptative strategies of woody species in neotropical savanas. **Biological Review**, v.60, p.315-355, 1985.

SENTELHAS, P.C. **Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática**. 1998. 97p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

SCHULZE, E.D; HALL, A.E. Stomatal responses, water loss and CO<sub>2</sub> assimilation rates of plants in contrasting environments. **Physiological Plant Ecology**, Berlin, v. 12B, p. 181-230, 1982.

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. **Floresta**, Curitiba, v.34 n.3, p.325-335, 2004.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 54p.

SMITH, D.M.; ALLEN S.J. Measurement of sap flow in plant stems. **Journal Experimental Botany**, Oxford, v. 47, p.1833-1844, 1996.

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**, Amsterdam, v. 253, p. 130-147, 2001.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. **Fatos e números do Brasil Florestal-2007**. Disponível em: < <http://www.sbs.org.br/FatoseNumerosdoBrasilFlorestal.pdf> >. Acesso em: 23 set. 2009.

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

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, v. 25, p.35-41, 2004b.

SWANSON, R.H.; WHITFIELD, D.W.A. A numerical analysis of heat-pulse velocity theory and practice. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.32, p.221–239, 1981.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. **Climatology**, Centerton, v.8, n.1, p.104, 1955.

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

VERTESSY, R.A.; BENYON, R.G.; O’SULLIVAN, S.K.; GRIBBEN, P.R. Relationship between stem diameter, sapwood area, leaf area and transpiration in a young mountain ash forest. **Tree Physiology**, Victoria, v.15, p. 559-567, 1995.

WAGNER, W.; GAWEL, J.; FURUMAI, H.; SOUZA, M.P.; TEIXEIRA, D.; RIOS, L.; OHGAKI, S.; ZEHNDER, J.B.; HEMOND, H.F.; Sustainable Watershed Management: An International Multi-Watershed Case Study. **AMBIO: A Journal of the Human Environment**, Washington, v. 31, p. 2-13, 2002.

WHITEHEAD, D.; BEADLE, C.L. Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p.113-140, 2004.

WRIGHT, I. J.; REICH, P.B.; WESTOBY, M.; ACKERLY, D.D.; BARUCH, Z.; BONGERS, F.; CAVENDER-BARES, J.; CHAPIN, T.; CORNELISSEN, J. H.C.; DIEMER, M.; FLEXAS, J.; GARNIER, E.; GROOM, P.K.; GULIAS, J.; HIKOSAKA, K.; LAMONT, B.B.; LEE, T.; LEE, W.; LUSK, C.; MIDGLEY, J.J.; NAVAS, M.; NIINEMETS, U.; OLEKSYN, J.; OSADA, N.; POORTER, H.; POOT, P.; PRIOR, L.; PYANKOV, V.I.; ROUMET, C.; THOMAS, S.C.; TJOELKER, M.G.; VENEKLAAS, E.J. ; VILLAR, R. The worldwide leaf economics spectrum. **Nature International Weekly Journal of Science**, London, v.428, p.821-827, 2004.

XAVIER, A.C; SOARES, J.V.; ALMEIDA A.C. Variação do índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. **Revista Árvore**, Viçosa, v.26, n.4, p. 421-427, 2002.

ZHANG, H.; SIMMONDS, L.; MORISON, J.I.L; PAYNE, D. Estimation of transpiration by single trees: comparison of sap flow measurements with combination equation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.87, p. 155-169, 1997.