

ANDRÉ QUINTÃO DE ALMEIDA

**DINÂMICA HÍDRICA EM MICROBACIAS CULTIVADAS COM EUCALIPTO
E PASTAGEM NO LESTE DE MINAS GERAIS**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2012

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

T

A447d
2012

Almeida, André Quintão de, 1982-

Dinâmica hídrica em microbacias cultivadas com eucalipto e
pastagem no leste de Minas Gerais / André Quintão de
Almeida. – Viçosa, MG, 2012.

xii, 77f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Aristides Ribeiro.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 71-77

1. Recursos hídricos - Minas Gerais. 2. Eucalypto -
Aspectos econômicos. I. Universidade Federal de Viçosa.

II. Título.

CDD 22. ed. 630.25148

ANDRÉ QUINTÃO DE ALMEIDA

**DINÂMICA HÍDRICA EM MICROBACIAS CULTIVADAS COM EUCALIPTO
E PASTAGEM NO LESTE DE MINAS GERAIS**

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

APROVADA: 24 de fevereiro de 2012.



Fernando Palha Leite



Alexandre Cândido Xavier



Nairam Félix de Barros



Welliam Chaves Monteiro da Silva



Aristides Ribeiro
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois sem Ele, nada seria possível.

Ao meu pai, José Domingos, pelo exemplo de vida, pelo amor e pela dedicação.

Aos meus irmãos, Fabrício e Felipe, pelo amor incondicional.

À minha “companheira” Izabela, pelo amor, pelo incentivo e pela compreensão.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao professor Aristides Ribeiro, pela confiança, pelos ensinamentos e pela amizade construída durante todo o curso.

Ao professor Fernando Falco Pruski, pela orientação concedida na fase final do trabalho.

Ao Dr. Fernando Palha Leite, Coordenador do Setor de Pesquisa da Cenibra, pela parceria firmada e pelas valiosas contribuições ao trabalho.

À CENIBRA (Celulose Nipo-Brasileira S.A.), pelo incentivo à pesquisa, pela disponibilização de sua área de recursos financeiros e humanos, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

À Capes, pela concessão da bolsa de estudos.

Aos técnicos, funcionários e prestadores de serviço da empresa CENIBRA, pela grande colaboração, imprescindível para a execução deste trabalho.

A todas as pessoas com as quais convivi em Viçosa, pela amizade e pelo acolhimento.

Ao professor Pezzopane, por ter incentivado minha vida acadêmica durante a graduação.

A todos que, mesmo não sendo citados, contribuíram de forma efetiva na construção deste trabalho.

À Maria Luzia Quintão de Almeida (mamãe) e a Carlos Alberto Martinelli de Souza (Sassa), *in memoriam*.

BIOGRAFIA

ANDRÉ QUINTÃO DE ALMEIDA, filho de José Domingos Aparecido de Almeida e Maria Luzia Quintão de Almeida, natural de Vila Velha, Espírito Santo, nasceu no dia 1.º de maio de 1982.

Em abril de 2005, concluiu o curso de graduação em Engenharia Florestal na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Em julho de 2007, obteve o título de Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Em março de 2008, iniciou o curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Meteorologia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, MG, submetendo-se à defesa de tese em fevereiro de 2012.

Em 2011, ingressou na carreira de magistério superior, na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), unidade acadêmica de Serra Talhada (UAST).

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	vi
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	5
2.1. Objetivo geral.....	5
2.2. Objetivos específicos.....	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1. Balanço hídrico em microbacias hidrográficas.....	6
3.2. Transpiração e resistência estomática.....	7
3.3. Intercepção da precipitação pluvial.....	9
3.4. Vazão dos cursos d'água.....	11
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
4.1. Localização das microbacias.....	12
4.2. Características físicas e do uso da terra.....	13
4.3. Características culturais.....	15
4.4. Medidas hidrometeorológicas.....	16
4.4.1. Medidas meteorológicas.....	16
4.4.2. Medidas hidrológicas.....	17
4.4.3. Período de coleta dos dados hidrometeorológicos.....	18
4.5. Medidas fisiológicas.....	19
4.5.1. Resistência estomática (r_s).....	19
4.5.2. Índice de área foliar (IAF).....	20
4.6. Evapotranspiração real.....	20
4.7. Evapotranspiração potencial (ET_0).....	21
4.8. Modelagem da resistência estomática e estimativa da transpiração.....	23
4.8.1. Modelagem da resistência estomática.....	23
4.8.2. Estimativa da transpiração.....	23
4.8.3. Fator de desacoplamento.....	24
4.8.4. Transpiração modelada X evapotranspiração real.....	24
4.9. Estimativa da evaporação do solo e da intercepção da precipitação pluvial.....	25
4.9.1. Evaporação do solo.....	25

4.9.2. Estimativa da interceptação da precipitação pluvial	26
4.10. Estudo das vazões e análise do escoamento superficial.....	27
4.10.1. Análise das vazões.....	27
4.10.2. Análise do escoamento superficial	28
4.10.3. Evapotranspiração das microbacias.....	29
4.11. Modelagem do balanço hídrico.....	30
4.12. Análise do modelo de balanço hídrico de água no solo.....	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
5.1. Modelagem da resistência estomática e estimativa da transpiração	35
5.1.1. Modelagem da resistência estomática	35
5.1.2. Estimativa da transpiração.....	39
5.1.3. Transpiração modelada x evapotranspiração real.....	43
5.2. Evaporação do solo e estimativa da interceptação da precipitação pluvial	46
5.2.1. Evaporação do solo.....	46
5.2.2. Modelagem da interceptação da precipitação pluvial	47
5.3. Estudo das vazões	52
5.3.1. Caracterização da precipitação pluvial.....	52
5.3.2. Evapotranspiração das microbacias.....	53
5.3.3. Estudo das vazões e do escoamento superficial	54
5.4. Modelagem do balanço hídrico.....	59
5.4.1. Condições meteorológicas.....	59
5.4.2. Componentes do balanço hídrico	62
5.4.2.1. Período entre janeiro e dezembro de 2009.....	62
5.4.2.2. Período entre janeiro e dezembro de 2010.....	64
5.4.2.3. Período total de análise	66
6. CONCLUSÕES	70
REFERÊNCIAS.....	71

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
α	Albedo da superfície	%
Δ	Calor latente de evaporação da água	MJ kg^{-1}
γ	Coefficiente psicrométrico	$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$
β	Razão de Bowen	adm
τ	Transmissividade da atmosfera	adm
Ω	Fator de desacoplamento	adm
Θ	Volume de água no solo	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$
ADS	Água disponível no solo	mm
alt	Carga hidráulica	m
Arm	Armazenamento de água no solo	mm
Boc	Saldo de radiação de ondas curtas	$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Bol	Saldo de radiação de ondas longas	$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
CAD	Capacidade máxima de água disponível	mm
Cc	Capacidade de campo	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$
CE	Coefficiente de escoamento	adm
C_p	Calor específico do ar seco	$\text{MJ kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$
C_d	Coefficiente de descarga para o vertedor triangular	adm
D_{ef}	Deflúvio	mm
DPV	Déficit de pressão de vapor	kPa
D_{prof}	Drenagem profunda	mm
e_a	Pressão de vapor do ar	kPa
E_{sup}	Escoamento superficial	mm
ET_r	Evapotranspiração real	mm
ET_0	Evapotranspiração de referência	mm
E_{solo}	Evaporação solo	mm
E_{sub}	Escoamento subterrâneo	mm
g	Aceleração da gravidade	m s^{-2}
G	Fluxo de calor no solo	$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
IAF	Índice de área foliar	m m^{-1}

I	Interceptação da precipitação pluvial	mm
K _c	Coefficiente de Compacidade	adm
L	Fluxo de calor latente de evaporação	MJ m ⁻² d ⁻¹
MECI	Microbacia eucalipto comercial I	adm
MECII	Microbacia eucalipto comercial II	adm
MPDI	Microbacia pastagem degradada I	adm
MPDII	Microbacia pastagem degradada II	adm
P _e	Perímetro da bacia	km
P	Precipitação pluvial	mm
P _{mP}	Ponto de murcha permanente	mm
P _S R	Profundidade do sistema radicular	cm
Q	Vazão	L s ⁻¹
q	Vazão específica	L s ⁻¹ km ⁻²
r _a	Resistência aerodinâmica	s m ⁻¹
r _s	Resistência estomática	s m ⁻¹
r _{solo}	Resistência do solo	s m ⁻¹
R _g	Irradiação solar global	MJ m ⁻² h ⁻¹
R _n	Saldo de radiação	MJ m ⁻² h ⁻¹
R _{nsolo}	Saldo de radiação que chega na superfície do solo	MJ m ⁻² h ⁻¹
t _{med}	Temperatura média	°C
T	Transpiração do dossel	mm

RESUMO

ALMEIDA, André Quintão de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2012. **Dinâmica hídrica em microbacias cultivadas com eucalipto e pastagem no leste de Minas Gerais**. Orientador: Aristides Ribeiro. Coorientadores: Fernando Falco Pruski e José Eduardo Macedo Pezzopane.

O número de novos plantios comerciais de eucalipto vem aumentando consideravelmente em regiões tropicais. Só no Brasil, a área plantada é de aproximadamente 4,5 milhões de hectares, correspondendo a 0,5% do território nacional. Extensas áreas de pastagem e outras culturas estão sendo substituídas por plantios florestais desta espécie. Toda mudança de uso do solo provoca alterações no balanço de energia e de água, no entanto, ainda não se conhece, no Brasil, o impacto desta expansão (pastagem → eucalipto) sobre o uso e disponibilidade de água nas bacias de drenagem onde são plantadas. Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar os efeitos de plantios comerciais de eucalipto e de pastagem sobre os principais componentes do balanço hídrico em microbacias hidrográficas. O trabalho foi realizado entre os anos de 2009 e 2010 em quatro microbacias localizadas no leste de Minas Gerais, duas cultivadas com plantios comerciais de eucalipto e duas com solos degradados sob pastagem. As florestas são compostas por híbridos de eucalipto *grandis* x *urophylla* aos sete anos de idade. As microbacias com pastagem são cultivadas com *Brachiaria decumbens* há mais de 30 anos. Os dados micrometeorológicos foram coletados por sensores instalados em torres no interior das microbacias. A vazão do curso d'água foi medida por um linígrafo do tipo Thalimedes instalado em um vertedouro triangular na saída de cada microbacia. As medidas fisiológicas das culturas foram realizadas com o auxílio do analisador de gases no infravermelho. O estudo da vazão foi realizado no período de um ano (2010), com base na vazão específica mínima diária ($q_{95\%}$), média diária ($q_{\text{média}}$) e na máxima instantânea ($q_{\text{máx}}$) ocorrida a cada cinco minutos. O escoamento superficial foi analisado a partir dos valores de lâmina total escoada no ano e do coeficiente de escoamento superficial (CE), dado pela relação entre o total escoado e precipitado no ano. A modelagem do balanço hídrico foi realizada na escala diária, considerando como a principal entrada de água a precipitação pluvial e as principais saídas a evapotranspiração, a lâmina de escoamento superficial e a drenagem profunda. A evapotranspiração da microbacia foi estimada pelo total transpirado pela

cultura (eucalipto ou pastagem), pela evaporação do solo, pela interceptação da precipitação pluvial por parte do dossel vegetal (eucalipto ou pastagem) e pela evapotranspiração da área de vegetação nativa (Mata Atlântica). A transpiração foi estimada pela equação de Penman-Monteith modificada pela resistência estomática do dossel (r_s). A evaporação do solo no eucalipto foi calculada a partir da equação original de Penman-Monteith com a condutância do solo (r_{solo}) diminuindo rapidamente quando a disponibilidade de água no solo cai. A interceptação da precipitação pluvial no eucalipto foi estimada pela diferença entre o total evapotranspirado, dado pelo método da razão de Bowen (β), e a transpiração mais a evaporação do solo. Na pastagem, a interceptação da precipitação pluvial mais a evaporação do solo foram estimadas pela diferença entre o total evapotranspirado, dado pelo método da razão de Bowen, e a transpiração. A evapotranspiração da área de mata nativa foi estimada pela equação original de Penman-Monteith com coeficiente de cultura (k_c) igual a um. A lâmina de escoamento superficial foi individualizada diretamente da lâmina total escoada no curso d'água. A drenagem profunda foi estimada a partir do modelo do balanço hídrico nos períodos com excesso de água no solo. O desempenho do modelo de balanço hídrico foi avaliado pela água disponível no solo medidos em campo pelo método gravimétrico e da sonda de nêutrons. O valor médio anual interceptado da precipitação pluvial pela cultura de eucalipto foi de 10%, enquanto a soma do interceptado da precipitação pluvial mais o evaporado do solo sob a pastagem, foi de 11%. O total evapotranspirado nas microbacias com eucalipto foi superior em aproximadamente 15% em relação às microbacias com pastagem. As variações sazonais de água disponível no solo, estimadas pelo modelo do balanço hídrico foram semelhantes às medidas em campo. No geral, as vazões analisadas ($q_{95\%}$, $q_{\text{média}}$ e $q_{\text{máx}}$) foram superiores nas microbacias com pastagem, indicando um maior potencial de produção de água (\uparrow vazões mínimas) e menor conservação do solo (\uparrow vazões máximas). Nestas microbacias, as vazões mínimas estão associadas principalmente com o baixo consumo de água pela vegetação e as vazões máximas, com os elevados valores de escoamento superficial, entre outros fatores. Em uma microbacia com eucalipto as vazões foram regularizadas, com a menor variação encontrada entre as vazões mínimas e máximas relacionadas com as características do dossel vegetal e as características físicas do solo, como a elevada taxa de infiltração estável de água no solo. Pode-se concluir que, apesar das maiores taxas de infiltração de água no solo, nas microbacias cultivadas com eucalipto há uma menor

produção potencial de água em relação às microbacias com pastagem, havendo, no entanto, uma maior conservação dos solos nestas áreas.

ABSTRACT

ALMEIDA, André Quintão de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2012. **Water dynamics in cultivated watersheds with eucalyptus and pasture in eastern Minas Gerais.** Adviser: Aristides Ribeiro. Co-advisers: Fernando Falco Pruski and José Eduardo Macedo Pezzopane.

The number of new commercial eucalyptus plantations has increased considerably in tropical regions. In Brazil alone the planted area is approximately 4.5 million hectares, accounting for 0.5% of the national territory. Extensive areas of pasture and other crops are being replaced by plantations of this species. Any change in land use may cause changes in energy and water balance, however in Brazil the impact of this expansion (pasture → eucalyptus) is not yet known on the use and availability of water in the watersheds where they are planted. Therefore, the main objective of this study was to evaluate the effects of commercial eucalyptus plantations and pasture on the main components of the water balance in watersheds. The study was conducted between 2009 and 2010 in four watersheds located in eastern Minas Gerais, Brazil, with two grown commercial plantations of eucalyptus and two of degraded soil under pasture. Planted forests were composed of seven years old hybrid eucalyptus *grandis* x *urophylla*. The pastures located in the watersheds were cultivated with *Brachiaria decumbens* for over 30 years. Micrometeorological data was collected by sensors installed on towers within the watersheds. Water flow rate was measured by a Thalimedes installed in a triangular spillway at the outlet of each watershed. Physiological measurements of the cultures were performed with the aid of an infrared gas analyzer. The study of water flow was performed within one year (2010), based on minimum daily specific flow ($q_{95\%}$), daily average ($q_{\text{média}}$) and instantaneous maximum ($q_{\text{máx}}$) every five minutes. Runoff was analyzed based on values of total depth for the year and the runoff coefficient (EC), given by the ratio between total runoff and precipitate during the year. Modeling of the water balance was performed daily, considering precipitation as the main water inlet and evapotranspiration, runoff depth and drainage depth as the main outputs. Evapotranspiration in the watershed was estimated by the total transpired by the crop (eucalyptus or pasture), by evaporation from the soil, interception of rainfall by the plant canopy (eucalyptus or pasture) and evapotranspiration of the area of native vegetation (Atlantic Rainforest). Transpiration was estimated by the Penman-Monteith

equation modified by canopy stomatal resistance (r_s). Soil evaporation in eucalyptus was calculated from the original Penman-Monteith equation with the conductance of the soil (r_{soil}) decreasing rapidly when availability of water in the soil declines. The interception of rainfall by eucalyptus was estimated by the difference between the total evapotranspired given by the Bowen ratio method (β), and transpiration plus soil evaporation. In the pasture, interception of rainfall plus soil evaporation was estimated by the difference between the total evapotranspired given by the Bowen ratio method and transpiration. Evapotranspiration of the native forest was estimated by the original Penman-Monteith equation with crop coefficient (k_c) equal to one. Runoff depth was individualized directly from the total flow depth of the waterway. Drainage depth was estimated from the water balance model in periods with excess water in the soil. The performance of the water balance model was then evaluated by water availability in the soil, measured by the gravimetric method and neutron probe. Average annual rainfall intercepted by the crop of eucalyptus was 10%, while the sum of intercepted rainfall plus that evaporated from the soil in the pasture was 11%. Total evapotranspiration in watersheds with eucalyptus was approximately 15% higher when compared to watersheds with pasture. Seasonal variations of water available in the soil, estimated by the water balance model, were similar to those measured in the field. Overall, the flows analyzed ($q_{95\%}$, $q_{média}$ and $q_{máx}$) were higher in watersheds with pasture, indicating a greater potential for water production (\uparrow minimum flows) and reduced soil conservation (\uparrow maximum flows). In these watersheds the minimum flows are mainly associated with low water consumption by vegetation and maximum flows, with high runoff values, among other factors. In one watershed with eucalyptus the flow rates were regulated, with minor variations found between the minimum and maximum flows related to the characteristics of the plant canopy and physical characteristics of the soil, such as a high rate of stable water infiltration in the soil ($>100 \text{ mm h}^{-1}$). It can be concluded that although there were higher rates of water infiltration into the soil, in watersheds cultivated with eucalyptus there is less potential production of water in relation to the watershed with pasture, however soil retention in these areas was increased.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, e em outras regiões de clima tropical, o número de plantios comerciais de espécies florestais de crescimento rápido vem aumentando consideravelmente (DRIGO, 2005). Este aumento é um reflexo da diminuição das áreas de florestas tropicais naturais (ACHARD et al., 2002) e do aumento da demanda global por produtos madeireiros com certificação de origem, como fibras e energia.

Mais de 20 milhões de hectares das terras cultivadas com plantios florestais no planeta são de eucalipto (GIT FORESTRY CONSULTING'S BLOG, 2010), o que corresponde a 10% da área florestal plantada no mundo. A taxa anual de novos plantios desta espécie é de cerca de 3 milhões de hectares (EVANS; TURNBULL, 2004; SCOTT et al., 2005).

Aproximadamente 4,5 milhões de hectares das terras brasileiras estão cobertas com eucalipto, o equivalente a 0,5% do território nacional (SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA – SBS, 2010). Segundo o Ministério da Agricultura, a área cultivada com esta espécie aumenta anualmente cerca de 300 mil hectares, tornando o Brasil a segunda maior nação com plantios de eucalipto no mundo. Entretanto, a área cultivada com plantios desta espécie ainda é menor do que a de outras culturas agrícolas existentes no país (Tabela 1).

Tabela 1 - Área total aproximada das principais culturas agrícolas cultivadas no Brasil

Cultura	Área (milhões hectares)
Pastagens	177
Soja	16
Milho	12
Cana-de-açúcar	5
Feijão	4
Arroz	3
Café	2
Eucalipto	4

Fonte: Adaptado de Silva (2003).

Entre os estados brasileiros, Minas Gerais apresenta a maior área plantada, com aproximadamente 1,3 milhões de hectares das terras ocupadas com eucalipto (ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA – AMS, 2011). Para os próximos anos, o planejamento agrícola 2012/2015 do governo do estado prevê um investimento na silvicultura mineira de R\$ 180 milhões em parceria com o banco do Nordeste. Neste planejamento já está previsto para o ano de 2012 um aumento da área plantada com eucalipto em 30 mil hectares (AMS, 2012).

A bacia hidrográfica do rio Doce de Minas Gerais apresenta um grande e crescente número de plantios florestais de eucalipto. Além dos incentivos por parte do governo, estão previstos para os próximos anos investimentos de novas empresas do setor florestal e a expansão de empresas do setor já existentes. Como nesta bacia, a maior porcentagem (95%) de ocupação das terras é por pastagem (Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC), espera-se, que os novos plantios florestais sejam realizados em áreas anteriormente cultivadas com pasto.

Toda mudança de uso da terra promove alterações nos balanços de energia e da água. Podem ser destacadas modificações na radiação solar refletida pela superfície (albedo), na capacidade de infiltração da água no solo, na interceptação da precipitação pluvial, nas taxas de evapotranspiração e na disponibilidade e qualidade da água dos cursos d'água.

O total evapotranspirado em uma bacia hidrográfica agrícola está diretamente relacionado com o manejo e as práticas agrícolas adotados (espaçamento do plantio, irrigação etc.), além das características fisiológicas das culturas vegetais existentes (profundidade do sistema radicular, condutância estomática, eficiência quântica, etc.). Com a substituição de áreas de pastagem por floresta de eucalipto, espera-se encontrar um aumento do fluxo de água para a evapotranspiração concomitante à diminuição do fluxo de água para o deflúvio nos rios (DIAZ; QUERNER, 2005; MARSIK; WAYLEN, 2006; VON STACKELBERG et al., 2007; NOTTER et al., 2007; THANAPAKPAWIN et al., 2007), comprometendo assim a disponibilidade natural da água (HIBBERT, 1967; VERTESSY, 2001; NOSETTO et al., 2011).

A hipótese supracitada acima é fundamentada na análise simplificada dos principais componentes do balanço hídrico em determinado intervalo de tempo:

$$P = ET + D_{ef} \pm \Delta Arm \quad (1)$$

em que P é a precipitação; D_{ef} , o deflúvio; ET , a evapotranspiração; e ΔArm , a variação do armazenamento da água no solo.

Considerando que a quantidade de água que entra no sistema, via precipitação, continue sendo a mesma, com o aumento da evapotranspiração, espera-se que ocorra uma diminuição no deflúvio. Estudos demonstram que o reflorestamento com eucalipto de áreas degradadas cultivadas com pastagem provoca um aumento das perdas de água por evaporação e reduz a produtividade de água (FARLEY et al., 2005; NOSETTO et al., 2005). Por outro lado, nas áreas com florestas (natural ou plantada), a combinação de sistemas de raízes profundas (CANADELL et al., 1996), alta rugosidade aerodinâmica (CALDER, 1998) e os baixos valores de albedo (JACKSON et al., 2008), lhes permitem manter altas taxas de evapotranspiração em comparação com plantas herbáceas, principalmente as pastagens (ZHANG et al., 2001).

Entretanto, em relação à disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas, sabe-se que as vazões no período de estiagem dependem da água que infiltra no solo e reabastece os aquíferos subterrâneos (BRANDÃO et al., 2009). A cobertura da floresta diminui a energia cinética das gotas da chuva, melhorando as características físicas do solo, aumentando a taxa de infiltração e o tempo de residência da água na bacia hidrográfica, regularizando com isso a vazão do curso d'água. Assim, mesmo o plantio de eucalipto apresentando um elevado consumo de água, este componente do balanço hídrico pode ser compensado por outros, como a drenagem profunda de água. Em estudo realizado por Calder (2007), foi demonstrado que a floresta foi capaz de fazer com que seus benefícios suplantassem os custos do maior consumo de água. O mesmo não acontece em solos degradados sob pastagem, os quais são desprotegidos e compactados, apresentando menor taxa de infiltração e tempo de residência da água.

Além disto, uma maior taxa de infiltração resultará em menor escoamento superficial, mecanismo responsável por processos indesejáveis, como erosão e inundações. Em estudo realizado no leste de Minas Gerais (bacia hidrográfica do rio Doce), no município de Belo Oriente, o escoamento superficial nas áreas com floresta de eucalipto foi menor do que o encontrado na pastagem (BRITO et al., 2005; SILVA et al., 2011).

Dessa forma, espera-se que, mesmo apresentando um maior consumo de água, a floresta plantada de eucalipto ofereça benefícios para a conservação de água e solo, tais como maior infiltração de água no solo, regularização de vazão e controle da erosão em microbacias cultivadas com esta espécie florestal. Estes eventos podem assegurar o

equilíbrio entre a água evapotranspirada pelo plantio e o deflúvio gerado na bacia hidrográfica. Na prática, o manejo dos plantios florestais deve encontrar um balanço sustentável entre os fluxos de saída de água garantindo a disponibilidade natural da água (FALKENMARK; FOLKE, 2002; CALDER, 2007).

Assim, partindo-se da premissa de que haja um maior consumo, via evapotranspiração, de água por parte dos plantios comerciais de eucalipto e uma maior infiltração de água nos solos cultivados com esta espécie, as principais hipóteses testadas neste estudo foram:

- Existe uma compensação da maior quantidade de água que é evapotranspirada pelo plantio de eucalipto pela água que é infiltrada no solo de microbacias cultivadas com esta espécie?
- Esta água infiltrada regulariza a vazão no curso d'água, diminuindo as vazões máximas e assegurando a vazões mínimas no período de estiagem?

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Analisar os efeitos de plantios comerciais de eucalipto e de pastagem sobre os principais componentes do balanço hídrico em microbacias hidrográficas localizadas no leste de Minas Gerais.

2.2. Objetivos específicos

- Modelar a condutância estomática de árvores adultas de eucalipto e de pastagem em função da temperatura e do déficit de pressão de vapor do ar, e a irradiância solar; e estimar a transpiração em plantios comerciais de eucalipto e pastagem;
- Estimar e ajustar modelos de interceptação da precipitação pluvial e da evaporação da água do solo em plantios comerciais de eucalipto e pastagem a partir da partição do processo de evapotranspiração;
- Analisar o efeito do plantio comercial de eucalipto e de pastagem nas vazões e nas lâminas de escoamento superficial em microbacias cultivadas com estas espécies;
- Modelar os principais componentes do balanço hídrico em microbacias cultivadas com eucalipto e pastagem.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Balanço hídrico em microbacias hidrográficas

O balanço hídrico quantifica os fluxos de entrada e saída de água de uma bacia hidrográfica num determinado intervalo de tempo. Os principais componentes de entrada de água na bacia hidrográfica são a precipitação, a irrigação (quando houver), o escoamento superficial e subsuperficial e o fluxo ascendente no perfil do solo. Os principais componentes de saída são a interceptação da precipitação pluvial, a evaporação do solo, a transpiração das culturas, o escoamento superficial e a drenagem profunda.

A modelagem do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica pode ser realizada no espaço de tempo diário, considerando a precipitação pluvial a única entrada de água e o processo de evapotranspiração e a drenagem profunda como as principais saídas, como segue:

$$ADS_{dia_i} = ADS_{dia_{i-1}} + P_i - T_i - E_{solo_i} - I_i - Q_{sup_i} - D_{prof_i} \quad (2)$$

em que ADS_{dia_i} é a água disponível no solo no dia i ; $ADS_{dia_{i-1}}$, a água disponível no solo no dia anterior $i-1$; P_i , a precipitação no dia i ; T_i , a transpiração da cultura no dia i ; E_i , a evaporação do solo no dia i ; I_i , a interceptação da precipitação pluvial no dia i ; Q_{sup_i} , o escoamento superficial observado no dia i ; e D_{prof_i} , a drenagem profunda no dia i ; todos em milímetros.

O cálculo do balanço hídrico é importante para fins de planejamento regional e, ou, implantação de políticas de gerenciamento dos recursos hídricos. Por meio da modelagem dos componentes do balanço de água, pode-se conhecer o rendimento hídrico de uma bacia hidrográfica, indicando seu real potencial produtivo de água. Este conhecimento é de relevante importância para o desenvolvimento de uma determinada cultura, principalmente culturas florestais. Conhecer os processos de perda de água e os componentes que atuam de forma efetiva no balanço hídrico é um instrumento de grande importância para realização de um manejo florestal adequado em microbacias com atividade silvicultural.

Diversos estudos de modelagem dos componentes do balanço hídrico em bacias hidrográficas cultivadas com plantios florestais, principalmente eucalipto, estão sendo realizados em várias partes do mundo (ZHOU et al., 2002; ALMEIDA; SOARES, 2003; LANE et al., 2004; CABRAL et al., 2010; FEIKEMA et al., 2010; MACFARLANE et al., 2010). No Brasil, Soares e Almeida (2001) modelaram os componentes do balanço hídrico em uma microbacia hidrográfica cultivada com eucalipto na costa leste do país. Facco (2008) modelou os principais componentes do balanço hídrico em uma microbacia hidrográfica cultivada com plantios comerciais de eucalipto no leste de Minas Gerais. Estes trabalhos encontraram um equilíbrio entre as principais entradas e saídas de água nas microbacias analisadas, demonstrando que o consumo de água por parte da espécie florestal não comprometeu a disponibilidade natural da água.

3.2. Transpiração e resistência estomática

A transpiração é um processo biofísico que envolve o conteúdo de água do solo, a passagem da água através da planta, a perda de água por transpiração através dos estômatos das folhas e o transporte de água na atmosfera por meio dos processos difusivos e turbulentos. A transpiração é um importante e significativo componente no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica, principalmente, para o balanço hídrico em microbacias florestais. Em estudos de modelagem do balanço hídrico em microbacias cultivadas com eucalipto a transpiração correspondeu, em geral, a 90% do total precipitado (SOARES; ALMEIDA, 2001; ALMEIDA et al., 2003).

Apesar de alta, a transpiração em plantios de eucalipto pode ser semelhante ou até menor do que em outras espécies florestais, inclusive nas formações naturais, como Mata Atlântica e Floresta Amazônica (PEREIRA et al., 2010). A cultura de eucalipto pode, inclusive, apresentar uma demanda menor de água do que outras culturas agrícolas (Tabela 2), levando em consideração o ano cronológico ou o ciclo da cultura.

Tabela 2 - Consumo de água das principais espécies agrícolas e florestal cultivadas no Brasil

Cultura	Ciclo/ano (dias)	Consumo de água - total e diário (mm)
Café (Flumignan et al., 2009)	365	1241 - 3,40 mm dia ⁻¹
Citrus (Rogers et al., 1983)	365	1210 - 3,31 mm dia ⁻¹
Eucalipto (Cabral et al., 2010)	365	1235 - 3,38 mm dia ⁻¹
Soja (Souza, 2009)	137	827 - 6,10 mm dia ⁻¹

O total transpirado por uma cultura vegetal é uma função da quantidade de água disponível no solo e da capacidade de troca gasosa entre o dossel e a atmosfera (PEREIRA et al., 1998). As trocas gasosas variam de acordo com a resistência estomática (r_s), que é inversamente proporcional à condutância estomática da folha (g_s) e à área foliar, que por sua vez está associada a fatores fisiológicos e ambientais (LANDSBERG; GOWER, 1997).

De acordo com Goldberg e Bernhor (2008), os principais fatores ambientais controladores da transpiração são a intensidade de luz, o déficit de pressão de vapor do ar (DPV) e a quantidade de água nas folhas. Na tentativa de quantificar os efeitos ambientais sobre o controle estomático nas trocas gasosas entre o dossel vegetal e a atmosfera diversos estudos foram realizados (MIELKE et al., 1999; GAO, 2000; SOUZA, 2005; THOMAS et al., 2006, PEREIRA et al., 2010). Carneiro et al. (2008) modelaram a r_s em plantios de eucalipto localizados na região leste de Minas Gerais em função da temperatura do ar, do DPV do ar e da irradiância solar global incidente. Os resultados encontrados por estes pesquisadores mostram uma forte correlação entre a r_s e os fatores meteorológicos considerados.

Vários modelos são utilizados para a estimativa da transpiração de coberturas vegetais, sendo a equação de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965) a mais empregada. Nela, o controle da resistência estomática é considerado, sendo a r_s um parâmetro de entrada no modelo. Além disso, este modelo avalia os efeitos do balanço de energia e a capacidade do ar em reter vapor de água, sendo, portanto, três os fatores controladores do processo. Outras técnicas são empregadas na estimativa da evapotranspiração, como o método micrometeorológico da razão de Bowen (BOWEN, 1926). Embora exista uma

série de limitações no emprego do método da razão de Bowen como estimador de transpiração de culturas (LIMA et al., 2005), este método tem sido amplamente empregado em diversos locais e culturas (SILVA, 2009), particularmente no Brasil.

Na tentativa de avaliar individualmente a influência dos fatores que controlam a transpiração, Jarvis e McNaughton (1986), reestruturaram a equação original de Penman-Monteith em dois componentes principais, a taxa de transpiração de equilíbrio (T_e) e a taxa de transpiração imposta (T_i). A T_e se refere à parte da equação de Penman-Monteith em que a transpiração está em função da disponibilidade de energia e não é controlada pela vegetação, ou seja, o controle da transpiração está em função da resistência aerodinâmica (r_a). Já a T_i representa a participação fisiológica da planta no processo da transpiração, através da r_s .

A contribuição da T_e e T_i é avaliada pelo coeficiente de desacoplamento (Ω). O grau de acoplamento é um indicativo da habilidade de troca de momentum, energia e massa entre o dossel da planta e a atmosfera. Os valores de Ω variam de zero a um e quanto menor for este valor, maior será a contribuição do termo T_i no cálculo da transpiração.

Geralmente, os valores de Ω são menores em espécies florestais (MIELKE et al., 1999; WHITEHEAD; BEADLE, 2004; O'GRADY et al., 2008). Cabral et al. (2010) calcularam os valores de Ω em plantios de eucalipto no estado de São Paulo e encontraram valores médios no período de verão de 0,6 e no período de inverno 0,1. Já em espécies forrageiras os valores de Ω são maiores em relação à floresta. Para as condições de Piracicaba-SP, Pereira (2004) encontrou valores médios de Ω 0,83 em uma superfície gramada.

3.3. Interceptação da precipitação pluvial

A evapotranspiração (ET) em bacias hidrográficas agrícolas é composta basicamente pela transpiração (T) da cultura, evaporação direta da água no solo (E_{solo}) e da evaporação da água interceptada pela vegetação (I). A interceptação da precipitação pluvial é responsável por uma parcela significativa do total de água utilizado por uma espécie vegetal, seja ela agrícola ou florestal, podendo chegar a 30% da precipitação incidente. Em áreas com pastagem, na região da Cordilheira dos Andes, o valor total interceptado correspondeu a 31% da precipitação (ATAROFF et al., 2009). Trabalhos de revisão vêm sendo feitos em vários países e trazem diversas informações sobre a

interceptação da precipitação pluvial (DUNKERLEY, 2000; LEVIA; FROST, 2006; LLORENS; DOMINGO, 2007).

Portanto, para se chegar a uma estimativa confiável dos componentes do balanço hídrico em bacias hidrográficas, é necessário conhecer a participação da interceptação no processo de ET. No entanto, na maioria dos casos, a componente interceptação é ignorada em estudos de balanço hídrico.

A quantidade de água interceptada pela cultura está diretamente relacionada com as características da chuva e da espécie vegetal (XIAO et al., 2000; CROCKFORD; RICHARDSON, 2000). A intensidade e duração da precipitação, a arquitetura do dossel, o índice de área foliar (IAF), as características estruturais da espécie e a densidade de plantas por hectares são algumas delas. Leite (1996) verificou em plantios de eucalipto no município de Santa Bárbara, leste de Minas Gerais, uma tendência para decréscimo linear da precipitação interna quando havia maior densidade populacional, tendência esta influenciada pela maior interceptação da chuva nas parcelas onde a área útil inicial por planta era menor, ou seja, nos plantios mais adensados.

Há décadas o processo de medição da interceptação das águas das chuvas vem sendo alvo de estudo, podendo ser medido diretamente no campo ou estimado por modelos físicos, como os de Rutter e Gash (GASH; MORTON, 1978; GASH et al., 1995). Sacramento Neto (2001) realizou estudos em plantios jovens de eucalipto na região do vale do rio Doce-MG, e verificou que a interceptação pelo dossel da precipitação incidente foi na ordem de 5,7 e 13,6% nos plantios de 1 e 2 anos de idade, respectivamente. Soares & Almeida (2001) mediram a interceptação da precipitação pluvial em plantios de eucalipto aos nove anos de idade na costa leste do Brasil e verificaram que 11% do total precipitado no ano foi interceptado pela vegetação. Em plantios de eucalipto *urophylla* na região sudeste da China a porcentagem interceptada da precipitação pluvial foi de 16% (LANE et al., 2004).

Muitos trabalhos buscam encontrar uma relação empírica entre o total precipitado e a interceptação (LIMA, 1976; LIMA; NICOLIELO, 1983; SOUZA et al., 2009; SHINZATO et al., 2011). Nesta tentativa, modelos são ajustados a partir de equações de regressão, entre dois ou mais elementos do processo interceptativo. Uma das desvantagens desse tipo de método é quanto à extrapolação para outras áreas. Por ser influenciada por vários fatores, dentre eles as características da espécie, essas

equações só trazem bons resultados quando aplicadas na região para qual foram implementadas, limitando seu uso.

Uma forma de se estimar a quantidade de água interceptada pela cultura vegetal pode ser realizada através da partição dos componentes da evapotranspiração. Conhecendo o valor do total evapotranspirado, o transpirado pela cultura e o evaporado diretamente pela superfície do solo, por diferença, pode-se estimar o valor do total interceptado pela cobertura vegetal.

3.4. Vazão dos cursos d'água

A disponibilidade natural de água constitui uma das principais e mais importantes questões ambientais debatidas atualmente, sendo tema de destaque nas conferências mundiais sobre o meio ambiente e o clima. Em relação à disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica, sabe-se que as vazões dos cursos d'água dependem da água que infiltra no solo e reabastece os aquíferos subterrâneos, principalmente nos períodos de estiagem (BRANDÃO et al., 2009). A vazão de um curso d'água de uma bacia hidrográfica é definida pelo volume que escoar em uma seção transversal do curso por unidade de tempo. Vazão específica representa a vazão por unidade de área de drenagem, servindo como índice comparativo e caracterizando o potencial hídrico de bacias hidrográficas. A vazão de um curso d'água pode ser individualizada em escoamento subterrâneo e superficial. O primeiro está relacionado com a água que infiltra no solo e é disponibilizada nos cursos d'água pelo lençol freático, já o segundo, com a água que escoar sobre a superfície do solo e atinge diretamente os cursos d'água.

A dinâmica hídrica de uma bacia hidrográfica está em função das suas características geomorfológicas, da presença de obras hidráulicas em seu interior, da variabilidade climática e do tipo de cobertura do solo. Modificações da cobertura da terra provocam significativas alterações nos componentes do balanço hídrico de bacias hidrográficas, como nas taxas de transpiração e interceptação da precipitação pluvial e na vazão do curso d'água (ZHANG et al., 2001; NOSETTO et al., 2011).

Estudos demonstram que o reflorestamento de áreas degradadas cultivadas com pastagem provoca um aumento das perdas de água por evaporação e reduz a produtividade de água nas microbacias de drenagem onde são plantadas (FARLEY et al., 2005; NOSETTO et al., 2005).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Localização das microbacias

O trabalho foi realizado em quatro microbacias hidrográficas de primeira ordem segundo classificação de Horton (1945), todas afluentes do rio Doce de Minas Gerais, duas cultivadas com plantios comerciais de eucalipto (MEC) e duas com solos degradados cultivados com pastagem (MPD). As microbacias se encontram em posições topográficas distintas, localizadas na porção média (I) e alta (II) do rio Doce (Figura 1). A distância entre as MECI e II é de 40 km e entre as MPDI e II é de 55 km.

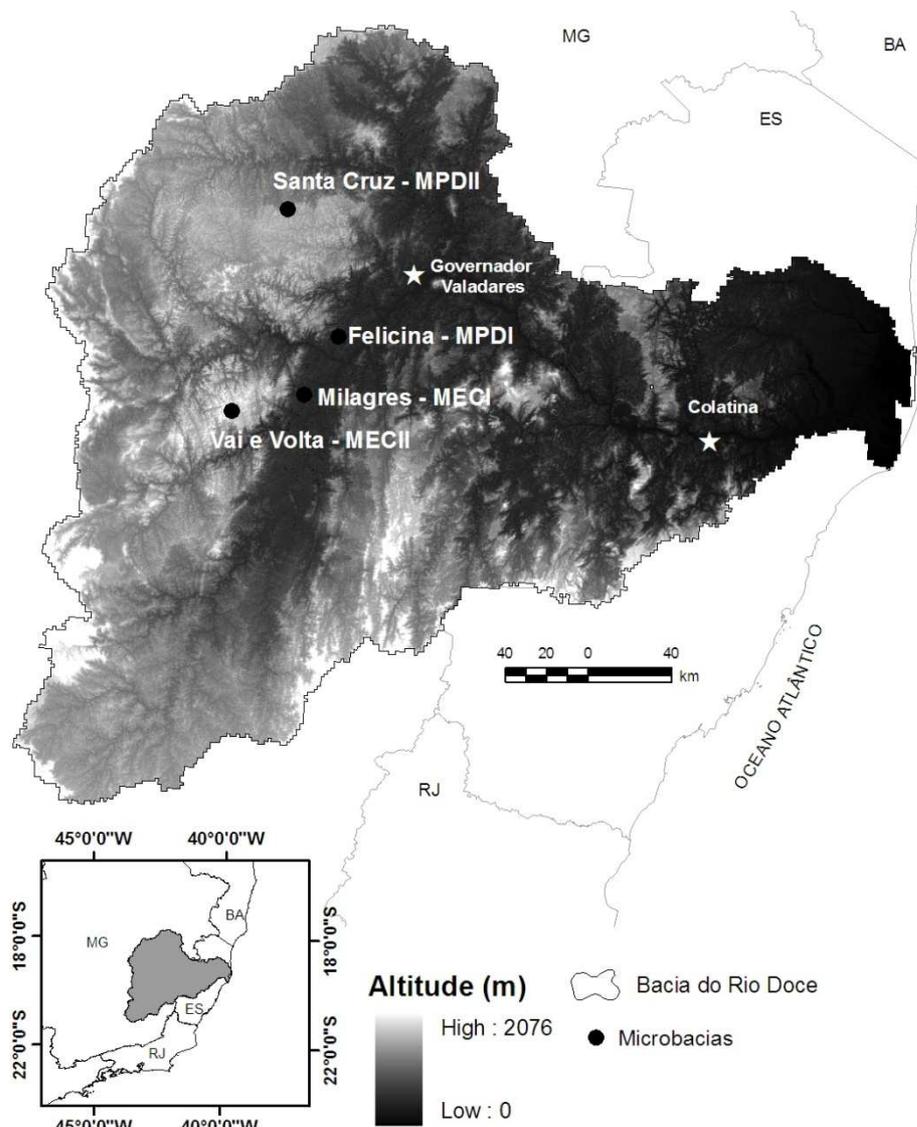


Figura 1 - Localização das microbacias hidrográficas.

A microbacia com eucalipto Milagres (MECI), com área de 12 ha, está localizada (latitude: 19°18'S, longitude: 42°22'W, altitude média: 290 m) próxima a cidade de Belo Oriente. O clima (Aw) nesta região é quente e seco, com precipitação concentrada em alguns meses do ano (novembro a fevereiro). Nesta área, o total anual médio precipitado é de 1.163 mm e os valores médios de temperatura e umidade relativa do ar são de 25,2°C e 65,2%, respectivamente.

A microbacia Vai e Volta (MECII), também ocupada com eucalipto, possui uma área de 40 ha e está localizada (latitude: 19°28'S, longitude: 42°49'W, altitude média: 975 m) próximo ao vilarejo de Cocais das Estrelas, município de Antônio Dias. Esta região é caracterizada por clima (Cwa) frio e úmido, com ocorrência de eventos de precipitação ao longo dos meses do ano. Nesta área, a precipitação média anual é de 1.281 mm e a temperatura e umidade relativa do ar anual média são de 20,3°C e 71,2%, respectivamente.

A microbacia de pastagem Felicina (MPDI), com área de 36 ha, está localizada (latitude: 18°37'S, longitude: 42°33'W, altitude média: 360 m) próximo a cidade de Açucena. Esta microbacia se encontra sob influência das mesmas condições climáticas da MECI.

A microbacia pastoril Santa Cruz (MPDII), com área de 30 ha, está localizada (latitude: 19°4'S, longitude: 42°21'W, altitude média: 864 m) nas proximidades da cidade Peçanha. O clima (Cwa) desta região é frio e úmido, com precipitação total anual média de 1.180 mm e temperatura e umidade relativa do ar média de 21°C e 72%, respectivamente.

4.2. Características físicas e do uso da terra

A Tabela 3 apresenta as principais características físicas das microbacias analisadas. Os relevos mais suaves são encontrados nas microbacias com pastagem, com declividades médias de 22 e 15%, em MPDI e MPDII, respectivamente. A MECII é a mais declivosa (42%), com relevo do tipo montanhoso, segundo a classificação da empresa brasileira de pesquisa agropecuária (EMBRAPA).

Tabela 3 - Parâmetros físicos das microbacias

Parâmetros	Microbacia			
	MECI	MECII	MPDI	MPDII
Uso da terra	Eucalipto	Eucalipto	Pastagem	Pastagem
Área - A (ha)	12	40	36	30
Perímetro - P _e (km)	1,3	2,5	2,3	1,9
Altitude média (m)	290	975	360	864
Declividade média (%)	28	42	22	15
Coefficiente de compacidade (K _c)	1,05	1,11	1,07	0,97
Tempo de concentração - t _c (min)	3,98	5,84	4,71	4,18

$k_c = 0,28 * P * \sqrt{A}^{-1}$; t_c (equação de Kirpich).

As principais classes de cobertura de uso da terra existentes nas microbacias são apresentadas na Tabela 4. As microbacias com eucalipto possuem uma maior porcentagem de reserva (Mata Atlântica) em seu interior. Contudo, apresentam elevadas porcentagens de estradas, chegando ao valor de 8% na MECI. Na microbacia com pastagem MPDII há um pequeno açude (< 0,01 ha) localizado próximo a foz da bacia.

Tabela 4 - Área e porcentagem das classes de uso da terra das microbacias

Uso (ha - %)	Microbacia			
	MECI	MECII	MPDI	MPDII
Açude	-	-	-	< 0,01 (<0,1%)
Estrada vicinal	0,9 (8%)	1,65 (4%)	0,2 (0,6%)	0,2 (1%)
Eucalipto	9,5 (79%)	31,55 (79%)	-	-
Reserva	1,6 (13%)	6,8 (17%)	0,5 (1,4%)	4,8 (15)
Pastagem	-	-	35,3 (98%)	25 (84%)
Área total	12	40	36	30

4.1. Características dos solos

As principais características físicas e texturais dos solos das quatro microbacias podem ser visualizadas na Tabela 5. O solo da MECI é do tipo Cambissolo Háplico Distrófico típico, com textura argilosa. Na MECII o solo característico é do tipo Cambissolo Háplico Distrófico Latossólico, com textura argilosa cascalhenta. A MPDI está sob um Cambissolo Háplico Distrófico Latossólico, com textura argilosa arenosa. O principal solo encontrado na MPDII é o Latossolo Vermelho Distrófico típico, de textura muito argilosa.

Tabela 5 - Análise física e textural dos solos das quatro microbacias analisadas

Parâmetro	MECI	MECII	MPDI	MPDII
Cobertura da terra	Eucalipto	Eucalipto	Pastagem	Pastagem
Tipo de solo	CXbd	CXbd	CXbd	LVd
Areia (%)	32	47	48	32
Silte (%)	12	14	10	10
Argila (%)	56	39	43	58
Densidade do solo (g cm ⁻³)	1,1	0,94	1,4	1,3
Porosidade	53	62	35	49
Taxa de infiltração estável (mm h ⁻¹)	30 ±14 A	165 ±100 B	47 ±2 A	50 ±17 A

As características físicas dos solos correspondem ao perfil de 0 a 1,5 e 0 a 0,3 metros de profundidade, nas microbacias com eucalipto e pastagem, respectivamente.

Densidade do solo (Método do anel volumétrico); Taxa de infiltração (Método do anel concêntrico)

± desvio padrão dos dados.

Médias seguidas da mesma letra na última linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.3. Características culturais

Os plantios florestais das microbacias são compostos por híbridos de eucalipto *grandis* x *urophylla* com idade de seis (2009) e sete (2010) anos. Nestas florestas, as árvores do mesmo clone foram plantadas em março e maio de 2003, nas MEC I e II, respectivamente. O espaçamento estabelecido na hora do plantio foi de 3,00 x 3,33 m, com densidade de 1000 árvores por ha. Nos talhões florestais, o controle de formigas e ervas daninha foi realizado manualmente com utilização de defensivos agrícolas.

O índice de área foliar médio das árvores é de aproximadamente 1,2 e 1,8 m² m⁻² em MEC I e II, respectivamente. O diâmetro a altura do peito (DAP) médio e a altura total média das árvores do plantio da MECI são de 15 cm e 25 m. Nos plantios da

MECII, o DAP médio e a altura média das árvores são de 19 cm e 28 m, respectivamente.

Nas microbacias com pastagem (*Brachiaria decumbens*), os cultivos foram estabelecidos após subsolagem a adubação química. Há mais de duas décadas as pastagens se destinaram ao pastoreio, sofrendo com intenso pisoteio de animais de grande porte. Nestas áreas nenhuma prática de manejo agrícola e conservação dos solos foi adotada. Assim, estes solos estão degradados e expostos a ação direta de elementos meteorológicos, como chuva e vento. O índice de área foliar médio da pastagem é de aproximadamente 1,2 e 1,1 m²m⁻², na MPDI e MPDII, respectivamente.

4.4. Medidas hidrometeorológicas

4.4.1. Medidas meteorológicas

Torres meteorológicas foram instaladas no interior das MECII, MPDI e MPDII. Na MECI, por questões de segurança, a torre meteorológica foi instalada a uma distância de 10 km. Nas microbacias com eucalipto, as torres meteorológicas eram de 35 metros e nas microbacias com pastagem de 4 metros, possibilitando a instalação dos sensores acima do dossel vegetal de cada cultura.

Sensores meteorológicos (precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento, irradiância solar e fluxo de calor no solo) foram instalados ao nível de dois metros a partir do dossel das culturas. A Tabela 6 descreve os equipamentos utilizados, os sensores e suas respectivas quantidades. Um sensor auxiliar de temperatura e umidade relativa do ar também foi instalado ao nível de quatro metros a partir do dossel das culturas das MECII e MPDII.

Os valores de fluxo de calor no solo foram estimados pela média das leituras de dois sensores instalados a 5 cm de profundidade no solo. Nas microbacias com eucalipto, um sensor de fluxo de calor no solo foi instalado na linha e outro na entrelinha do plantio.

Os sensores foram conectados a um *Datalogger* CR1000 para realizar o armazenamento dos dados coletados. As medidas meteorológicas foram realizadas a cada uma hora, fornecendo os totais precipitado, de irradiância solar e fluxo de calor no solo, e as médias de temperatura e umidade relativa do ar e de velocidade do vento.

Todo sistema de registro de dados foi alimentado por um painel solar conectado a uma bateria de 700 mA e 12V.

Tabela 6 - Descrição dos sensores, equipamentos, quantidades e níveis de coleta dos dados meteorológicos

Sensor/equipamento	Quantidade	Nível (m)	Modelo
Pluviômetro	2 unidades	2	TB3 CS700-L
Anemômetro	2 unidades	2	03001-5
Radiação solar global	2 unidades	2	CS300L
Temperatura e umidade relativa do ar	4 unidades	2 e 4	HMP45C
Fluxo de calor no solo	3 unidades	0,05 (profundidade)	HFT3 Vaisala

4.4.2. Medidas hidrológicas

Uma barragem com vertedor triangular, com abertura de 45°, foi instalada na saída de cada microbacia (Figura 2). A medida da vazão do curso d'água foi realizada com o auxílio de um linígrafo do tipo Thalimedes da marca OTT. As medidas de carga hidráulica (altura da lâmina d'água) eram armazenadas a cada cinco minutos. Posteriormente, em laboratório, os valores eram convertidos em vazão (Q) a partir da seguinte equação abaixo:

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \left(\tan \frac{45}{2} \right) alt^{5/2} \quad (3)$$

em que Q é a vazão em L s⁻¹; *alt*, a carga hidráulica (m); C_d, o coeficiente de descarga (0,797377); e g, a gravidade (m s⁻²); e 45, o ângulo de abertura do vertedouro.



Figura 2 - Barragem com vertedouro triangular com abertura de 45° instalado na microbacia Vai e Volta (MECII).

4.4.3. Período de coleta dos dados hidrometeorológicos

As Tabelas 7 e 8 apresentam o cronograma de coleta dos dados hidrometeorológicos e as falhas ocorridas durante o experimento de cada microbacia, nos anos de 2009 e 2010.

Tabela 7 - Cronograma de coleta dos dados hidrometeorológicos das microbacias em 2009

Medidas/Microbacia	Meses de 2009					
	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12
Meteorológica						
MECI	X	X	X	X	X	X
MECII	X	X	X	X	X	X
MPDI				X	X	X
MPDII		X	X	X	X	X
Hidrológica						
MECI		X	X	X	X	X
MECII	X	X	X	X	X	X
MPDI				X	X	X
MPDII		X*	X	X	X	X*

MEC – Microbacia eucalipto; MPD – microbacia pastagem; I – parte média do rio Doce; II – parte alta do rio Doce. * Falha na coleta dos dados em parte do período.

Tabela 8 - Cronograma de coleta dos dados hidrometeorológicos das microbacias em 2010

Medidas / Microbacia	Meses de 2010					
	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12
Meteorológica						
MECI	X	X	X	X	X	X
MECII	X	X	X	X	X	X
MPDI	X	X	X	X	X	X
MPDII	X	X	X	X	X	X
Hidrológica						
MECI	X	X	X	X	X	X
MECII	X	X	X	X	X	X
MPDI	X*	X	X	X	X	X
MPDII	X	X	X	X	X	X

MEC – microbacia eucalipto; MPD – microbacia pastagem; I – parte média do rio Doce; II – parte alta do rio Doce. * Falha na coleta dos dados em parte do período.

4.5. Medidas fisiológicas

4.5.1. Resistência estomática (r_s)

As medidas de resistência estomática (r_s) das folhas de eucalipto e de pastagem foram realizadas apenas nas MECII e MPDII. As medidas de r_s das folhas completamente expandidas e próximas da parte média da copa das árvores de eucalipto e das folhas da pastagem foram realizadas com o auxílio do analisador de gases no infravermelho modelo LCPro+ (ADC, UK) (Figura 3).

Na espécie florestal, o acesso à copa das árvores para realizar as medidas de condutância, foi feito pela torre meteorológica. A r_s foi medida diretamente e aleatoriamente a cada hora, em três folhas de quatro árvores circunvizinhas à torre. O valor horário de r_s corresponde à média destas leituras. As campanhas foram realizadas nos dias 22 e 23 de setembro de 2005 e 8 e 9 de fevereiro de 2006, das 9 às 17 horas.

Na pastagem, os valores horários de r_s corresponderam à média de cinco leituras aleatórias e consecutivas nas folhas de três diferentes plantas. As coletas foram realizadas nos dias 06 e 07 de maio de 2010, das 9 às 17 horas.



Figura 3 - Fotografia do aparelho analisador de gases do infravermelho (IRGA) constituído pela câmara foliar.

4.5.2. Índice de área foliar (IAF)

A estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) dos plantios florestais e da pastagem das respectivas microbacias foi realizada com o analisador de dossel LAI-2000 (Licor, Lincoln, Nebraska, USA). A área foliar corresponde à média de 10 leituras consecutivas abaixo da cobertura vegetal. As estimativas foram realizadas sempre ao amanhecer ou ao por do sol, períodos do dia com irradiância solar difusa. Maiores detalhes sobre a estimativa dos valores de IAF na área de estudo podem ser encontrados em Paiva (2009).

4.6. Evapotranspiração real

A evapotranspiração real (ET_r) foi estimada pelo método micrometeorológico da razão de Bowen (β), pela relação entre a energia gasta na evapotranspiração e o calor latente de evaporação, obtida pela equação abaixo:

$$ET_r = \frac{LE}{\lambda} \quad (4)$$

em que LE é o fluxo de calor latente (MJ kg^{-1}); λ , o calor latente de evaporação (MJ kg^{-1}).

O componente LE foi obtido por meio da β , assumindo que exista igualdade nos coeficientes de transporte turbulento (ARYA, 1998), como segue:

$$LE = \frac{(R_n - G)}{(1 - \beta)} \quad (5)$$

Em 1926, Bowen (1926) estabeleceu a relação entre o calor sensível (H) e latente (λE) como forma de estudar a partição de energia disponível no sistema, que por ser dada por:

$$\beta = \gamma \frac{\Delta t}{\Delta e_a} \quad (6)$$

em que Δt e Δe_a são as diferenças de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e pressão de vapor d'água atual (kPa) entre os dois níveis de altura e γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Diferentes critérios são utilizados para a eliminação de dados não confiáveis deste método (Unland et al., 1996; Perez et al. 1999), como valores de β iguais a -1, menores de -0,75 e entre -0,7 e 0,7. Os valores horários de β considerados consistentes neste estudo foram: $\beta > -0,75$ e $\neq -1$.

4.7. Evapotranspiração potencial (ET_0)

A evapotranspiração potencial foi estimada pela equação original de Penman-Monteith:

$$\lambda T = \frac{s(Rn - G) + M\rho_a c_p DPV / (208 / v)}{s + \gamma(1 + 0,34v)} \quad (7)$$

em que T é a transpiração (mm h^{-1}); s, a declividade da curva de pressão de saturação do ar à temperatura do ar t ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); R_n , o balanço de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$); G, o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$); M, o fator de ajuste de escala (3.600 para uma hora); ρ_a , a densidade média do ar (kg m^{-3}); c_p , o calor específico do ar ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); λ , o calor latente de evaporação (MJ kg^{-1}); DPV, kPa e γ , a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); e v, a velocidade do vento a dois metros de altura (m s^{-1}).

O saldo de radiação (R_n) foi estimado a partir da modelagem do balanço de ondas curtas e do balanço de ondas longas, como a seguir:

$$R_n = BOC + BOL \quad (8)$$

em que R_n é o balanço de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$); BOC, o balanço de ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$); e BOL, o balanço de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

$$BOC = Rg(1 - \alpha) \quad (9)$$

em que BOC é o balanço de ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$); R_g , a irradiância solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$); e α , o albedo da cultura (adimensional).

Os valores de albedo (α) foram estimados pela equação 10 desenvolvida por Bastiaanssen et al. (1998) e imagens do sensor Thematic Mapper (TM) a bordo do satélite Landsat 5.

$$\alpha = (\alpha_{toa} - 0,03)\tau_{sw}^{-2} \quad (10)$$

em que α é o albedo; α_{toa} , o albedo no topo da atmosfera; τ_{sw} , a transmissividade atmosférica que para as condições de céu claro, pode ser obtida pela equação 11.

$$\tau_{sw} = 0,75 + (2 \cdot 10^{-5} z_a) \quad (11)$$

em que z_a é a altitude, em metros.

Para a estimativa do balanço de ondas longas em plantios de eucalipto, foi utilizada a equação 12, proposta por Facco (2004).

$$BOL = 9,503510^{-5} t_{med}^4 (0,09\sqrt{e} - 0,56) + 0,456 \quad (12)$$

em que BOL é o balanço de onda longa ($\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$); e e , a pressão real de vapor (mmHg).

4.8. Modelagem da resistência estomática e estimativa da transpiração

4.8.1. Modelagem da resistência estomática

Os modelos de resistência estomática (r_s) do eucalipto e da pastagem foram ajustados nas MECII e MPDII, microbacias onde foram realizadas as campanhas fisiológicas de resistência estomática das culturas vegetais (item 4.6.1).

A resistência estomática foi modelada em função da temperatura, do déficit de pressão de vapor do ar e da irradiância solar global, a cada hora, de acordo como proposto por Carneiro et al. (2008).

$$r_s = (t_{med} DPV) R_g^{-1} \quad (13)$$

em que r_s está em $s\ m^{-1}$; t_{med} , a temperatura média do ar (em $^{\circ}C$); DPV , o déficit de pressão de vapor do ar (kPa); e R_g , a irradiância solar global incidente ($W\ m^{-2}\ s^{-1}$), todos em hora.

4.8.2. Estimativa da transpiração

A modelagem da transpiração da cultura do eucalipto e da pastagem foi realizada pela equação modificada de Penman-Monteith na resistência estomática:

$$\lambda T = \frac{s(Rn - G) + M\rho_a c_p DPV / r_a}{s + \gamma(1 + r_s / r_a)} \quad (14)$$

em que T é a transpiração ($mm\ h^{-1}$); s , a declividade da curva de pressão de saturação do ar à temperatura do ar t ($kPa^{\circ}C^{-1}$); R_n , o balanço de radiação ($MJ\ m^{-2}\ h^{-1}$); G , o fluxo de calor no solo ($MJ\ m^{-2}\ h^{-1}$); M , o fator de ajuste de escala (3.600 para uma hora); ρ_a , a densidade média do ar ($kg\ m^{-3}$); c_p , o calor específico do ar ($MJ\ kg^{-1}\ ^{\circ}C^{-1}$); λ , o calor latente de evaporação ($MJ\ kg^{-1}$); DPV , kPa; γ , a constante psicrométrica ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$); r_a , a resistência aerodinâmica ($s\ m^{-1}$); e r_s , a resistência imposta pelo dossel ($s\ m^{-1}$).

O valor adotado de resistência aerodinâmica (r_a) dos plantios florestais foi de $83\ s\ m^{-1}$, com base no estudo de Hatton et al. (1992) em árvores de eucalipto da espécie *maculata* e no trabalho de Soares e Almeida (2001) em árvores de eucalipto da espécie

grandis. Na pastagem, os valores de r_a foram estimados pela equação 15, recomendada pelo boletim FAO 56:

$$r_a = \frac{208}{v} \quad (15)$$

em que r_a é a resistência aerodinâmica ($s\ m^{-1}$); e v , a velocidade do vento ($m\ s^{-1}$).

A resistência do dossel das duas culturas foi estimada dividindo-se a resistência estomática (r_s) modelada das folhas pelo valor de IAF dos cultivos. O IAF foi estimado com o medidor foliar LAI2000 (Licor, Lincoln, Nebraska, USA), como descrito anteriormente no item 4.6.2.

4.8.3. Fator de desacoplamento

O fator de desacoplamento (Ω) foi utilizado para verificar a contribuição dos dois principais fatores controladores da transpiração na equação de Penman-Monteith modificada na resistência estomática, a taxa de equilíbrio (T_e) e a imposta (T_i), como segue abaixo:

$$\Omega = \frac{1}{1 + [\gamma / (s + \gamma)](r_a / r_s)} \quad (16)$$

em que Ω é o fator de desacoplamento (adimensional); s , a declividade da curva de pressão de saturação do ar à temperatura do ar t ($kPa\ ^\circ C^{-1}$); γ , a constante psicrométrica ($kPa\ ^\circ C^{-1}$); r_a , a resistência aerodinâmica ($s\ m^{-1}$); e r_s , a resistência imposta pelo dossel ($s\ m^{-1}$).

4.8.4. Transpiração modelada X evapotranspiração real

Os valores modelados de transpiração (T) nos plantios de eucalipto e de pastagem das MECII e MPDII no período do ano de 2009 foram analisados em relação aos valores estimados de evapotranspiração real (ET_r). Neste período, apenas estas duas microbacias possuíam sensores de temperatura e umidade relativa do ar dispostos em dois diferentes níveis de altura a partir do dossel das culturas, possibilitando a estimativa da ET_r pelo método da razão de Bowen.

4.9. Estimativa da evaporação do solo e da interceptação da precipitação pluvial

4.9.1. Evaporação do solo

A evaporação do solo (E_{solo}) foi estimada pela equação de Penman-Monteith com a resistência do solo diminuindo rapidamente à medida que a disponibilidade de água no solo decresce (ADS), conforme Choudhury e Monteith (1988) e Soares e Almeida (2001), onde:

$$\lambda E_{\text{solo}} = \frac{s(R_{\text{nsolo}} - G) + M\rho_a c_p DPV / r_a}{s + \gamma(1 + r_{\text{solo}} / r_a)} \quad (17)$$

em que E_{solo} é a evaporação do solo (mm h^{-1}); s , a declividade da curva de pressão de saturação do ar à temperatura do ar t ($\text{kPa}^\circ \text{C}^{-1}$); R_{nsolo} , o balanço de radiação na superfície do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$); G , o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$); M , o fator de ajuste de escala (86.400 para um dia); ρ_a , a densidade média do ar (kg m^{-3}); c_p , o calor específico do ar ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$); λ , o calor latente de evaporação (MJ kg^{-1}); DPV , kPa ; γ , a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); r_a , a resistência aerodinâmica (s m^{-1}); e r_{solo} , a resistência imposta pelo solo (s m^{-1}).

O fluxo de radiação líquida que chega até a superfície do solo (R_{nsolo}) foi estimado com base na formulação da lei de Beer:

$$R_{\text{nsolo}} = R_n \exp(kIAF) \quad (18)$$

em que R_n é a radiação líquida medida acima do dossel; e k , o coeficiente de extinção (-0,42) usado por Hatton et al. (1992).

A resistência do solo (r_{solo}) foi estimada, conforme Choudhury e Monteith (1988) e Soares e Almeida (2001), onde:

$$r_{\text{solo}} = 0,0025 \frac{ADS}{CAD} \quad (19)$$

em que r_{solo} é a resistência do solo (m s^{-1}); ADS , a água disponível no solo (mm); e CAD , a capacidade de água disponível no solo (mm).

A CAD foi calculada pela relação entre a capacidade de campo (C_c), o ponto de murcha permanente (PmP), a densidade do solo (d_s) e pela profundidade do sistema radicular (PsR) dado na equação 20.

$$CAD = (C_c - PmP)d_s P_s R_{10} \quad (20)$$

em que C_c e PmP são dados em %; d_s , em $g\ cm^{-3}$; e PsR, em metros.

A C_c , o PmP e a “d” foram calculados em laboratório a partir de amostras de solos coletadas em campo. A profundidade do sistema radicular foi estimada diretamente em campo, com auxílio de trincheiras.

O valor inicial de armazenamento de água no solo foi o mesmo da capacidade de água disponível no solo. A partir de então, a água disponível foi estimada pela seguinte equação simplificada do balanço hídrico:

$$ADS_{diai} = ADS_{diai-1} + P_{diai} - T_{diai} \quad (21)$$

em que ADS_i é a água disponível no solo no dia i ; ADS_{i-1} , a água disponível no solo no dia anterior $i-1$; P_i , a precipitação no dia i ; e T_i , a transpiração modelada no dia i , todos em mm.

A resistência aerodinâmica do solo (r_{asolo}) adotada foi de $0,012\ m\ s^{-1}$, segundo Choudhury e Monteith (1988).

4.9.2. Estimativa da interceptação da precipitação pluvial

Em relação às florestas, espera-se, que os valores interceptados nas pastagens analisadas sejam menores. Durante alguns meses do ano, as pastagens entram em estágio de senescência, interceptando apenas uma pequena parte da precipitação pluvial. Além disso, os solos ficam expostos, resultando em baixos valores de evaporação do solo. Portanto, torna-se difícil a diferenciação entre a interceptação da precipitação pluvial e a evaporação do solo nestas culturas.

A estimativa da interceptação da precipitação pluvial (I) pelo dossel das culturas vegetais foi realizada a partir da partição do processo de evapotranspiração, como segue:

$$ET_{r\ dia_i} = T_{dia_i} + I_{dia_i} + E_{solo\ dia_i} \quad (22)$$

em que ET_r é a evapotranspiração real no dia i ; T , a transpiração modelada no dia i ; I , a interceptação da precipitação pluvial no dia i ; E_{solo} , a evaporação do solo no dia i , todos em milímetros.

No eucalipto, a interceptação da precipitação pluvial foi estimada pela diferença entre o total evapotranspirado (ET_r) pelo método micrometeorológico da razão de Bowen e a soma entre a T e a E_{solo} .

Na pastagem, os valores de interceptação da precipitação pluvial foram incorporados à evaporação do solo, e estimados pela diferença entre o total ET_r e o transpirado (T) pela cultura.

Foram selecionados para a estimativa da interceptação da precipitação pluvial no eucalipto e da interceptação da precipitação pluvial mais a evaporação do solo na pastagem, apenas os dias com ocorrência de precipitação pluvial e com valores de razão de Bowen $> -0,75$ e $\neq -1$. Para estes dias, foi considerado o intervalo das 8 às 18 horas, desconsiderando os eventos de precipitação ocorridos durante o período da noite.

4.10. Estudo das vazões e análise do escoamento superficial

Partindo da premissa que as microbacias possuem características morfométricas semelhantes, os valores de vazão e lâmina de escoamento superficial foram analisados.

4.10.1. Análise das vazões

O efeito das diferentes coberturas vegetais (eucalipto e pastagem) sobre as vazões das microbacias hidrográficas foi investigado pela comparação dos valores de vazão específica (q) diária e instantânea de 5 minutos. O cálculo da vazão específica ($L\ s^{-1}\ km^{-2}$) foi realizado pela relação entre a vazão, dada em $L\ s^{-1}$, e a área da respectiva microbacia, em km^2 . As vazões específicas comparadas neste estudo foram:

- vazão específica mínima diária associada à permanência de 95% ($q_{95\%}$);
- vazão específica média diária ($q_{média}$);
- vazão específica máxima instantânea de 5 minutos (q_{max}).

A vazão específica mínima diária associada à permanência de 95% ($q_{95\%}$) foi obtida da curva de permanência, correspondendo à parcela de tempo em que a vazão é igualada ou superada durante um determinado período de tempo. A curva de permanência foi construída pela definição de 50 intervalos de classe, a partir dos valores de vazão específica mínima diária observada em cada microbacia, e pela associação de cada uma das classes ao número de registros observados em cada intervalo. A abscissa da curva de permanência foi obtida pelo acúmulo das frequências observadas no sentido da maior vazão específica para a menor. A ordenada da curva correspondeu ao limite inferior do intervalo de classe estabelecido.

O cálculo da vazão específica média diária ($q_{\text{média}}$) foi realizado pela média das vazões específicas médias diárias observadas no período de tempo considerado. A vazão específica máxima instantânea (q_{max}) foi o maior valor de vazão específica instantânea observada na série de vazão específica de 5 minutos.

A comparação das vazões específicas entre as quatro microbacias foi realizada considerando-se os períodos de coleta em comum de dados e sem falhas (item 4.5.3). Na MPDI ocorreu falha na coleta de vazão nos 12 primeiros dias do ano de 2010 e na MPDII, em dois períodos distintos: de 25 de março a 06 de abril de 2009; e 04 de novembro a 22 dezembro de 2009. Portanto, as vazões (q) das quatro microbacias foram comparadas apenas entre janeiro e dezembro de 2010, período comum de coleta de dados e sem falhas.

4.10.2. Análise do escoamento superficial

A individualização do escoamento superficial (E_{sup}) a partir do escoamento subterrâneo (E_{sub}) foi realizada pela análise gráfica dos valores totais escoados ($E_{\text{total}} = E_{\text{sub}} + E_{\text{sup}}$) e precipitado (P) em cada hora. A precipitação pluvial (P) foi medida nas torres meteorológicas das respectivas microbacias.

O escoamento superficial se iniciou na hora i que foi observada a ocorrência de um evento de precipitação e um aumento no valor do escoamento total. O final do escoamento superficial ocorreu uma hora após o término da precipitação, sendo este o tempo de concentração (T_c) decorrido para que toda a área de drenagem da respectiva microbacia leva para contribuir com o E_{sup} . O T_c médio das microbacias foi de 5 minutos, portanto, na hora após o término da precipitação, toda a precipitação já contribui com o E_{sup} .

Os critérios estabelecidos para a individualização do escoamento superficial estão descritos abaixo:

$$\begin{aligned} & \text{Se, } P_{\text{horai}} > 0,0 \text{ e } E_{\text{horai}} < E_{\text{horai+1}} \{ \text{ início do } E_{\text{sup}} \\ & \text{Se, } P_{\text{horai}} \leq 0,0 \{ \text{ final do } E_{\text{sup}} \text{ na hora } i+1 \end{aligned}$$

Depois da individualização dos escoamentos, a lâmina escoada (mm) a cada hora foi calculada pela integração dos valores Q ($L s^{-1}$) instantâneos de 5 minutos (300 s) e a sua relação com a área (m^2) da respectiva microbacia. Os valores integrados de lâmina de escoamento subterrâneo (LE_{sub}) e superficial (LE_{sup}) anual foram comparados entre as quatro microbacias.

O cálculo do coeficiente de escoamento superficial (CE) foi realizado pela relação entre as lâminas totais de escoamento superficial (E_{sup}) e de precipitação, ocorridas no final do ano, como segue:

$$CE = \frac{E_{\text{sup}}}{P} 100 \quad (23)$$

em que CE é o coeficiente de escoamento superficial; P, a precipitação pluvial, todos em milímetros.

A análise do efeito das diferentes coberturas vegetais (eucalipto e pastagem) das microbacias hidrográficas sobre o escoamento total ($E_{\text{sub}} + E_{\text{sup}}$) foi realizada pela comparação dos valores estimados de lâmina de escoamento superficial e do coeficiente de escoamento superficial anual (CE).

As comparações dos volumes de escoamento superficial e dos valores de coeficiente de escoamento entre as cinco microbacias hidrográficas foram realizadas considerando-se o ano de coleta em comum de dados e sem falhas, como realizado no estudo das vazões dos cursos d'água.

4.10.3. Evapotranspiração das microbacias

O total evapotranspirado em cada microbacia (ET_{bacia}) foi calculado pela soma da contribuição percentual de evapotranspiração de cada uso da terra na microbacia. A contribuição de cada uso da terra foi calculada pela relação entre a área do respectivo uso da terra e a área total da microbacia (Tabela 9). Portanto, a ET_{bacia} é o resultado da

soma da contribuição do total transpirado (T) e evaporado do solo (E_{solo}) sob as culturas de eucalipto ou de pastagem, do total de precipitação pluvial interceptada pela vegetação (I) e do total evapotranspirado (ET_0) pela reserva (Mata Atlântica).

Tabela 9 - Modelos de resistência estomática ajustadas por Carneiro et al. (2008) em plantios comerciais de eucalipto (*grandis* x *urophylla*)

Microbacia	Uso da terra	Período	Equação	r^2
MECI	Eucalipto	Seco	$rs = 4907(DPV \ t R_g^{-1})^{2,1804}$	0,6
MECI	Eucalipto	Úmido	$rs = 418(DPV \ t R_g^{-1})^{0,5415}$	0,5

A estimativa da transpiração (T) foi realizada a partir da equação de Penman-Monteith modificada na resistência estomática da cultura. São apresentados na Tabela 9 os modelos de resistência estomática utilizados na estimativa da transpiração do eucalipto na MECI. Estes modelos foram ajustados por Carneiro et al. (2008) em plantios comerciais de eucalipto localizados próximos à microbacia citada. Para as demais microbacias, serão utilizados os modelos de r_s ajustados a partir dos dados coletados neste estudo.

O cálculo da interceptação da precipitação pluvial (I) foi realizado pelos modelos de interceptação da precipitação ajustados neste trabalho. Nas microbacias com eucalipto, a interceptação foi estimada pela diferença entre o total evapotranspirado (ET) pelo método micrometeorológico da razão de Bowen e a soma entre a T e a E_{solo} . Já nas microbacias com pastagem, a interceptação foi incorporada à evaporação do solo ($I + E_{\text{solo}}$), sendo esta estimada pela diferença do total ET e o transpirado pela cultura.

4.11. Modelagem do balanço hídrico

A modelagem dos componentes do balanço hídrico foi realizada nas MECI, MECII, MPDI e MPDII, durante o período de coleta dos dados hidrometeorológicos (item 4.5.3). A modelagem dos componentes foi realizada na camada do solo correspondente à zona das raízes. A Tabela 10 apresenta os principais parâmetros utilizados na modelagem dos componentes do balanço hídrico de cada microbacia.

Tabela 10 - Valores dos parâmetros utilizados no estudo de modelagem do balanço hídrico das quatro microbacias agrícolas

Parâmetro	Microbacia			
	Milagres	Vai e Volta	Felicina	Santa Cruz
Identificação	MECI	MECII	MPDI	MPDII
Cobertura da terra	Eucalipto	Eucalipto	Pastagem	Pastagem
<i>Beer-Lambert (k)</i>	-0,42	-0,42	-	-
Coefficiente da cultura - Floresta Nativa	1	1	1	1
Índice de área foliar médio (m ² m ⁻²)	1,	2,5	1,3	1,2
<i>Resistência aerodinâmica (s m⁻¹)</i>	83	83	FAO 56	FAO 56
<i>Resistência máxima do solo (m s⁻¹)</i>	0,0025	0,0025	-	-
<i>Resistência aerodinâmica do solo (m s⁻¹)</i>	0,012	0,012	-	-
Profundidade do sistema radicular (m)	2,5	2,5	0,7	0,7
Tipo de solo	CXbd	CXbd	CXbd	LVd
Areia (%)	32	47	48	32
Silte (%)	12	14	10	10
Argila (%)	56	39	43	58
Densidade do solo (g cm ⁻³) – zona das raízes	1,1	0,94	1,4	1,3
Porosidade (%) – zona das raízes	53	62	35	49
Capacidade de campo (mm)	1.075	876	304	347
Ponto de murcha (mm)	670	573	162	181
Capacidade de água disponível no solo (mm)	405	303	142	166
Água inicial disponível no solo (mm)	80	265	80	10

Os parâmetros em itálico foram retirados da literatura.

O modelo do balanço hídrico utilizado parte de algumas premissas, considerando fluxos de entrada e saída e a variação no estoque de água no solo. Pressupõe também que não existam falhas geológicas nas microbacias, capazes de realizar trocas subterrâneas de água com outras áreas.

A modelagem do balanço hídrico foi realizada no espaço de tempo diário, considerando a precipitação pluvial a única entrada de água e o processo de evapotranspiração e a drenagem profunda como as principais saídas das microbacias, como segue:

$$ADS_{dia\ i} = ADS_{dia\ i-1} + P - ET_{bacia} - Q_{sup} - D_{prof} \quad (24)$$

em que ADS_i é a água disponível no solo no dia *i*; ASD_{i-1}, a água disponível no solo no dia anterior *i-1*; P, a precipitação no dia *i*; ET_{bacia}, a soma da evapotranspiração total na microbacia no dia *i*; Q_{sup}, o escoamento superficial observado no dia *i*; e D_{prof}, a drenagem profunda no dia *i*; todos em milímetros.

O valor de ET_{bacia} foi calculado pela soma da contribuição (%) de evapotranspiração de cada uso da terra na microbacia. A contribuição de cada uso da terra foi calculada pela relação entre a área do respectivo uso da terra e a área total da microbacia. Portanto, a ET_{bacia} é o resultado da soma da contribuição do total transpirado (T) e evaporado do solo (E_{solo}) sob as culturas de eucalipto ou de pastagem, do total de precipitação pluvial interceptada pela vegetação (I) e do total evapotranspirado (ET_0) pela reserva (Mata Atlântica).

A estimativa da transpiração (T) foi realizada a partir da equação de Penman-Monteith modificada na resistência estomática da cultura. O cálculo da interceptação da precipitação pluvial (I) foi realizado pelos modelos de interceptação da precipitação ajustados neste trabalho. Ressalta-se que, na microbacia com eucalipto, a interceptação foi estimada pela diferença entre o total evapotranspirado (ET) pelo método micrometeorológico da razão de Bowen e a soma entre a T e a E_{solo} . Já na microbacia com pastagem, a interceptação foi incorporada à evaporação do solo ($I + E_{\text{solo}}$), sendo esta estimada pela diferença do total ET e o transpirado pela cultura.

O cálculo da evaporação do solo (E_{solo}) foi realizado pela equação de Penman-Monteith modificada na resistência estomática do solo. O cálculo da evapotranspiração da área de reserva foi realizado pela equação de evapotranspiração de referência (ET_0), penalizada pelo coeficiente da cultura ($k_c=1$).

A lâmina de escoamento superficial (Q_{sup}) foi estimada a partir da individualização do escoamento superficial (E_{sup}) do escoamento subterrâneo (E_{sub}), conforme descrito no item 4.11.2. A quantidade de água que drena para o lençol freático (D_{prof}), foi estimada a partir do excesso de água armazenado no solo, logo após a capacidade de campo (C_c) tenha sido atingida no perfil dos solos, considerando a profundidade do sistema radicular de cada cultura da respectiva microbacia. O fluxograma apresentado na Figura 4 resume as etapas realizadas no processo de modelagem do balanço hídrico das microbacias hidrográficas.

Os componentes do balanço hídrico foram comparados entre as microbacias considerando-se três intervalos de tempo: (a) o ano de 2009; (b) o ano de 2010; e (c) período total de coleta de dados hidrometeorológicos (2009 e 2010).

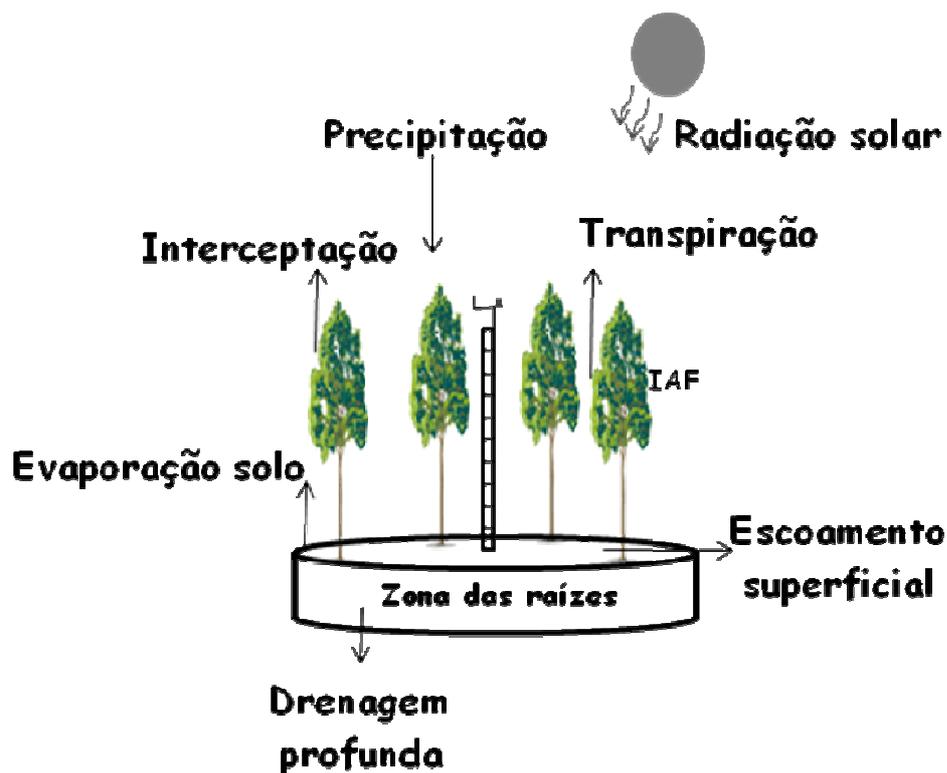


Figura 4 - Modelo de balanço hídrico.

4.12. Medida do conteúdo da água no solo

A água disponível no solo (ADS) foi medida em campo pelo método de atenuação de nêutrons e pelo método gravimétrico. Equações de calibração entre os valores de contagem de nêutron (CN) da sonda e umidade volumétrica (Θ) ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) foram ajustadas para os solos das MECI e II (Tabela 11).

Tabela 11 - Equações de calibração contagem de nêutron umidade do solo

Microbacia	Equação	r^2
MECI	$\Theta = 0,0749\text{CN} + 0,0367$	0,8
MECII	$\Theta = 0,0801\text{CN} - 0,0052$	0,9

As leituras de contagem de nêutron foram realizadas por uma sonda (Modelo 503 DR-HIDROPROBE, CPN International Inc., Martinez California EUA). Em cada microbacia, sete tubos de acesso com 2 m de comprimento e 45 mm de diâmetro interno foram utilizados nas coletas. As medições eram realizadas em intervalos (camadas) de 0,2 m de solo, até a profundidade de 2,5 e 0,7 m, nas microbacias de eucalipto e pastagem, respectivamente. O volume de água (mm) em cada camada foi estimado pelo produto entre o conteúdo volumétrico ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e a espessura da mesma (0,2 mm). O conteúdo total de água no solo (mm) até a zona das raízes foi dado pela soma do conteúdo de água de cada camada.

4.12. Análise do modelo de balanço hídrico de água no solo

Os valores de água disponível no solo estimados pelo modelo do balanço hídrico foram validados pelas medidas de campo realizadas pelo método de atenuação de nêutrons e pelo método gravimétrico.

O ajuste do modelo de balanço hídrico foi avaliado pelas seguintes medidas estatísticas: coeficiente de determinação (r^2), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o erro absoluto médio (MAE).

RMSE e MAE são medidas de erros usados para representar as diferenças médias entre os valores preditos pelo modelo (P_i) e os valores observados (O_i). O RMSE fornece uma informação em relação à dispersão dos dados, ou seja, o grau de espalhamento obtido na correção entre os valores preditos e observados. O MAE é menos sensível a valores extremos. Os valores de RMSE e do MAE foram calculados, respectivamente, por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{ri} - O_i)^2}{n}} \quad (25)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_{ri} - O_i|}{n} \quad (26)$$

em que n é o número de observações.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Modelagem da resistência estomática e estimativa da transpiração

5.1.1. Modelagem da resistência estomática

Os valores horários da resistência estomática das folhas de árvores de eucalipto e de pastagem, e os valores da relação entre as variáveis ambientais temperatura (t), DPV e da irradiância solar (R_g) são apresentadas na Figura 5 e 6. Os modelos de equação de r_s ajustados em função da relação das variáveis ambientais consideradas ($DPV \ t \ R_g^{-1}$) são mostrados na Tabela 12. O comportamento horário das variáveis ambientais analisadas nas diferentes datas pode ser visto nas Figuras 7 e 8.

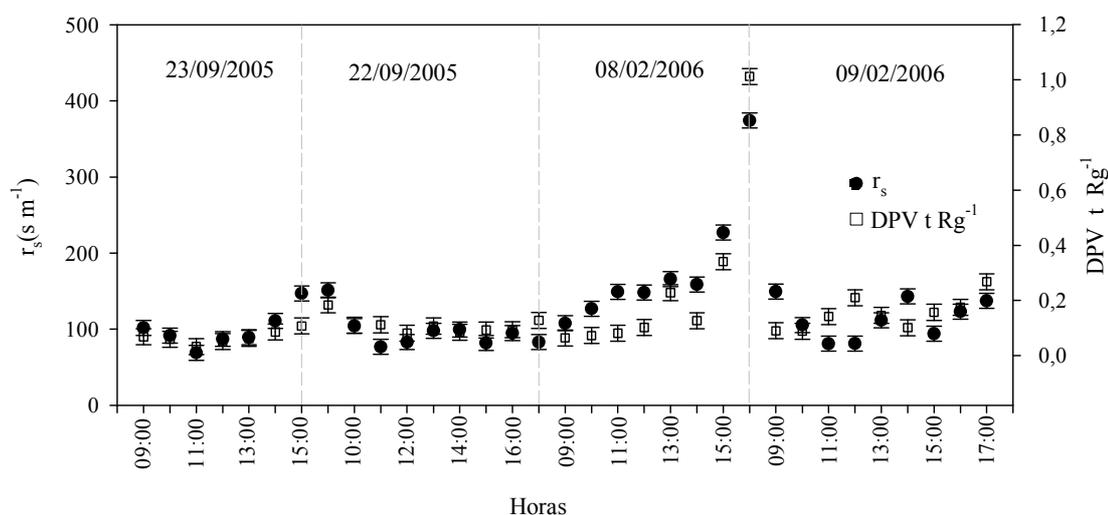


Figura 5 - Valores médios horários de r_s e da relação entre as variáveis ambientais ($DPV \ t \ R_g^{-1}$) observados em plantios de eucalipto (*grandis x urophylla*) nos dias 22 e 23/09/2005 e 08 e 09/02/2006. Cada ponto representa a média de 12 medidas e a barra vertical o erro padrão.

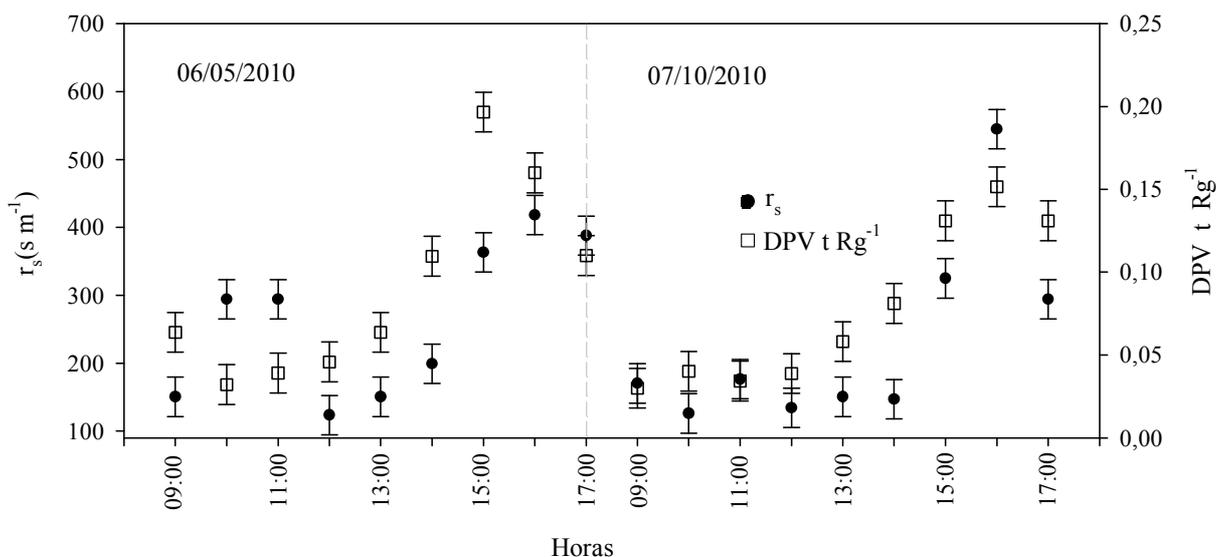


Figura 6 - Valores médios horários de r_s e da relação entre as variáveis ambientais ($DPV \ t \ R_g^{-1}$) observados em plantios de *Brachiaria decumbens* no dias 06 e 07/05/2010. Cada ponto representa a média de 15 medidas e a barra vertical o erro padrão.

Tabela 12 - Modelos de resistência estomática ajustados para plantios de eucalipto (*grandis x urophylla*) e pastagem (*Brachiaria decumbens*)

Uso	Equação	r^2
Eucalipto	$r_s = 393(DPV \ t \ R_g^{-1}) + 62$	0,8
Eucalipto	$r_s = 271(DPV \ t \ R_g^{-1}) + 91$	0,4
Pastagem	$r_s = 1600(DPV \ t \ R_g^{-1}) + 107$	0,7

O comportamento da r_s ao longo das horas do dia foi semelhante para as duas culturas, com os menores e maiores valores, respectivamente, observados no início e no final do dia. Foram observadas, no entanto, diferenças nos valores horários de r_s entre as duas culturas. Nas folhas de eucalipto e de pastagem a r_s média foi de 122 e 247 $s \ m^{-1}$ respectivamente. O mesmo comportamento foi observado para os valores da relação entre as variáveis ambientais ($DPV \ t \ R_g^{-1}$), evidenciando que há correlação com o parâmetro fisiológico analisado (Tabela 12). Os resultados acima, foram semelhantes ao encontrado por Carneiro et al. (2008) em plantios de eucalipto no leste de Minas Gerais.

Na pastagem, observa-se uma maior sensibilidade do parâmetro fisiológico, com maior variação dos valores de r_s ao longo das horas do dia. Nota-se também que os

valores de resistência estomática na gramínea foram mais altos, ou seja, para as datas e condições de campo durante a realização do experimento, a capacidade de troca gasosa entre a espécie e o meio foi menor do que na espécie florestal.

Os valores de resistência estomática estão fortemente relacionados com o DPV e a R_g . Nas horas do dia em que os valores de DPV são altos e os de R_g baixos, como às 16:00 h do dia 08 de fevereiro de 2006 no eucalipto e às 17:00 h do dia 06 de maio de 2010 na pastagem, os valores de r_s foram os mais altos. Conseqüentemente, os valores do produto entre as variáveis meteorológicas consideradas ($DPV \times R_g^{-1}$) também são elevados. A mesma dependência já foi observada em outros estudos (MIELKE et al., 1999 e 2000). Vale ressaltar que os valores de r_s também estão associados com a disponibilidade de água no solo, como foi observado no trabalho de Carneiro et al. (2008).

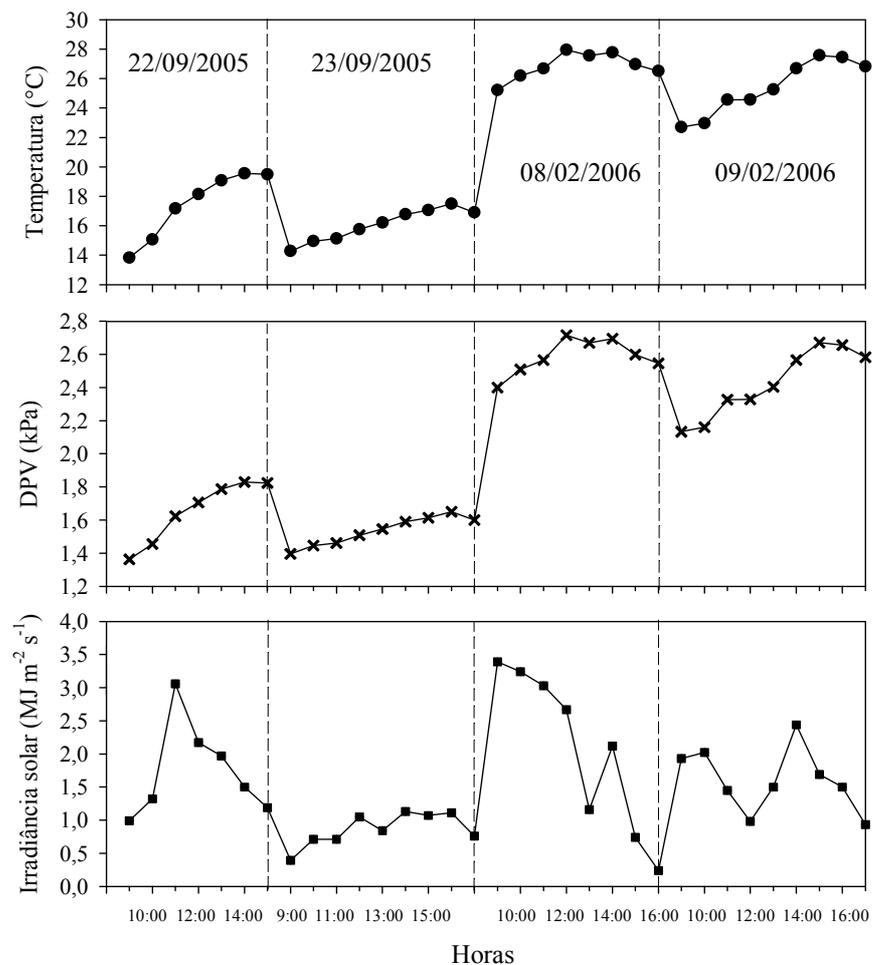


Figura 7 - Valores médios de temperatura do ar (°C), déficit de pressão de vapor (kPa) e irradiância solar (MJ m⁻² h⁻¹) ao longo das horas dos dias 22 e 23/09/2005 e 08 e 09/02/2006 em plantios de eucalipto (*grandis* x *urophylla*).

A demanda por transpiração, além de outros fatores, está associada à r_s , que por sua vez, está relacionada com o DPV, que depende da temperatura e da umidade relativa do ar. Mielke et al. (1999) concluíram que a transpiração em espécies do gênero eucalipto está diretamente relacionada com o déficit de pressão de vapor do ar (DPV). Resultado semelhante foi encontrado por Ngugi et al. (2004) em procedências de eucalipto *cloeziana*.

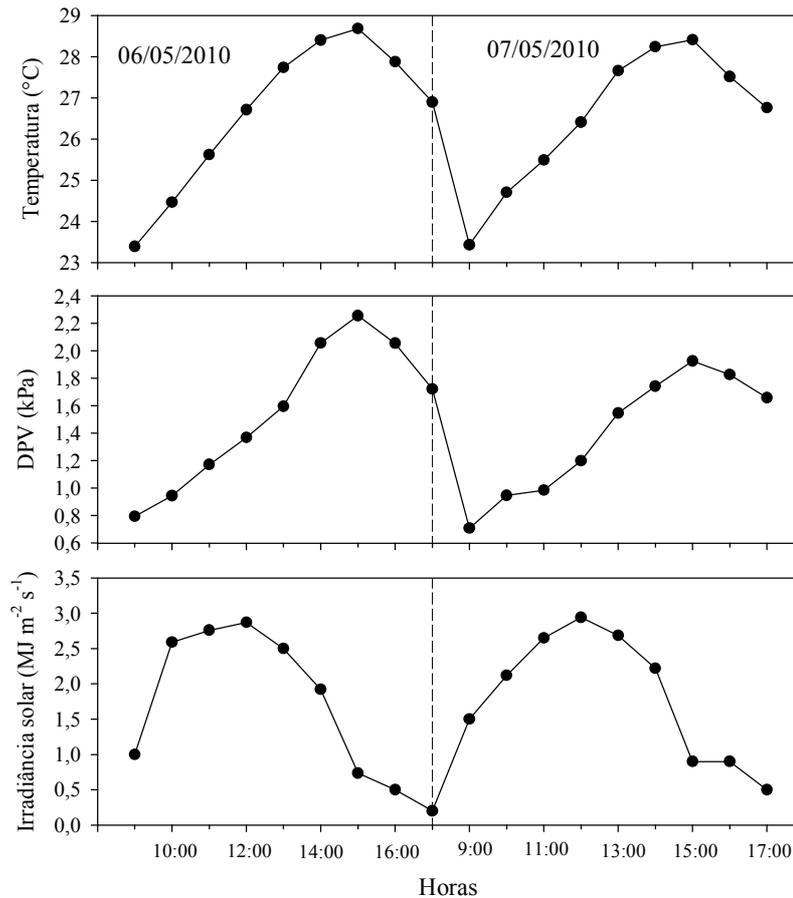


Figura 8 - Valores médios de temperatura do ar (°C), déficit de pressão de vapor (kPa) e irradiância solar (MJ m⁻² h⁻¹) ao longo das horas dos dias 06 e 07/05/2010 em plantios de *Brachiaria decumbens*.

A correlação entre a r_s e o ambiente também pode ser verificada pela análise dos modelos ajustados e seus respectivos valores de coeficiente de determinação (Tabela 12). O baixo valor encontrado no período mais úmido do ano no plantio com eucalipto pode estar associado às condições meteorológicas do local. O plantio está localizado em uma região de elevada altitude, com clima frio e úmido, com alta ocorrência de nuvens durante o verão (dezembro a março). Nota-se que os valores de

irradiância solar caíram durante algumas horas destes dias e depois voltaram a aumentar, possivelmente devido à presença de nuvens, o que fez com que os valores da relação, aumentassem significativamente, como às 13 e às 12 horas dos dias 08 e 09 de fevereiro de 2006.

5.1.2. Estimativa da transpiração

A partir dos modelos de resistência estomática ajustados, os valores de transpiração foram estimados. Na Figura 9, são apresentados os valores de precipitação pluvial mensal e nas Figuras 10 e 11 o comportamento sazonal diário da transpiração, da resistência estomática, do fator de desacoplamento, do DPV e da velocidade do vento no plantio de eucalipto e na pastagem, respectivamente.

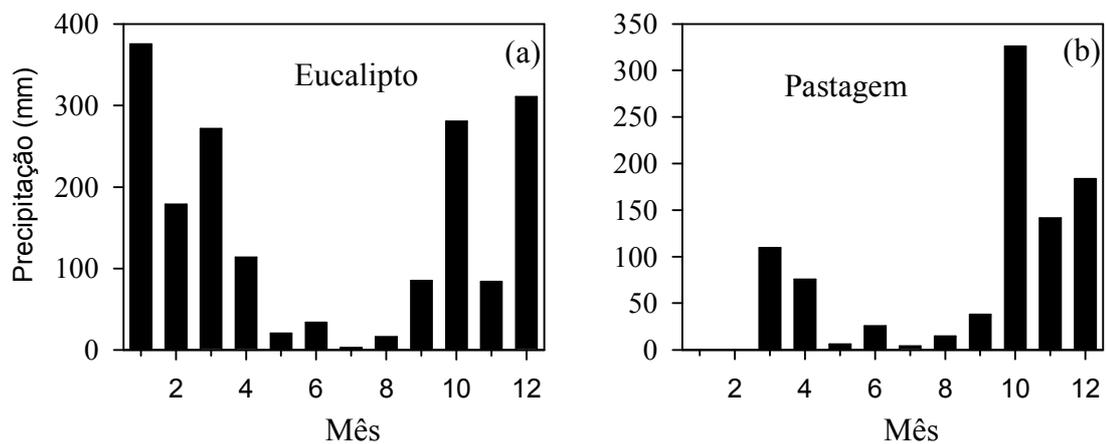


Figura 9 - Precipitação pluvial mensal observada: (a) no plantio comercial de eucalipto e (b) na pastagem no ano de 2009.

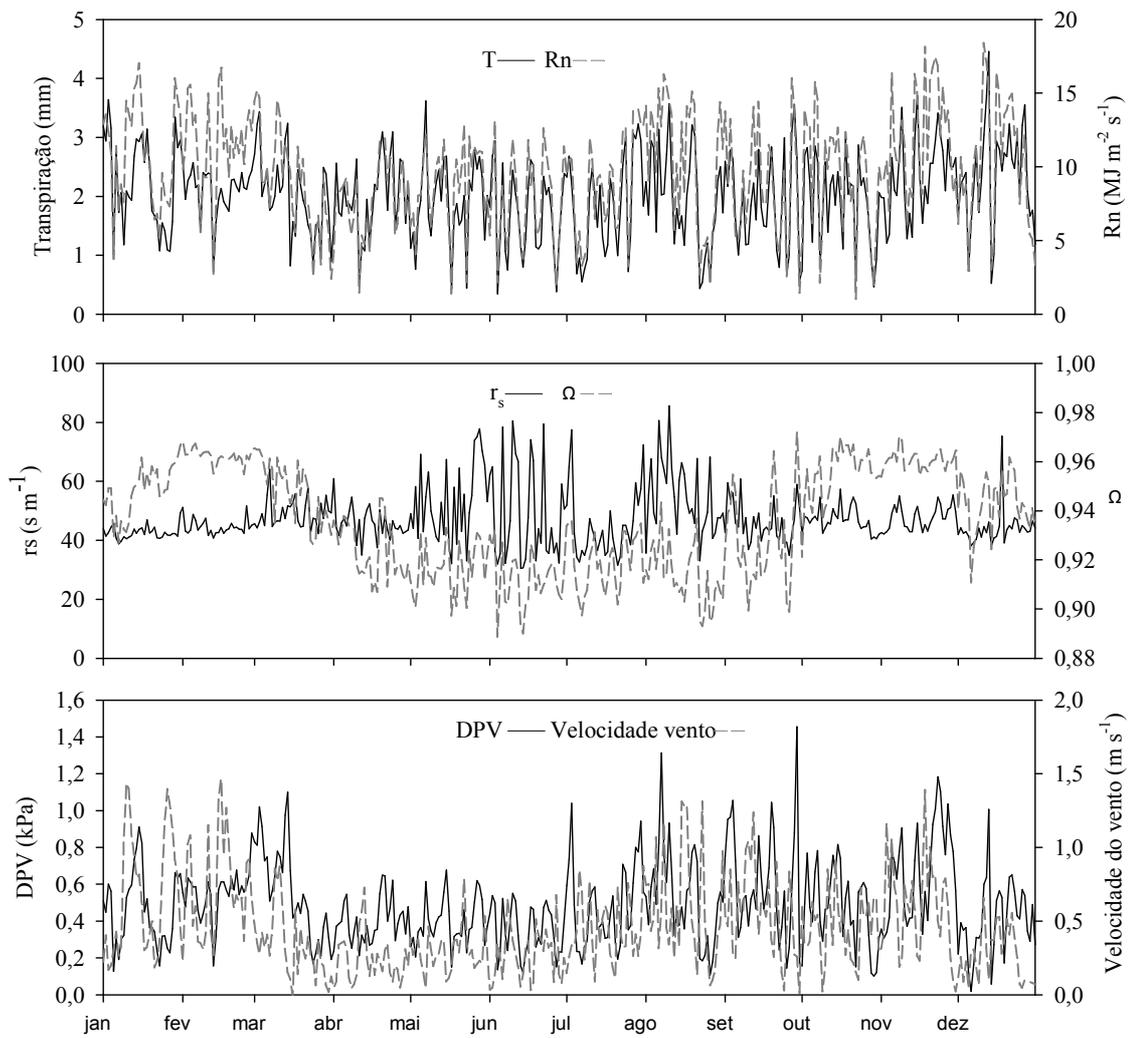


Figura 10 - Valores, totais diário de transpiração (T) e saldo de radiação (R_n), médios diários de DPV (kPa), velocidade do vento ($m s^{-1}$), resistência estomática (r_s) e fator de desacoplamento (Ω) em plantios de eucalipto durante o ano de 2009.

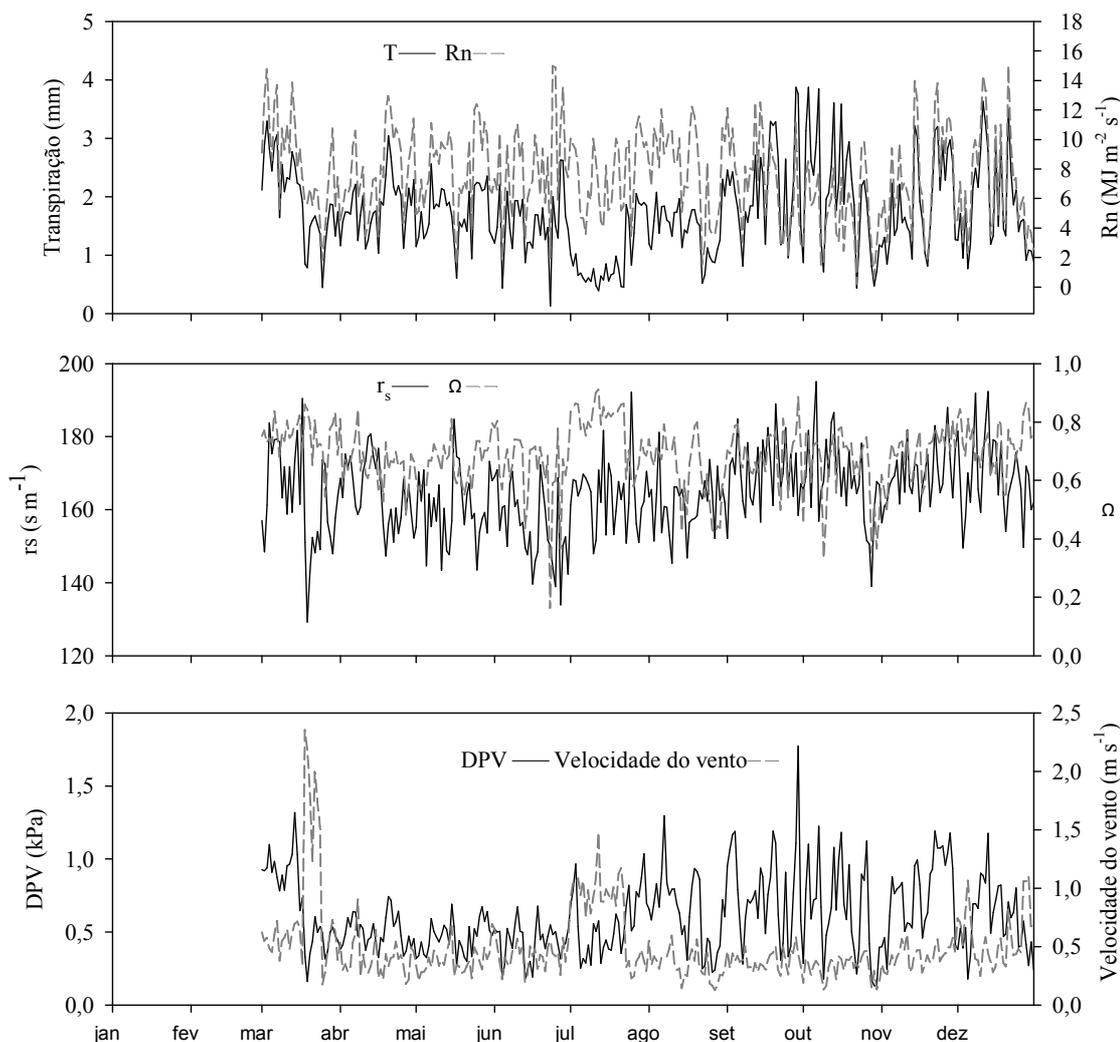


Figura 11 - Valores, totais diário de transpiração (T) e saldo de radiação (R_n), médios diários de DPV (kPa), velocidade do vento ($m s^{-1}$), resistência estomática (r_s) e fator de desacoplamento (Ω) em pastagem durante o ano de 2009.

No plantio de eucalipto, os meses do ano foram mais chuvosos do que na pastagem. Apenas no mês 10, foi observado um maior valor precipitado na pastagem (326 mm) em relação ao eucalipto (280 mm). É evidente a diferença entre o período seco (abril a setembro) e úmido (outubro a março) do ano nas duas áreas.

No eucalipto, foi encontrada uma diferença de 4,1 mm entre os dias com maior ($4,4 \text{ mm dia}^{-1}$) e menor ($0,3 \text{ mm dia}^{-1}$) transpiração. Nenhum comportamento sazonal foi observado ao longo do ano, sendo o consumo médio diário próximo ao da pastagem, em torno de 2 mm dia^{-1} , resultado semelhante ao encontrado por Feikema et al. (2010) e Forrester et al. (2010) em plantios de eucalipto aos sete anos de idade na Austrália.

Nota-se que a transpiração seguiu a mesma variação do saldo de radiação (R_n), estando portanto, na maior parte do tempo, em função desta variável ambiental. Alguns estudos mostram que 80% dos valores de transpiração podem ser governados pelo R_n (CABRAL et al., 2010).

No eucalipto, a resistência estomática e o fator de desacoplamento foram praticamente constantes ao longo do ano, com valores médios de 47 s m^{-1} e 0,93, respectivamente. O maior e menor valor de resistência estomática modelada no eucalipto foi de 80 e 30 s m^{-1} , e os valores máximo e mínimo de Ω foram de 0,97 e 0,88, respectivamente. Este comportamento do Ω indica que o consumo de água foi conduzido pela taxa de transpiração de equilíbrio (T_e) em praticamente todos os dias do ano, resultado contrário ao observado em outros trabalhos, onde a transpiração foi controlada pela T_i (MATSUMOTO et al., 2008; BLANKEN; BLACK, 2004). Geralmente, as florestas de eucalipto são definidas como acopladas à atmosfera, isto é, têm baixos coeficientes de desacoplamento no período de inverno (WHITEHEAD; BEADLE, 2004; O'GRADY et al., 2008). Este comportamento diferenciado em relação à outros trabalhos pode estar relacionado com o valor fixo de resistência aerodinâmica (r_a) utilizado, 83 s m^{-1} .

Os valores e o comportamento do DPV e da velocidade do vento foram semelhantes na cultura de eucalipto, com valores médios de 0,49 kPa e $0,45 \text{ m s}^{-1}$.

Na pastagem também foi observada uma estreita relação entre a T e o R_n , porém com menor intensidade. Principalmente no período seco no ano, em que os valores de água disponível no solo e do IAF ($\text{IAF} \sim 0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) da gramínea diminuem substancialmente. As transpirações máxima e mínima na pastagem foram de 0,1 e 3,8 mm dia^{-1} , valores ligeiramente inferiores aos encontrados no eucalipto. Considerando o mesmo período de tempo (março a dezembro), a transpiração do eucalipto foi superior em 75 mm à da pastagem, com valor total de 608 e 533 nas duas culturas, respectivamente. Este resultado foi semelhante ao encontrada no trabalho de Zhang et al., (2001), a partir do qual foram derivadas as “curvas de Zhang”, amplamente utilizadas na estimativa da transpiração destas espécies em função da precipitação anual incidente.

A r_s na pastagem foi maior do que a observada no eucalipto, com valor máximo e mínimo de 195 e 129 s m^{-1} . O fator de desacoplamento foi menor na pastagem, em média 0,68, resultado semelhante ao encontrado por Pereira (2004) em gramíneas no estado de São Paulo. Os valores máximos e mínimos do Ω na pastagem

foram de 0,91 e 0,16, o que evidencia maior controle estomático nesta cultura em relação ao eucalipto, sendo o componente da transpiração imposta (T_i) o principal responsável pelo processo transpiratório durante todo o ano. Na pastagem, os valores médios de DPV e velocidade do vento foram de 0,6 kPa e $0,4 \text{ m s}^{-1}$. Os maiores valores de DPV encontrados na pastagem induzem a diminuição dos valores de Ω .

Percebe-se que o comportamento sazonal da transpiração nas duas culturas pode ser explicado pelo saldo de radiação (R_n), haja vista uma clara correspondência entre os valores transpirados e de energia disponível ao longo dos dias. No eucalipto, porém, esta dependência foi mais forte do que na pastagem. É importante lembrar, que a transpiração varia com o estágio de desenvolvimento (idade) da cultura, com as estações do ano e com as características climáticas do local (FEIKEMA et al., 2010).

Os valores de r_s e o Ω nas duas culturas não apresentaram tendências significativas ao longo do ano, apenas diferença nas magnitudes, com menores valores de r_s no eucalipto e menores valores de Ω na pastagem.

Ao se comparar a variação do fator de desacoplamento entre as florestas de eucalipto e a pastagem, verifica-se um maior controle superficial na transpiração por parte da pastagem. Esse fato pode ser entendido devido à alta umidade do ar nos plantios de eucalipto, promovendo baixos valores de DPV, logo uma menor demanda transpirativa, fazendo então com que a disponibilidade energética seja o principal fator no controle da transpiração, ou seja, a taxa de transpiração de equilíbrio.

5.1.3. Transpiração modelada x evapotranspiração real

O comportamento da transpiração modelada (T) e da evapotranspiração real (ET_r - Bowen) podem ser visualizados na Figura 12. A análise gráfica de dispersão entre os valores diários de T e ET_r podem ser visualizados na Figura 13.

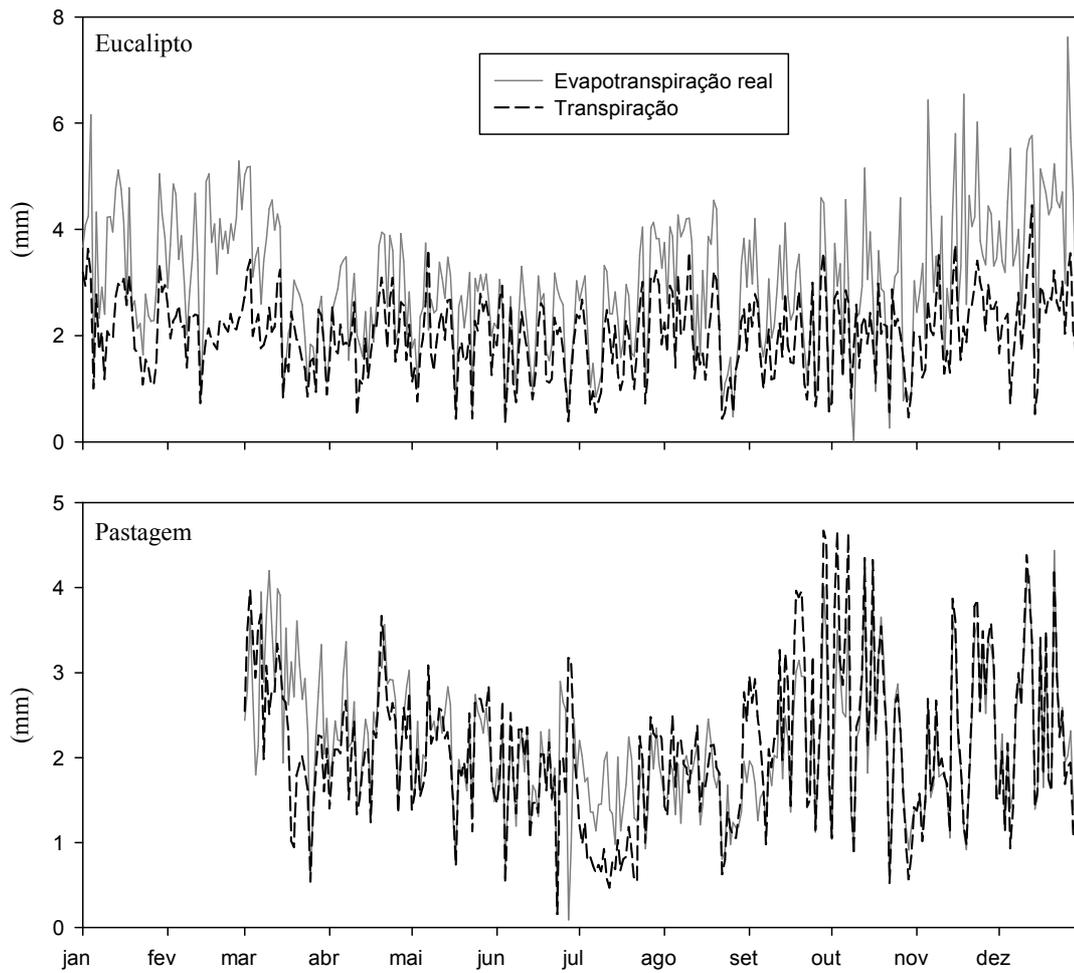


Figura 12 - Valores médios de transpiração modelada (T) via equação modificada de Penman-Monteith e evapotranspiração real, calculada pelo método da razão de Bowen (ET_r), em plantios de eucalipto e pastagem no ano de 2009.

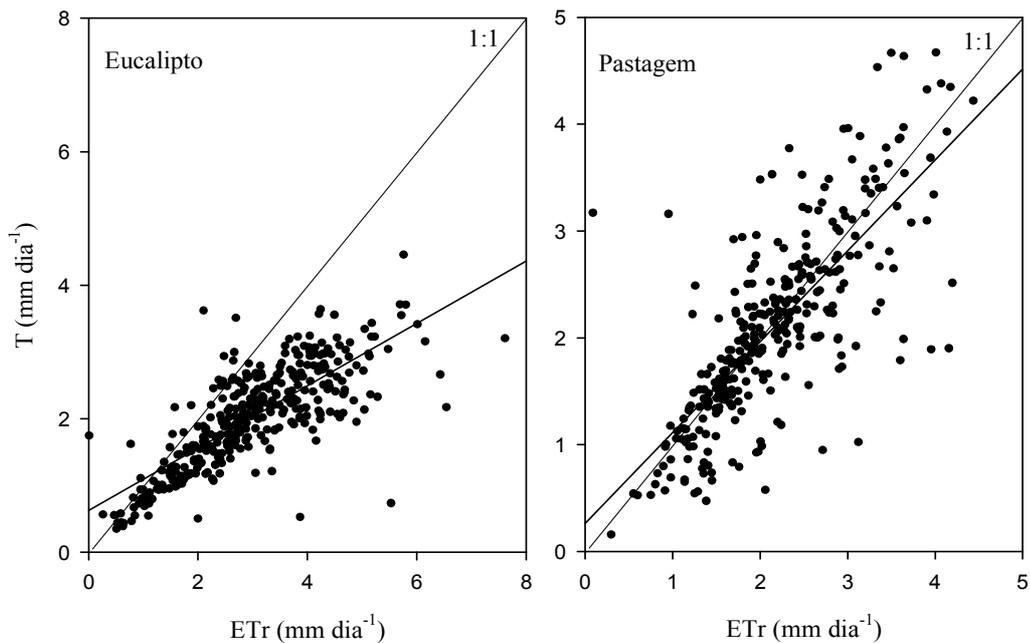


Figura 13 - Valores diários de transpiração modelada via equação modificada de Penman-Monteith e evapotranspiração real, calculada pelo método da razão de Bowen, em plantios de eucalipto e pastagem.

A transpiração estimada segue o mesmo comportamento da ET_r nas duas culturas, porém os valores de transpiração estimados pelo modelo foram inferiores ao encontrado pelo processo total de evapotranspiração (ET_r). No eucalipto, as diferenças diárias entre os dois valores foram superiores em quase todo o período de tempo, diferente da pastagem, onde foram observados em alguns dias, valores de T superiores ao da ET_r . O processo de evapotranspiração pode ser dividido em três partes principais: a transpiração da cultura, a evaporação direta da água do solo, e a interceptação da precipitação pluvial. Portanto, os resultados encontrados estão coerentes, indicando que a diferença observada entre os dois valores ($ET_r \neq T$), corresponde às partições da evaporação do solo e da interceptação da precipitação pluvial.

As retas ajustadas confirmam o resultado descrito acima, estando abaixo da reta normal em ambas as espécies analisadas, sendo mais próxima da reta 1:1 na pastagem (Figura 13), indicando uma possível superestimativa nos valores transpirados nesta cultura.

A superestimativa do modelo ajustado na pastagem pode ser comprovada pela diferença entre o total evapotranspirado e transpirado na pastagem cultura no mesmo período de tempo. Portanto, o total evapotranspirado no eucalipto e na pastagem foi de

1089 e 654 mm, respectivamente, 353 e 12 mm superior ao estimado via transpiração. Isto indica que apenas 12 mm serão consumidos via evaporação do solo e interceptação da precipitação pluvial. Considerando a ET_r como valor real evapotranspirado na cultura, a pequena diferença encontrada na pastagem comprova que os valores de transpiração foram superestimados na cultura da pastagem.

5.2. Evaporação do solo e estimativa da interceptação da precipitação pluvial

5.2.1. Evaporação do solo

Os valores diários de evaporação e do armazenamento da água no solo sob eucalipto da MECII, podem ser vistos na Figura 14. No ano, foram evaporados aproximadamente 101 mm, com valor mínimo e máximo de 0,01 e 0,8 mm dia^{-1} .

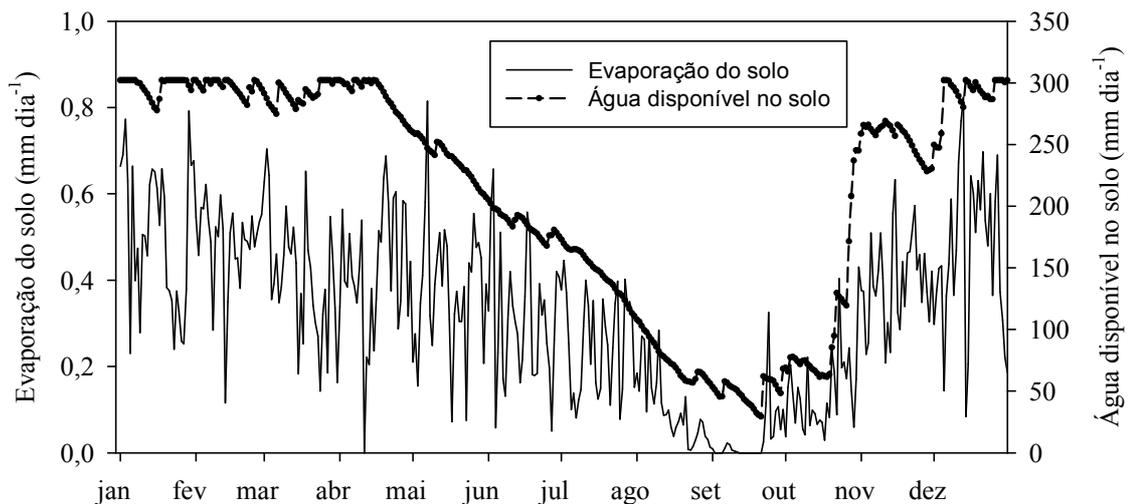


Figura 14 - Evaporação do solo e água disponível no solo observado na microbacia cultivada com eucalipto Vai e Volta durante os dias do ano de 2009.

A capacidade de campo e o ponto de murcha permanente do solo da microbacia florestal foram de 876 e 573 mm, respectivamente. A CAD estimada foi de 302 mm, considerando a profundidade média do sistema radicular do eucalipto de 2,5 m e a densidade do solo de 1,4 g cm^{-3} .

Na Figura 13 é possível notar como a evaporação variou em função da água disponível no solo. Este resultado era esperado, pois a equação de evaporação utilizada estima a resistência do solo em função dos valores de água disponível no solo.

5.2.2. Modelagem da interceptação da precipitação pluvial

A Tabela 13 apresenta os valores de precipitação, evapotranspiração real, transpiração, evaporação da água do solo e a interceptação da precipitação pluvial na cultura do eucalipto da MECII. Na Tabela 14 são apresentados os valores de evapotranspiração real, evaporação do solo mais interceptação da precipitação pluvial na pastagem da MPDII, além da precipitação pluvial medida. Na Figura 15 são apresentadas as porcentagens interceptadas pelas duas culturas em relação ao total precipitado ao longo dos dias analisados.

Na MECII, foram escolhidos 26 dias com evento de precipitação e na MPDII, 30 dias. A quantidade precipitada foi de aproximadamente 220 e 281 mm, no eucalipto e na pastagem, respectivamente. A ET_r no eucalipto foi de 81 mm, cerca de 37% do total precipitado. Na pastagem, a ET_r foi de aproximadamente 74 mm, correspondendo a 26% da chuva.

A quantidade de água evaporada do solo na microbacia com eucalipto, nos dias considerados, foi de aproximadamente 8 mm, ou seja, 3% da precipitação ocorrida.

Nos 26 dias com precipitação selecionados no experimento da MECII, o total precipitado foi de 220 mm. Deste valor, o total interceptado foi de 21 mm, correspondendo em média, a 10% do total precipitado. Valor semelhante foi encontrado em uma microbacia cultivada com eucalipto (10,9%) aos nove anos de idade no litoral do Espírito Santo (SOARES; ALMEIDA, 2001).

Na microbacia com plantio comercial de eucalipto, a maior proporção da precipitação pluvial incidente passou pelo dossel das árvores (90%). Este valor representa a quantidade efetiva de água que chega na camada superficial do solo, também denominada de precipitação interna. No estudo de interceptação da precipitação em plantios jovens de eucalipto na mesma região de presente trabalho, Neto (2001) encontrou porcentagens de precipitação interna entre 83 e 92%, aos 1 e 2 anos de idade.

Tabela 13 - Valores de precipitação, evapotranspiração real, transpiração, evaporação da água do solo e interceptação em uma microbacia com plantios comerciais de eucalipto

Data	Precipitação (mm)	ET _r (mm)	T (mm)	E _{solo} (mm)	I (mm)
06/01/09	1,52	4,32	3,66	0,66	0,005
18/01/09	38,87	4,78	3,83	0,66	0,298
27/01/09	2,29	2,29	1,78	0,25	0,252
25/02/09	16,00	3,79	3,21	0,48	0,110
07/04/09	6,86	3,48	2,32	0,39	0,779
28/06/09	2,79	1,51	1,24	0,26	0,013
26/08/09	2,79	0,47	0,32	0,05	0,103
22/09/09	5,08	1,17	0,68	0,03	0,465
30/09/09	5,08	0,59	0,38	0,10	0,110
08/10/09	3,56	0,82	0,66	0,05	0,102
20/10/09	9,91	2,82	1,78	0,24	0,811
29/10/09	19,05	0,79	0,66	0,06	0,071
29/11/09	3,56	3,30	2,69	0,30	0,309
30/11/09	4,57	3,45	2,55	0,42	0,479
01/12/09	12,45	4,16	1,85	0,30	2,013
03/12/09	2,54	3,19	2,44	0,43	0,324
05/12/09	32,77	5,53	0,73	0,14	4,654
06/12/09	8,38	3,32	1,80	0,36	1,154
14/12/09	12,70	3,87	0,79	0,08	2,995
18/12/09	9,91	4,68	3,20	0,51	0,969
21/12/09	1,78	5,23	4,32	0,70	0,212
23/12/09	4,32	4,41	3,45	0,48	0,479
25/12/09	1,27	2,98	2,31	0,37	0,302
28/12/09	6,60	4,66	2,40	0,37	1,886
29/12/09	3,05	2,69	1,89	0,31	0,501
31/12/09	2,29	3,05	1,32	0,18	1,548
Total	220,00	81,37	52,25	8,18	20,94

Tabela 14 - Valores de precipitação, evapotranspiração real, transpiração e interceptação em uma microbacia cultivada com pastagem

Data	Precipitação (mm)	ET _r (mm)	T (mm)	I + E _{sol} o (mm)
08/02/09	5,50	2,94	2,68	0,257
13/02/09	5,50	2,05	2,05	0,008
25/02/09	3,00	2,74	2,55	0,195
19/03/09	4,57	1,40	0,86	0,544
25/03/09	5,00	1,75	0,48	1,270
27/03/09	7,50	2,43	1,81	0,621
01/04/09	30,50	2,12	1,58	0,540
02/04/09	3,00	2,17	1,95	0,225
15/04/09	3,50	2,87	2,26	0,610
02/05/09	2,50	2,43	1,45	0,982
13/06/09	5,00	2,33	0,67	1,658
26/08/09	2,79	1,90	0,67	1,226
22/09/09	5,08	3,34	0,90	2,442
30/09/09	5,08	3,64	1,15	2,492
08/10/09	3,56	2,64	0,99	1,654
13/10/09	1,27	3,12	2,87	0,247
22/10/09	40,64	0,91	0,40	0,516
27/10/09	3,05	1,16	1,09	0,070
28/10/09	5,08	1,42	0,89	0,528
29/10/09	19,05	2,58	0,58	2,001
30/10/09	8,13	1,53	0,86	0,670
01/11/09	17,78	2,43	1,39	1,042
02/11/09	10,67	1,77	1,59	0,181
04/11/09	4,32	1,83	1,51	0,317
08/11/09	8,64	3,46	2,80	0,663
30/11/09	4,57	2,48	1,52	0,959
01/12/09	12,45	2,91	1,57	1,337
05/12/09	32,77	4,14	0,98	3,152
06/12/09	8,38	3,27	1,50	1,764
14/12/09	12,70	4,44	1,36	3,081
Total	281,57	74,21	42,96	31,25

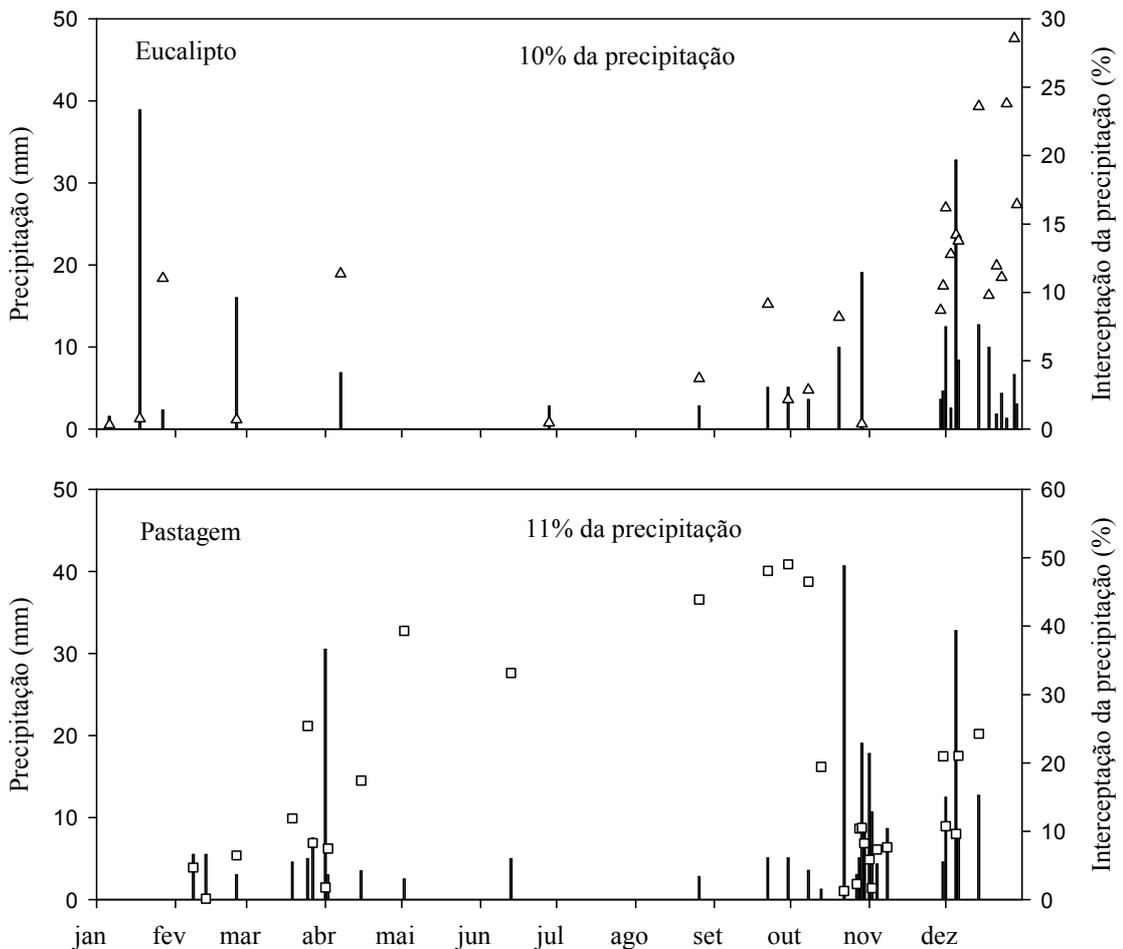


Figura 14 - Eventos de precipitação (barras), porcentagem interceptada (triângulos) pelo eucalypto e porcentagem interceptada + evaporado no solo (quadrados) sob pastagem.

Os valores de interceptação da precipitação pluvial em plantios florestais estão, entre outros fatores, relacionados com as características do cultivo, como IAF, densidade de árvores e arquitetura da copa (OLIVEIRA et al., 2008). No município de Santa Bárbara, leste de Minas Gerais, Leite (1996) encontrou uma relação linear entre precipitação interna e densidade populacional. Considerando que neste trabalho a cultura está no final do ciclo e o IAF está em torno de $2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Figura 2), os valores de interceptação encontrados foram satisfatórios e se assemelham aos resultados encontrados em outros estudos (LIMA, 1976; VALENTE et al., 1997).

Nos 30 dias selecionados na MPDII, o total evapotranspirado foi de 74 mm. Deste total, 38 mm foram interceptados pela cultura e evaporados diretamente do solo, o que equivale a aproximadamente 11% do total precipitado nestes dias, valores

semelhantes aos encontrados em outros trabalhos de interceptação em pastagem (ATAROFF; SANCHEZ, 2000; ATAROFF; NARANJO, 2009).

A partir destes resultados, é importante salientar que o interceptado pela pastagem, mais o evaporado do solo, foi apenas 1% superior ao total interceptado no eucalipto. Maiores valores eram esperados, uma vez que, dois ($E_{\text{solo}} + I$) foram os componentes considerados. Nesta microbacia, a contribuição do componente interceptação no processo total de ET_r foi pequena. Esta baixa porcentagem interceptada por parte da pastagem pode estar relacionada com as más condições em que a cultura se encontra, principalmente em alguns meses do ano. Sendo uma microbacia degradada, nenhum tipo de trato cultural é adotado, fazendo com que, nos meses com deficiência de água no solo (maio a setembro), a cultura esteja em estado de senescência, perdendo biomassa, altura e IAF. Como discutido anteriormente, fatores morfológicos e fisiológicos são responsáveis pelo processo da interceptação, além das características da chuva. Além disso, os baixos valores de $E_{\text{solo}} + I$ encontrados podem estar relacionados com a superestimativa dos valores transpirados.

Observa-se a existência de uma relação inversa entre os totais precipitado e interceptado (Figura 14). Quanto maior a quantidade de precipitação incidente, menores foram os valores interceptados e/ou interceptados mais o evaporado do solo. O mesmo comportamento observado em plantios comerciais de eucalipto (SOARES; ALMEIDA, 2001) e em áreas cultivadas com pastagem (ATAROFF; NARANJO, 2009). Isso pode ser explicado pela capacidade de retenção da água da chuva pelas folhas e tronco. Nos eventos com elevada intensidade e longa duração da precipitação, a capacidade de armazenamento logo é atingida. Com isso, o excesso de água começa a escoar pelas folhas e troncos, atingindo o solo. Isso mostra que o processo da interceptação está em função das características da precipitação, sendo possível com isso, estabelecer uma relação entre as duas variáveis.

Com base no exposto acima, modelos de regressão foram ajustados entre o total incidente precipitado e o interceptado pelas duas culturas (Tabela 15). No eucalipto o modelo ajustado apresentou melhor desempenho, com coeficiente de determinação igual a 0,8. Apesar de apresentar um valor baixo para a microbacia com pastagem, os modelos ajustados podem ser utilizados na estimativa da interceptação da precipitação pluvial em microbacias cultivadas com eucalipto e pastagem.

Tabela 15 - Modelos de regressão ajustados entre a precipitação incidente (P) e o total interceptado da precipitação pluvial (I) em plantios de eucalipto aos 6 anos de idade e o total interceptado da precipitação pluvial + o evaporado do solo ($I + E_{\text{solo}}$) sob pastagem, todos em milímetros

Microbacia	Cobertura vegetal	Equação	r^2
MECII	Eucalipto	$I = 0,1492P - 0,0575$	0,8
MPDII	Pastagem	$I + E_{\text{solo}} = 0,0752P + 0,5133$	0,3

5.3. Estudo das vazões

5.3.1. Caracterização da precipitação pluvial

Na Figura 15, são apresentados o total precipitado (Figura 15a) no mês e o histograma de frequência da intensidade (Figura 15b) de precipitação (mm h^{-1}) ocorrido no ano de 2010. A amplitude de cada classe do histograma de frequência foi de 5 mm h^{-1} .

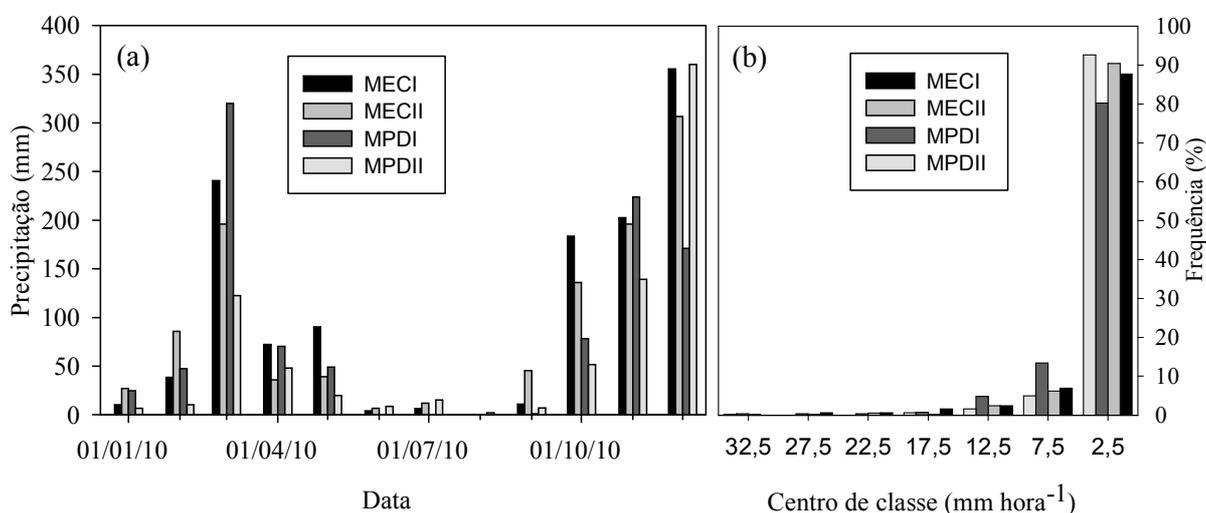


Figura 15 - (a) Precipitação pluvial mensal e (b) histograma de classes de intensidade de precipitação pluvial (mm h^{-1}).

Em relação à precipitação total anual, o ano pode ser considerado atípico nas MECII, MPDI e MPDII, com valores abaixo da média histórica. Nas MECII e MPDI, o total anual precipitado foi praticamente semelhante, com 1086 e 985 mm, respectivamente, uma diferença de apenas 100 mm. Na MPDII a chuva acumulada no ano foi de apenas 790 mm e na MECI foi de 1214 mm, o maior valor observado entre as microbacias.

O comportamento mensal da precipitação pluvial foi semelhante entre as microbacias. Caracterizado por um inverno seco e verão moderadamente chuvoso. Os totais precipitados nos dois primeiros meses do ano foram abaixo do normal (< 100 mm) e no mês de agosto, o total precipitado nas microbacias foi inferior a 5 mm.

A distribuição de frequência das classes de precipitação também foi semelhante durante o ano de 2010 nas quatro microbacias, mesmo estando estas localizadas em diferentes sítios climáticos da bacia do rio Doce. As maiores frequências (80%) de valores de precipitação foram observadas nas classes com intensidade de até 5 mm h^{-1} . Considerando que os valores de taxa de infiltração estável de água no solo das microbacias são superiores a 30 mm h^{-1} (Tabela 5), a maior parte da precipitação incidente no ano de 2010 foi infiltrada no solo, reabastecendo o lençol freático.

5.3.2. Evapotranspiração das microbacias

Na Figura 16 podem ser vistos os valores mensais de evapotranspiração (ET_{bacia}). Os totais evapotranspirado nas microbacias com eucalipto foram superiores em relação às microbacias com pastagem, com um total anual de 1.158 mm em MECI, 980 mm em MECII, 816 mm em MPDI e 541 mm em MPDII. Observa-se uma relação direta entre o total evapotranspirado e o total precipitado no ano de cada microbacia. Resultado semelhante ao encontrado em Zhang et al. (2001) a partir da comparação dos valores evapotranspirado e precipitado no ano em microbacias cultivadas com florestas de eucalipto e pastagem na Austrália.

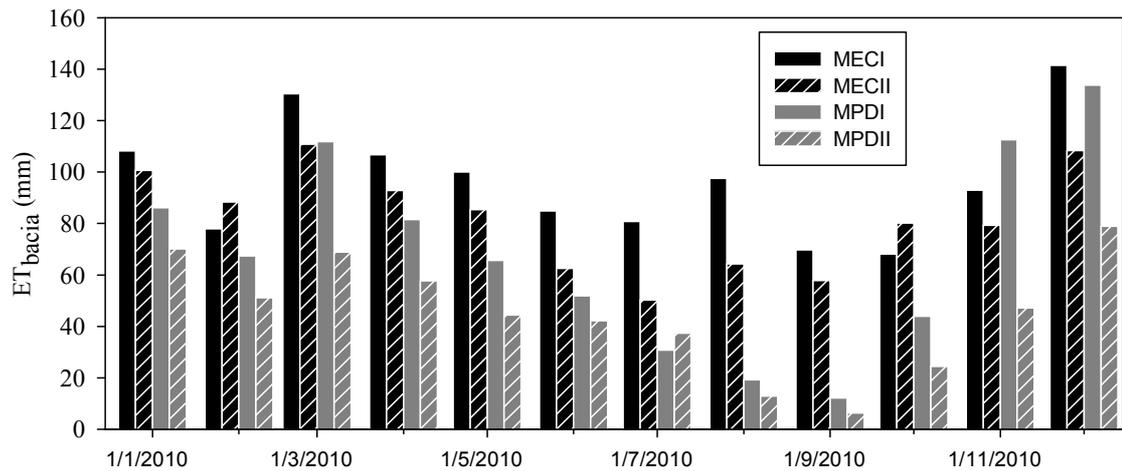


Figura 16 - Evapotranspiração mensal microbacias no ano de 2010.

As diferenças na evapotranspiração entre as microbacias com o mesmo tipo de cobertura do solo, eucalipto ou pastagem, estão associadas com as diferenças de clima e do total precipitado entre estas. Os sítios climáticos das MECI e MPDI, na porção média do rio Doce, apresentam uma demanda evapotranspirativa maior que a dos sítios em que estão localizadas as demais microbacias, sendo responsáveis, em partes, pelas diferenças de ET_{bacia} encontradas nas microbacias com o mesmo tipo de cobertura vegetal.

5.3.3. Estudo das vazões e do escoamento superficial

Na Tabela 16 são apresentadas as vazões, os totais precipitado e evapotranspirado, as lâminas e os coeficientes de escoamento superficial, além de outros parâmetros analisados.

A relação entre os totais evapotranspirado e precipitado no ano foi sempre superior ($> 0,9$) nas microbacias com eucalipto, comprovando o maior consumo de água por parte da espécie florestal em relação à pastagem. Mesmo 2010 sendo um ano com valor precipitado abaixo da média histórica nas regiões da MECI e MECII, os valores da relação $ET_{bacia} P^{-1}$ foram menores do que os encontrados por Almeida & Soares (2003), no estudo de comparação entre o uso de água em plantações de eucalipto e floresta de Mata Atlântica, na costa leste do Brasil.

Tabela 16 - Precipitação (P), evapotranspiração microbacia (ET_{bacia}), relação entre o total evapotranspirado e precipitado no ano (ET/P), vazão mínima ($q_{95\%}$), média ($q_{\text{média}}$) e máxima (q_{max}), lâmina (LE) e coeficiente de escoamento (CE), dado pela razão entre a LE_{total} e a P

Microbacia	P (mm)	ET_{bacia} (mm)	ET/P	$q_{\text{média}}$ ($Ls^{-1}km^{-2}$)	LE_{total} (mm)	CE (%)	$q_{95\%}$ ($Ls^{-1}km^{-2}$)	LE_{sub} (mm)	LE_{sup} (mm)	q_{max} ($Ls^{-1}km^{-2}$)	$LE_{\text{sup}}/$ P (%)
MECI	1214	1159	0,95	3,5	111	9,1	-	73,5	37,6	690	3,0
MECII	1086	981	0,90	4,2	133	12,2	3,2	125,7	7,4	27	2,5
MPDI	985	814	0,82	7,0	216	22,0	3,8	168,0	71,0	323	7,0
MPDII	790	542	0,68	9,0	285	36,0	5,7	247,0	37,7	73	5,0

Esta elevada relação ($ET_{\text{bacia}} P^{-1}$) nas microbacias com eucalipto, refletiu na vazão específica média anual ($q_{\text{média}}$), sendo os menores valores observados nestas microbacias. Isto significa, no período analisado, uma menor disponibilidade hídrica nas microbacias cultivadas com florestas de eucalipto em relação às microbacias cultivadas com pastagem.

Mesmo apresentando uma maior taxa de infiltração estável de água no solo (150 mm h^{-1}), os valores infiltrados não foram convertidos em lâmina de escoamento na MECII, sendo utilizados pela vegetação no processo de evapotranspiração, não validando uma das hipóteses consideradas no trabalho. O maior consumo de água por parte dos plantios florestais também interferiu nas lâminas e no coeficiente de escoamento, resultado semelhante ao de outros trabalhos em microbacias com as mesmas coberturas vegetais (NOTTER et al., 2007; FARLEY et al., 2005; VON STACKELBERG et al., 2007). As maiores porcentagens de precipitação convertidas em escoamento (CE) foram observadas nas microbacias com pastagem, com os maiores valores de lâmina escoada encontradas. Em estudos realizados no Kenya (NOTTER et al., 2007) e na Tailândia (THANAPAKPAWIN et al., 2007) as lâminas de escoamento em microbacias com atividade silvicultural tiveram uma redução de até 70% em relação às microbacias com atividade agropecuária.

A vazão mínima ($q_{95\%}$) também foi maior nas microbacias cultivadas com pastagem. Na MPDII, com o menor total evapotranspirado no ano, a vazão mínima foi superior em 2,5 L (43%) em relação à MECII, localizada na mesma condição climática. Novamente, como observado na vazão média e nas lâminas de escoamento, percebe-se uma estreita relação entre as vazões mínimas do período de estiagem e o total evapotranspirado nas microbacias. Na MECI, com menor área de drenagem (12 ha),

esta associação não pôde ser realizada, pois no ano de 2010, não foi observada vazão mínima, uma vez que se trata de uma microbacia intermitente, estando em boa parte do ano sem escoamento na seção de deságüe. O tamanho reduzido desta microbacia não permite o afloramento do lençol e conseqüentemente o surgimento de uma nascente, assegurando o escoamento durante todo o ano.

Os maiores valores de escoamento superficial (q_{sup}) foram observados nas microbacias cultivadas com pastagem, o que já era esperado devido aos picos de vazão máxima encontrados nestas microbacias. Considerando todo o período monitorado, foi escoado superficialmente um valor próximo de 71 e 37 mm nas MPDI e II, respectivamente, correspondendo a 7 e 5% do total precipitado nestas microbacias. Estes valores foram superiores aos encontrados por Brito et al. (2005) em áreas com pastagem (0,78%) no leste de Minas Gerais. Nas MECI e II, os valores de q_{sup} foram menores, com um total aproximado de 37 e 7 mm, sendo 3 e 2% da precipitação incidente nestas microbacias. Resultados semelhantes foram encontrados por Silva et al. (2011) em plantios comerciais de eucalipto localizados na bacia do rio Doce em Minas Gerais. Os baixos valores de escoamento superficial nas MEC estão associados com a cobertura florestal, a qual intercepta uma maior porcentagem da precipitação pluvial e promove melhorias nas características físicas destes solos, como a porosidade e as taxas de infiltração estável de água no solo. Os baixos valores de q_{sup} encontrados na MPDII podem ter ocorrido por causa da influência do reservatório (açude) existente.

De modo geral, as vazões máximas foram superiores nas microbacias com pastagem, com exceção da MECI. O comportamento da vazão máxima evidencia a condição hídrica atual da microbacia e corresponde à interação de vários fatores anteriormente apresentados, como os parâmetros de forma e as classes de uso do solo. O elevado valor observado nesta microbacia está associado com a alta porcentagem de estradas vicinais existentes em seu interior e a baixa taxa de infiltração estável de água no solo (30 mm h^{-1}), inferior às microbacias com pastagem. A pequena área de drenagem e o menor tempo de concentração (T_c) entre as microbacias analisadas também contribuem para a vazão máxima encontrada.

Na Figura 17 podem ser visualizadas as vazões específicas e a precipitação pluvial diária em 2010. É possível perceber uma diferença entre as microbacias cultivadas com eucalipto e com pastagem no comportamento da vazão específica diária. Em MPDI, os valores de vazão são caracterizados por uma rápida ascensão, no início de

um evento de precipitação, seguido por um decaimento abrupto, diferente MECII, com curvas de ascensão e decaimento mais suaves.

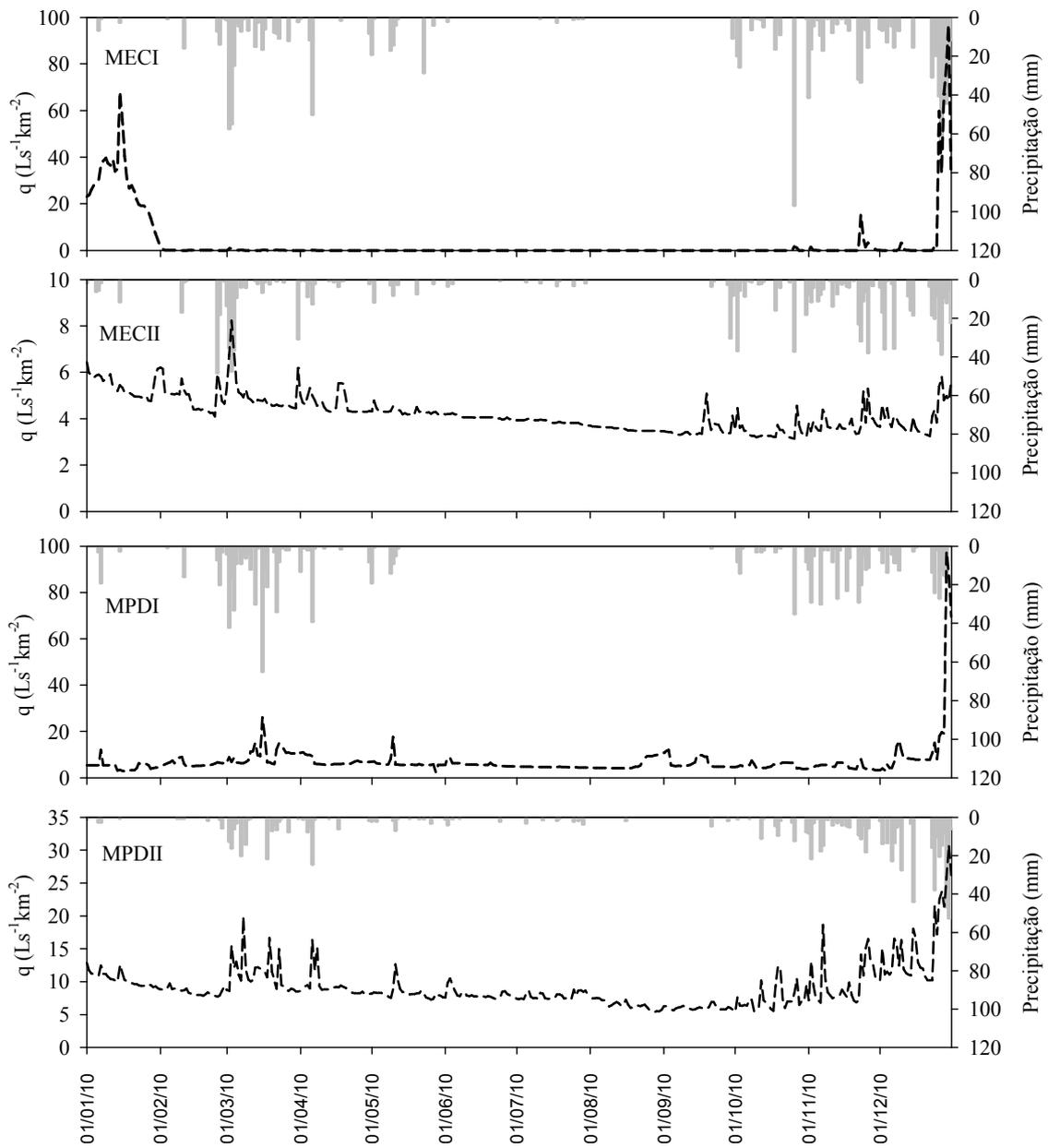


Figura 17 - Valores de precipitação pluvial (linha sólida cinza) e vazão específica média diária (linha escura tracejada) observada em 2010 nas quatro microbacias.

O efeito da floresta de eucalipto sobre a regularização da vazão pode ser confirmado pela baixa diferença encontrada entre os valores de vazão observados na MECII, comprovando a hipótese dos benefícios da floresta para com a conservação e manutenção do solo e da água. Além do tipo de cobertura (floresta de eucalipto), responsável pela melhoria e conservação das características físicas do solo, os bons resultados morfométricos encontrados na MECII também contribuíram para a regularização da vazão. Na MECI os elevados valores de q_{\max} destoam do observado em MECII. Esta diferença pode estar associada com a baixa área de drenagem e a elevada porcentagem de estradas vicinais em seu interior.

Na Figura 18 são apresentadas as curvas de permanência dos valores de vazão específica diária para as quatro microbacias. É possível perceber claramente, uma diferença no comportamento da curva de permanência entre as quatro microbacias, principalmente entre aquelas cultivadas com eucalipto e pastagem. No início, as curvas de permanência das microbacias com pastagem (Figura 18c e d) caem rapidamente, formando um ângulo de quase de 90° entre a abscissa e a ordenada. Já nas microbacias com eucalipto, o decaimento é lento, mostrando os benefícios da floresta sobre a regularização das vazões de microbacias hidrográficas.

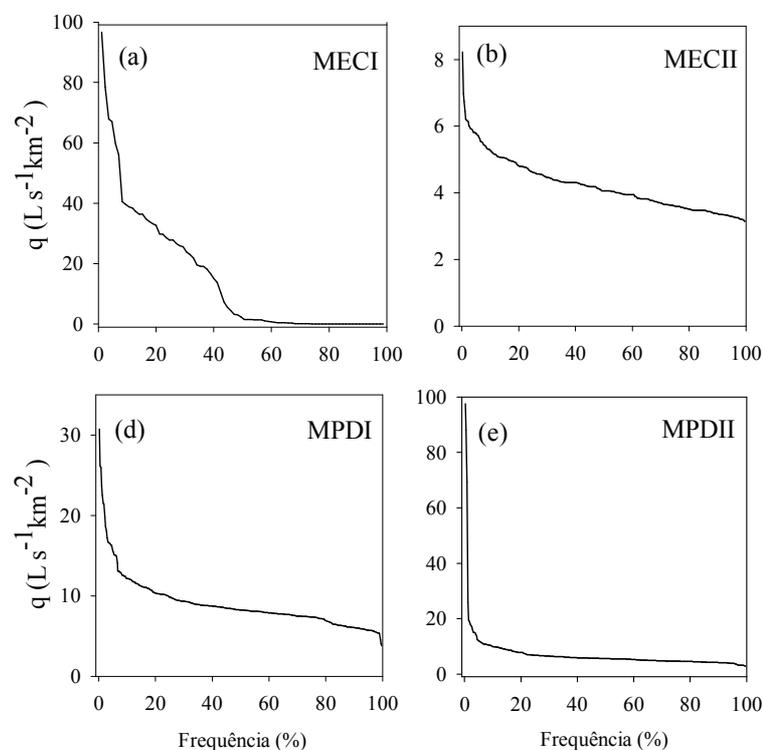


Figura 18 - Curva de permanência: (a) MECI, (b) MECII, (c) MPDI e (d) MPDII.

5.4. Modelagem do balanço hídrico

5.4.1. Condições meteorológicas

A precipitação mensal, irradiância solar média mensal, o DPV médio mensal e a temperatura média mensal são mostrados nas Figuras 19 e 20. O ano de 2009 foi mais chuvoso do que o de 2010 nas quatro microbacias.

Nos três primeiros meses do ano de 2009 o total precipitado na MECII foi maior que em MECI. O comportamento da irradiância solar, da temperatura do ar e do DPV foi semelhante entre as duas microbacias com eucalipto durante os anos analisados, com os maiores valores observados na MECI. A temperatura do ar média mensal na MECII foi 4°C inferior em relação à MECI. O valor médio mensal de DPV nos dois anos analisados foi de 0,8 e 0,5 kPa em MEC I e II.

O comportamento sazonal das variáveis ambientais também fora semelhante nas MPDI e MPDII, com maiores valores de irradiância solar, de temperatura do ar e do DPV observados na MPDI, exceto nos meses 5 e 6 de 2010, nos quais os maiores valores de DPV foram observados em MPDII. Em média, a temperatura do ar foi superior em 2°C na MPDI. Os valores médios de DPV foram de 0,8 e 0,6 kPa, em MPD I e II, respectivamente.

As microbacias com mesmo uso da terra se encontram em condições climáticas distintas. As MECI e MPDI estão sob influência de um mesmo tipo climático, com elevada demanda evapotranspirativa e com temperatura do ar elevada. Já as MECII e MPDII apresentam um clima com menor demanda evapotranspirativa e com baixas temperaturas do ar.

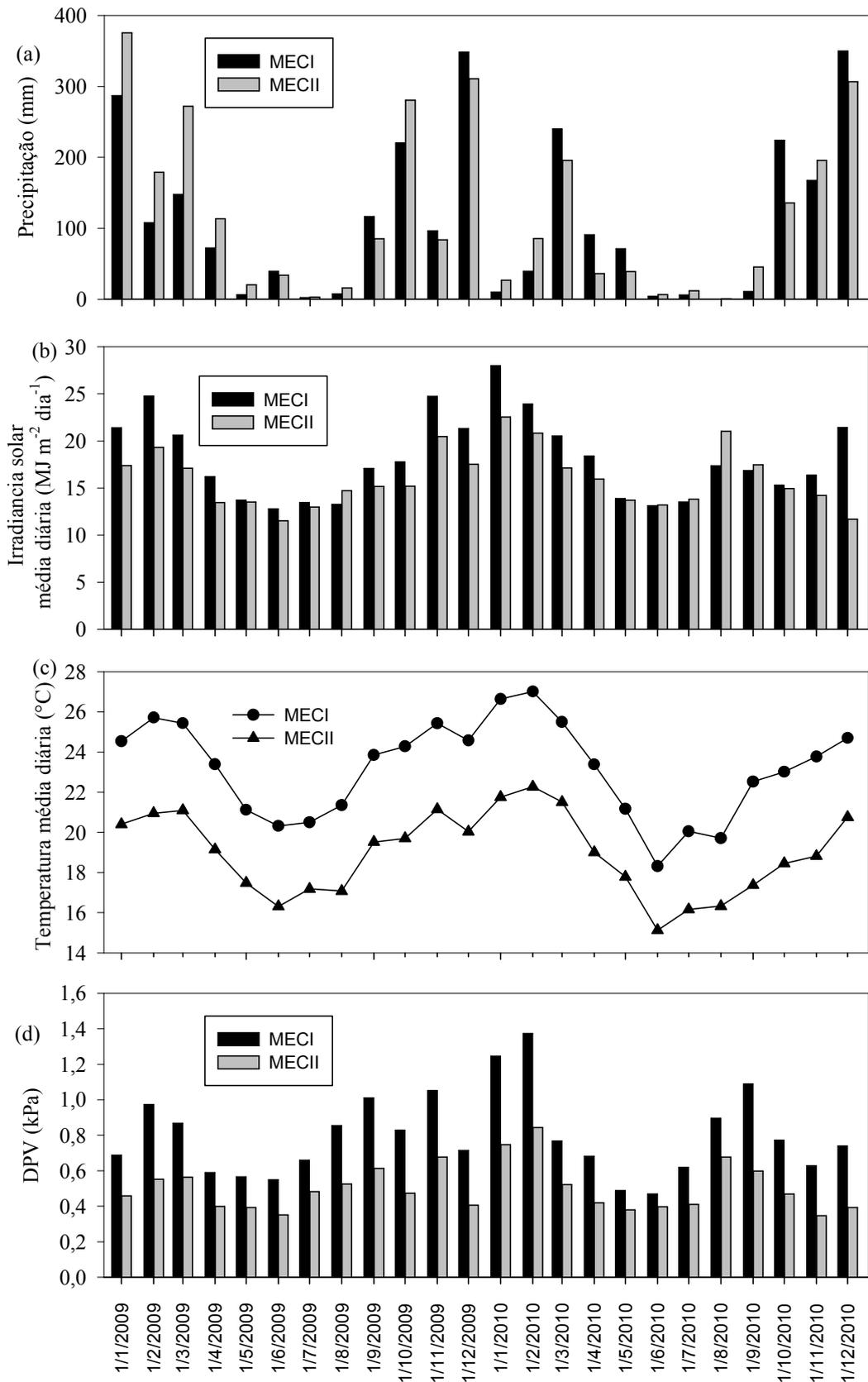


Figura 19 - (a) Precipitação mensal, (b) irradiância solar média, (c) temperatura média diária, e (d) DPV médio diário.

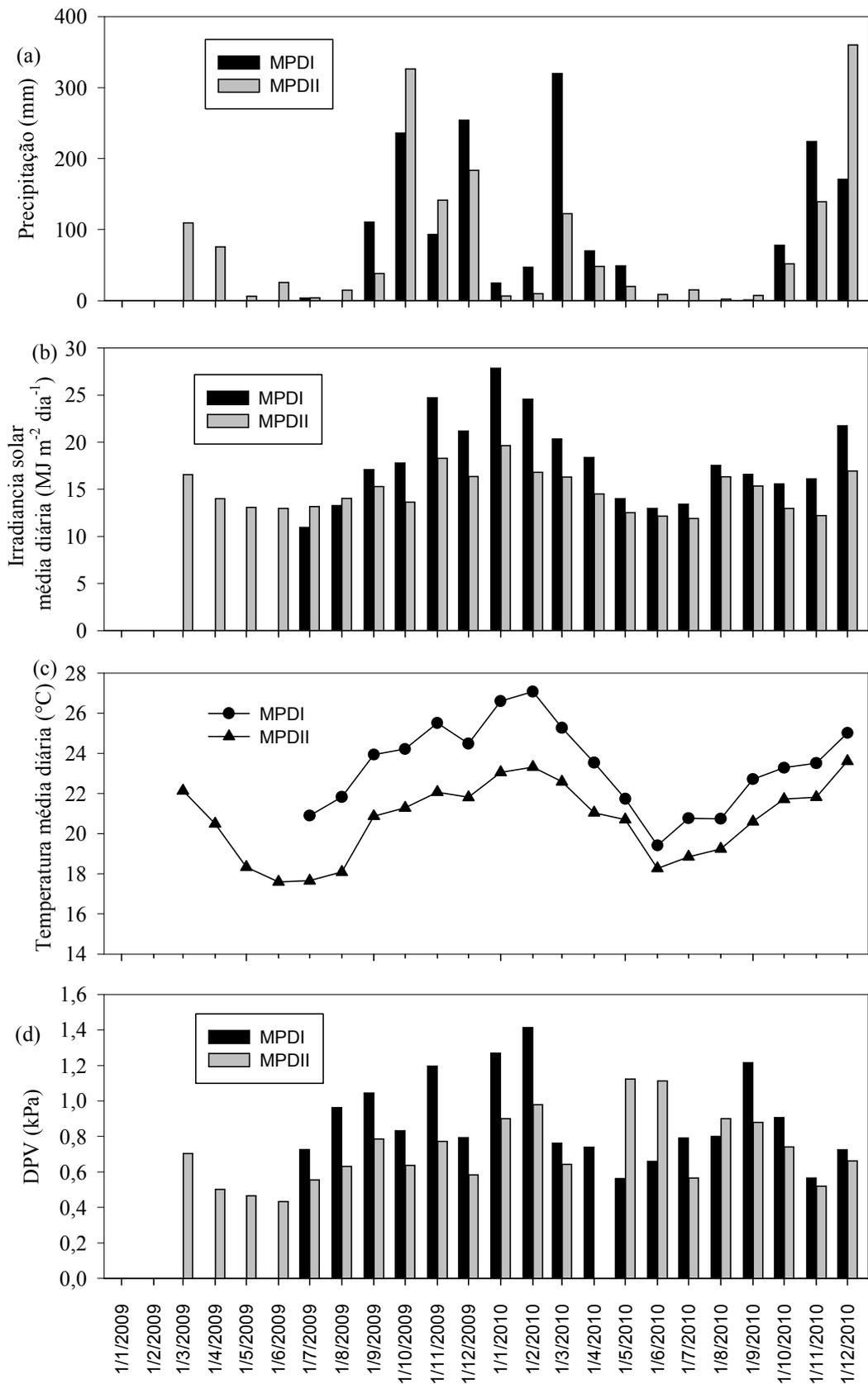


Figura 20 - (a) Precipitação mensal, (b) irradiância solar média, (c) temperatura média diária e (d) DPV médio diário.

5.4.2. Componentes do balanço hídrico

5.4.2.1. Período entre janeiro e dezembro de 2009

A Tabela 17 apresenta os principais componentes de entrada e saída de água nas microbacias no ano de 2009.

Tabela 17 - Principais componentes do balanço hídrico entre: janeiro a dezembro de 2009 para as MEC I e II; julho a dezembro de 2009 para MPDI; fevereiro a dezembro de 2009 para MPDII

Componente	MECI	%	MECII	%	MPDI	%	MPDII	%
<i>Entrada</i>								
Precipitação	1451	-	1773	-	697	-	1025	-
<i>Saídas</i>								
Transpiração	863	59	611	34	351	50	586	57
Interceptação	182	13	212	12	-	-	-	-
Evaporação solo	102	7	98	6	-	-	-	-
Evaporação solo + interceptação	-	-	-	-	78	11	79	8
Evapotranspiração reserva	155	11	185	10	8	1	92	9
Evapotranspiração total	1301	90	1107	62	436	63	757	74
Drenagem profunda	115	8	611	34	200	29	227	22
Escoamento superficial	41	2	18	1	24	3,5	50	5
<i>Saída total*</i>	1458	100	1736	98	659	95	1003	101
<i>Varição estoque</i>	-7	-	37	-	38	-	-9	-
<i>Deflúvio</i>	66		200		112		215	

* Evapotranspiração total + Drenagem profunda + Escoamento superficial.

Em 2009, a precipitação foi 322 mm superior na MECII em relação à MECI. No mesmo ano, a evapotranspiração total foi composta por 90 e 62% da precipitação nas microbacias com eucalipto, MECI e MECII, respectivamente. Além de estar localizada em uma região com menor demanda evapotranspirativa, a baixa porcentagem de ET na MECII está associada ao alto valor precipitado no ano, bem acima da média histórica. A transpiração é a maior constituinte do processo total de evapotranspiração nestas microbacias, com 59 e 34% do total evapotranspirado, com média diária de 2,3 e 1,6 mm em MECI e MECII.

O segundo maior componente do processo de ET nas microbacias com plantios florestais foi a interceptação da precipitação pluvial (I), composta por 13 e 12 % do total precipitado nas MECI e MECII durante o ano de 2009. Valores de interceptação da

precipitação pluvial semelhantes foram encontrados por Lane et al., (2004) em plantios de eucalipto na região sudeste da China. Apesar dos plantios florestais da microbacia MECII possuírem IAF maior que os plantios da MECI, a menor porcentagem de I encontrada em MECII está associada ao elevado valor precipitado no ano.

Apesar de ser desconsiderada na maioria dos estudos de modelagem do balanço hídrico de microbacias hidrográficas, a evaporação do solo mostrou ter uma participação importante no processo de ET nos plantios de eucalipto, com porcentagem média em relação à chuva de 6,5%, valor semelhante ao encontrado por Soares & Almeida (2001) em plantios de eucalipto aos nove anos de idade. A contribuição da evapotranspiração da reserva de Mata Atlântica no processo total da ET das microbacias florestais também foi relevante, com 10% evapotranspirado em relação à precipitação incidente no ano.

A drenagem profunda foi 496 mm superior na MECII em relação à MECI, correspondendo a 34% do total precipitado no ano. O elevado valor de D_{prof} encontrado na MECII está relacionado, em grande parte, com as características físicas do solo desta microbacia, como os elevados valores de porosidade e taxa de infiltração estável de água no solo.

Em relação ao deflúvio total observado na MECII nota-se que, do total drenado profundamente no ano, apenas 180 mm saíram na foz da microbacia na forma de escoamento subterrâneo. Isso indica que aproximadamente 430 mm foram percolados para o aquífero subterrâneo.

O componente do balanço hídrico com menor contribuição em relação ao total precipitado nas microbacias com eucalipto foi à lâmina de escoamento superficial, com porcentagem de 2 e 1% na MECI e MECII, respectivamente. A modelagem do balanço hídrico fechou com uma variação no estoque das duas microbacias de apenas -7 e 37 mm, mostrando o bom desempenho do modelo.

Nas microbacias com pastagem, a evapotranspiração total foi composta por 63 e 74% da precipitação incidente, na MPDI e MPDII, respectivamente. A transpiração também é a maior constituinte do processo total de evapotranspiração nestas microbacias, com 50 e 57% do valor total evapotranspirado, com média de 1,9 e 1,6 mm na MPDI e MPDII, respectivamente. A contribuição da interceptação da precipitação pluvial somada à evaporação do solo nestas microbacias foi de 11 e 8%. Já os valores de drenagem profunda foram, em média, maiores do que os observados nas microbacias com plantios de eucalipto, com 29 e 22% do valor total precipitado no período.

5.4.2.2. Período entre janeiro e dezembro de 2010

A Tabela 18 apresenta para o ano de 2010 os principais componentes de entrada e saída de água nas microbacias.

Tabela 18 - Principais componentes do balanço hídrico das quatro microbacias entre janeiro e dezembro de 2010

Componente	MECI	%	MECII	%	MPDI	%	MPDII	%
<i>Entrada</i>								
Precipitação	1214	-	1086	-	985	-	790	-
<i>Saídas</i>								
Transpiração	783	64	589	54	677	69	345	44
Interceptação	144	12	128	12	-	-	-	-
Evaporação solo	95	8	86	8	-	-	-	-
Evaporação solo + interceptação	-	-	-	-	121	12	103	13
Evapotranspiração reserva	137	11	178	16	16	2	93	12
Evapotranspiração total	1159	95	981	90	814	83	542	69
Drenagem profunda	14	1	133	12	176	18	222	28
Escoamento superficial	40	3	7	0,7	48	5	38	5
<i>Saída total*</i>	1212	99	1121	103	1038	105	801	101
<i>Variação estoque</i>	2	-	-35	-	-54	-	-11	-
<i>Deflúvio</i>	111		133		216		285	

* Evapotranspiração total + Drenagem profunda + Escoamento superficial.

Em 2010, a precipitação foi 128 mm superior em MECI em relação à MECII. No mesmo ano, a evapotranspiração total foi composta por 95 e 90% da precipitação nas microbacias com eucalipto, MECI e MECII, respectivamente. A transpiração é a maior constituinte do processo total de evapotranspiração nestas microbacias, com 64 e 54% do total evapotranspirado, com média diária de 2,1 e 1,6 mm na MECI e MECII, respectivamente. Também foram observados na MECII, os menores valores das variáveis ambientais R_g , DPV e temperatura do ar, fazendo com que o total T seja menor nesta microbacia. Isso mostra que o clima é o principal responsável pelas diferenças encontradas na transpiração entre as microbacias.

O segundo maior componente do processo de ET na MECI foi a interceptação da precipitação pluvial (I), composta por 12 % do total precipitado. Na MECII, a segunda maior contribuição no processo total da ET da microbacia foi a evapotranspiração da Mata Atlântica. A porcentagem de água da chuva interceptada

pelas florestas de eucalipto foi semelhante nas duas microbacias. A contribuição da evaporação do solo no total evapotranspirado nas microbacias florestais foi de 8%.

A drenagem profunda foi 119 mm superior na MECII em relação à MECI, correspondendo a 12% do total precipitado no ano. Comparando os valores de D_{prof} com o deflúvio gerado na MECII, pode-se observar que praticamente todo este valor foi convertido em escoamento subterrâneo. Novamente, o componente do balanço hídrico com menor contribuição em relação ao total precipitado nas microbacias com eucalipto foi à lâmina de escoamento superficial, com porcentagem de 3 e 0,7% na MECI e MECII, respectivamente. A variação no estoque no final do ano foi de apenas 2 e -35 mm, nas MEC I e II mostrando o bom desempenho do modelo.

Nas microbacias com pastagem, a evapotranspiração total foi composta por 83 e 69% da precipitação incidente, na MPDI e MPDII, respectivamente. A transpiração também é a maior constituinte do processo total de evapotranspiração nestas microbacias, com 69 e 44% do valor total evapotranspirado, com média de 1,8 e 0,9 mm na MPD I e II. A mesma relação encontrada nas microbacias com eucalipto também foi verificada para os valores de T nas microbacias com pastagem, sendo o clima o principal responsável pela diferença de 25% encontrada entre o valor total transpirado nestas microbacias.

A contribuição da interceptação da precipitação pluvial somada à evaporação do solo nas microbacias com pastagem foi de 12 e 13%, na MPDI e MPDII, respectivamente.

Em média os valores de ET nas microbacias com eucalipto, foram superiores aos valores encontrados nas microbacias com pastagem, estando acima de 90% do total precipitado nas microbacias florestais e, no máximo, acima de 83% do total precipitado nas microbacias com pastagem.

Os valores de drenagem profunda foram, em média, maiores do que os observados nas microbacias com plantios de eucalipto, com 18 e 28% do valor total precipitado no período. A variação no estoque das duas microbacias cultivadas com pastagem fechou o ano com uma variação de -54 e -11 mm, comprovando o bom desempenho do modelo ajustados nestas microbacias.

Os valores de deflúvio nas microbacias com pastagem foram maiores do que os observados nas microbacias com eucalipto, mostrando que praticamente 100% do total drenado profundamente foram convertidos em escoamento subterrâneo.

5.4.2.3. Período total de análise

Na Tabela 19, podem ser visualizados os valores dos principais componentes do balanço hídrico, considerando os dois anos de análise e os períodos de coleta de dados das respectivas microbacias.

Tabela 19 - Componentes do balanço hídrico considerando os anos de 2009 e 2010: de janeiro de 2009 a dezembro de 2010 para MEC I e II; de julho de 2009 a dezembro de 2010 para MPDI; de fevereiro de 2009 a dezembro de 2010 para microbacia MPDII

Componente	MECI	%	MECII	%	MPDI	%	MPDII	%
<i>Entrada</i>								
Precipitação	2665	-	2858	-	1682	-	1815	-
<i>Saídas</i>								
Transpiração	1646	62	1200	42	1028	61	981	54
Interceptação	326	12	340	12	-	-	-	-
Evaporação solo	196	7	184	6	-	-	-	-
Evaporação solo + interceptação	-	-	-	-	198	12	153	8
Evapotranspiração reserva	292	11	364	13	24	1	185	10
Evapotranspiração total	2460	92	2088	73	1250	74	1318	73
Drenagem profunda	129	5	743	26	376	22	449	25
Escoamento superficial	81	3	25	0,5	72	4	87	5
<i>Saída Total*</i>	2670	100	2856	100	1697	101	1855	102
<i>Varição estoque</i>	-5	-	2	-	-16	-	-39	-
<i>Deflúvio</i>	177		332		330		501	

* Evapotranspiração total + Drenagem profunda + Escoamento superficial.

A principal saída de água nas microbacias é pelo processo de ET, sendo composta por 92 e 73% da precipitação incidente nas microbacias com eucalipto e 74 e 73% da precipitação incidente nas microbacias com pastagem. Mesmo estando a MECII em uma área com baixa demanda evapotranspirativa, a baixa porcentagem de ET encontrada em relação à entrada de água no sistema está associado ao elevado valor total precipitado no ano de 2010. A variação de água no reservatório do solo foi de -5, 2, -16 e -39 mm nas respectivas MECI, MECII, MPDI e MPDII. Os valores de drenagem profunda foram semelhantes ao total de deflúvio observado na saída de cada microbacia, com exceção da MECII, com uma D_{prof} de 400 mm em dois anos. Pôde-se observar que o excesso de água na MECII ficou armazenado no solo, não sendo convertido em escoamento na saída da microbacia.

Ao analisar os efeitos das diferentes coberturas do solo sobre os componentes do balanço hídrico, notam-se comportamentos diferentes entre as microbacias. Nas microbacias cultivadas com eucalipto, a maior porcentagem da água é consumida via processo de evapotranspiração, podendo chegar a 92% do total precipitado, enquanto nas microbacias com pastagem esta porcentagem foi em média 20% inferior. Esta diferença está refletida nos valores de deflúvio, em média 20% superiores nas microbacias cultivadas com pastagem.

A Figura 21 mostra as variações diárias de água disponível no solo até a profundidade do sistema radicular, estimada e medida, e os valores de precipitação pluvial nas quatro microbacias analisadas. Na Tabela 20 são apresentados os erros calculados entre os valores estimados e medidos de água disponível no solo das quatro microbacias. Em geral a concordância entre os valores é muito boa, com uma ligeira superestimativa dos valores estimados pelo modelo.

Nota-se uma clara correspondência entre os valores medidos e modelados de água disponível no solo, indicando que o modelo conseguiu descrever satisfatoriamente os principais componentes do balanço hídrico das microbacias analisadas. O modelo superestimou os valores de água disponível no solo em todas as microbacias, sendo os maiores valores estimados nas microbacias com eucalipto. Os erros calculados também foram maiores nas microbacias com eucalipto (Tabela 20). O bom desempenho do modelo indica que os valores estimados de evapotranspiração estão precisos, mesmo tendo sido superestimados na cultura da pastagem.

A análise conjunta dos dois anos comprova o equilíbrio entre o total evapotranspirado pelo cultivo florestal e o total precipitado. No ano de 2009, com excesso de precipitação pluvial, a água disponível no solo das MEC I e II no período seco (agosto a setembro) se manteve a 100 e 50 mm da capacidade total de água disponível (CAD), correspondendo a 25 e 17% deste valor. Situação semelhante foi encontrada nos trabalhos de Soares e Almeida (2001), Almeida e Soares (2003) e Lane et al. (2004). Analisando o ano de 2010, a água disponível no solo chegou próxima ao ponto de murcha permanente em todas as microbacias.

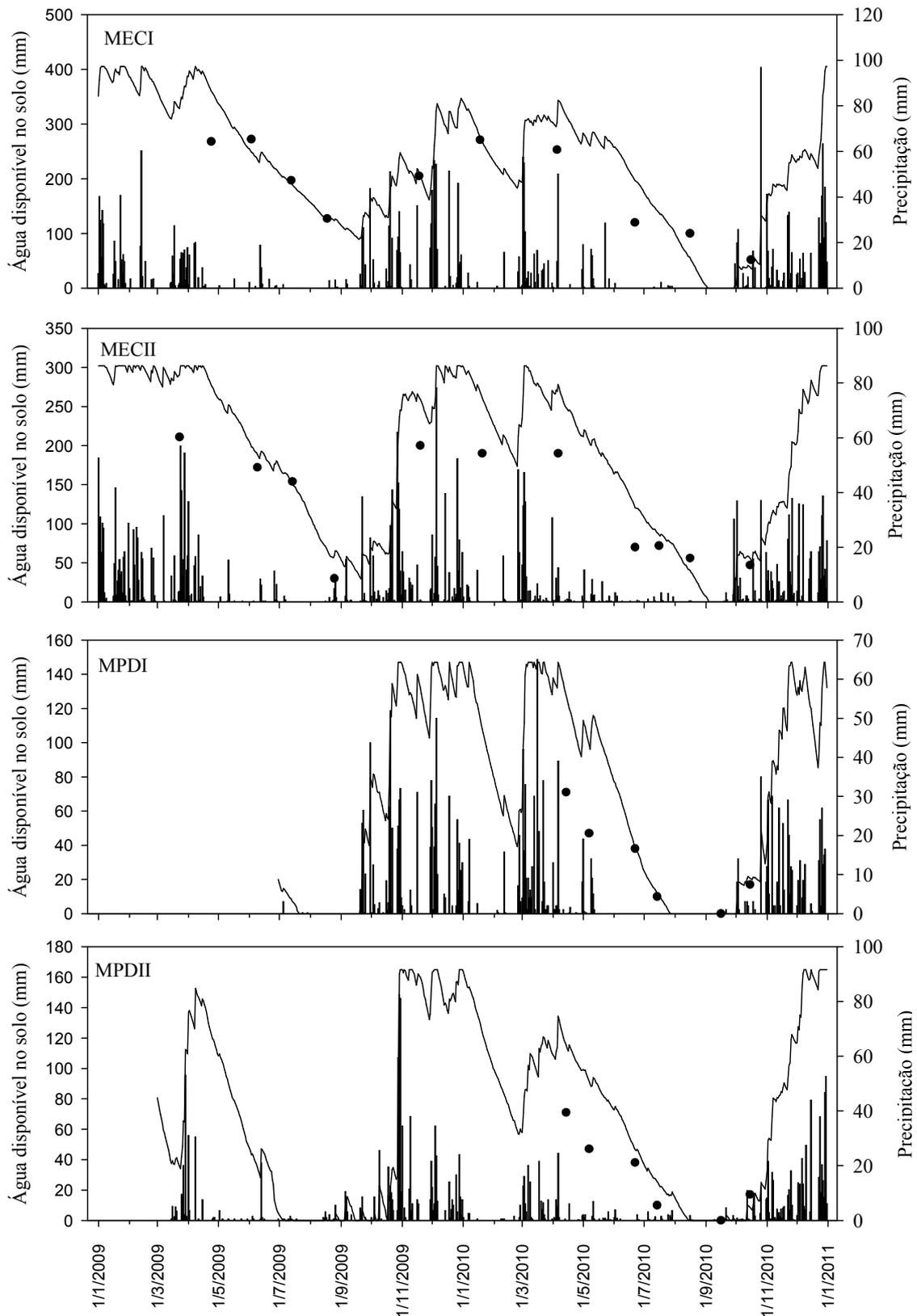


Figura 21 - Água disponível modelada (linha) e medida (círculo) até a profundidade do sistema radicular, com valores de precipitação pluvial (barras).

Tabela 20 - Estatísticas comparativas calculadas entre os valores de água disponível no solo modelada e medida em campo com sonda de nêutron e pelo método gravimétrico

Estatística	MECI	MECII	MPDI	MPDII
N.º pontos	10	11	6	6
r ²	0,90	0,95	0,96	0,99
RMS	38,28	26,35	5,77	6,16
MAE	28,57	46,78	3,70	3,84

6. CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas neste estudo, foi possível concluir que:

- a resistência estomática da pastagem foi superior às encontradas nas árvores de eucalipto;
- o modelo de resistência estomática ajustado na pastagem superestimou os valores de transpiração;
- a porcentagem interceptada em relação ao total da precipitação pluvial incidente foi de 10 e 11% no eucalipto e pastagem, respectivamente.
- os maiores valores de vazão mínima e média foram observados nas microbacias com pastagem;
- nas microbacias com pastagem foram gerados os maiores deflúvios;
- nas microbacias com eucalipto, a maior porcentagem da precipitação pluvial incidente é consumida via evapotranspiração.

REFERÊNCIAS

ACHARD, F.; STIBIG, H.J.; MAYAUX, P. et al. Determination of deforestation rates of the world's humid tropical. **Forests Science**, v. 297, p. 999-1002, 2002.

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

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA – AMS. **Números e índices de Minas Gerais até 2009**. Disponível em: <ftp://http://www.silviminas.com.br/Numeros Setor/Arquivos/numero setor_517.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2011.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA – AMS. **Notícia**. Disponível em: <ftp://http://www.silviminas.com.br/Noticia/Arquivos/noticia_710.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2012.

ATAROFF, M.; SANCHEZ, L.A. Precipitación, intercepción y escorrentía en cuatro ambientes de la cuenca media del río El Valle, estado Táchira, Venezuela. **Revista Geográfica Venezolana**, v. 41, p. 11-30, 2000.

ATAROFF, M.; NARANJO, M.E. Interception of water by pastures of *Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov. and *Melinis minutiflora* Beauv. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1616-1620, 2009.

BASTIAANSEN, W.G.; MENENTI, M.; FEDDES, R.A.; HOLTSLAG, A.A. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1: Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212, p. 198-212, 1998.

BLANKEN, P.D.; BLACK, T.A. The canopy conductance of a boreal aspen forest, Prince Albert National Park, Canada. **Hydrological Processes**, v. 18, p. 1561-1578, 2004.

BRANDÃO, V.S.; CECÍLIO, R.A.; PRUSK, F.F.; SILVA, D.D. **Infiltração de água no solo**. Viçosa, MG: UFV, 2009. 235 p.

BRITO, L.F.; SILVA, M.L.N.; CURI, N. et al. Erosão hídrica de latossolo vermelho muito argiloso ondulado em área de pós plantio de eucalipto no vale do rio Doce, região centro leste do estado de Minas Gerais. **Scientia Forestalis**, n. 67, p. 27-36, 2005.

CABRAL, O.M.R.; ROCHA, H.R.; GASH, J.H.C. et al. The energy and water balance of a *Eucalyptus* plantation in southeast Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 388, p. 208-216, 2010.

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

CALDER, I.R. Forests and water: ensuring forest benefits outweigh water costs. **Forest Ecology and Management**, v. 251, p. 110-120, 2007.

CANADELL, J.; JACKSON, R.B.; EHLERINGER, J.R. et al. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. **Oecologia**, v. 108, p. 583-595, 1996.

CARNEIRO, R.L. **Modelagem da resistência estomática e estimativa da eficiência do uso da água em plantios jovens de eucalipto irrigados e não irrigados na região da bacia do rio Doce**. 2004. 88 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

CARNEIRO, R.L.; RIBEIRO, A.; HUAMAN, C.A.M. et al. Consumo de água em plantios de eucalipto: parte 2 modelagem da resistência estomática e estimativa da transpiração em tratamentos irrigados e não-irrigados. **Revista Árvore**, v. 32, n. 1, p. 11-18, 2008.

CROCKFORD, R.; RICHARDSON, D. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. **Hydrological Processes**, v. 14, p. 2903-2920, 2000.

DIAZ, R.A.; QUERNER, E.P. Estimating the climate change effect upon flood risk reduction by afforestation. In: WAGENER, T.; FRANKS, S.; GUPTA, H.V. et al. Trends and patterns of tropical land use change. In: BONELL, M., BRUIJNZEEL, L.A. (Eds.). **Forests, water and people in the humid tropics**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005. p. 9-39.

DUNKERLEY, D. Measuring interception loss and canopy storage in dryland vegetation: a brief review and evaluation of available research strategies. **Hydrological Processes**, v. 14, p. 669-678, 2000.

EVANS, J.; TURNBULL, J.W. **Plantation forestry in the tropics: the role, silviculture, and use of planted forests for industrial, social, environmental, and agroforestry purposes**. 3.ed. New York: Oxford University Press, 2004.

FACCO, A.G. **Modelagem do balanço hídrico em microbacia hidrográfica com plantio de eucalipto**. 2008. 133 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

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

FARLEY, K.A.; JOBBAGY, E.G.; JACKSON, R.B. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. **Global Change Biology**, v. 11, p. 1565-1576, 2005.

- FEIKEMA, P.M.; MORRIS, J.D.; BEVERLY, C.R. et al. Validation of plantation transpiration in south-eastern Australia estimated using the 3PG+ forest growth model. **Forest Ecology and Management**, v. 260, p. 663-678, 2010.
- FORRESTER, D.I.; COLLOPY, J.J.; MORRIS, J.D. Enhanced water use efficiency in a mixed *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* plantation. **Forest Ecology and Management**, v. 259, p. 1761-1770, 2010.
- FLUMIGNAN, D.L.; FARIA, R.T. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo de cafeeiros em fase de formação. **Bragantia**, v. 68, p. 269-278, 2009.
- GAO, F. Water relations and gas exchange of tropical sapling during a prolonged drought in a Bornean heath forest, with reference to root architecture. **Journal of Tropical Ecology**, v. 16, p. 101-116, 2000.
- GASH, J.; MORTON, A. Application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetford forest. **Journal of Hydrology**, v. 38, p. 49-58, 1978.
- GASH, J.H.C.; LLOYD, C.R.; LACHAUD, G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. **Journal of Hydrology**, v. 170, p.79-86, 1995.
- GOLDBERG, V.; BERNHOFER, C. Testing different decoupling coefficients with measurements and models of contrasting canopies and soil water conditions. **Annales Geophysicae**, v. 26, p. 1977-1992, 2008.
- HATTON, T.J.; WALKER, J.; DAWES, W.R.; DUNIN, F.X. Simulation of hydroecological responses to elevated CO₂ at the catchment scale. **Australian Journal Botany**, v. 40, p. 679-696, 1992.
- HIBBERT, A.R. Forest treatment effects on water yield. In: SOPPER, L. (Ed.). **International Symposium on Forest Hydrology**. Pergamon Press, 1967. p. 527-543.
- HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basin: Hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society America Bulletin**, v. 3, n. 56, 1945.
- JACKSON, R.B.; RANDERSON, J.T.; CANADELL, J. et al. Protecting climate with forests. **Environmental Research Letters**, v. 3, p. 156-170, 2008.
- JARVIS, P.G.; McNAUGHTON, K.G. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. **Advance in Ecology Research**, v. 15, n. 1, p. 49, 1986.
- LANDSBERG, J.J.; GOWER, S.T. Applications of physiological ecology to forest management. San Diego: Academic Press, 1997. 344 p.

LANE, P.N.J.; MORRIS, J.; NINGNAN, Z. et al. Water balance of tropical eucalypt plantations in south-eastern China. **Agricultural and Forest Meteorology**, n. 124, p. 253-267, 2004.

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

LEVIA, D.; FROST, E. Variability of throughfall volume and solute inputs in wooded ecosystems. **Progress in Physical Geography**, v. 30, p. 605-632, 2006.

LIMA, J.R.S.; ANTONINO, A.C.D.; LIRA, C.A.B.O.; SILVA, I.F. Estimativa da evapotranspiração em uma cultura de feijão caupi, nas condições do brejo paraibano. **Agropecuária Técnica**, Areia, PB, v. 26, n. 2, 2005.

LIMA, V.W. Interceptação da chuva em povoamentos de eucalipto e de pinheiro. **Revista IPEF**, v. 13, p. 75-90, 1976.

LIMA, W.P.; NICOLIELO, N. Precipitação efetiva e a interceptação em florestas de Pinheiros tropicais e em uma reserva de cerrado. **Revista IPEF**, n. 24, p. 43-46, 1983.

LLORENS, P.; DOMINGO, F. Rainfall partitioning by vegetation under mediterranean conditions. A review of studies in Europe. **Journal of Hydrology**, v. 335, p. 37-54, 2007.

MACFARLANEA, C.; BOND, C.; WHITE, D.A. et al. Transpiration and hydraulic traits of old and regrowth eucalypt forest in southwestern Australia. **Forest Ecology and Management**, v. 260, p. 96-105, 2010.

MARSIK, M.; WAYLEN, P. An application of the distributed hydrologic model CASC2D to a tropical montane watershed. **Journal of Hydrology**, v. 330, p. 481-495, 2006.

MATSUMOTO, K.; OHTA, T.; NAKAI, T. et al. Responses of surface conductance to forest environments in the Far East. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 1926-1940, 2008.

MIELKE, M.S.; OLIVA, M.A.; BARROS, N.F. et al. Stomata control of transpiration in the canopy a clonal *Eucalyptus grandis* plantation. **Trees**, v. 13, p. 152-160, 1999.

MIELKE, M.S.; OLIVA, M.A.; BARROS, N.F. et al. Leaf gas exchange in a clonal eucalypt plantation as related to soil moisture, leaf water potential and microclimate variables. **Trees**, v. 14, p. 263-270, 2000.

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

- NGUGI, M.R.; DOLEY, D.; HUNT, M.A. et al. Physiological responses to water stress in *Eucalyptus cloeziana* and *E. argophloia* seedlings. **Trees-Structure and Function**, v. 18, p. 381-389, 2004.
- NOSETTO, M.D.; JOBBÁGY, E.G.; PARUELO, J.M. Land use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in Central Argentina. **Global Change Biology**, v. 11, p. 1101-1117, 2005.
- NOSETTO, M.D.; JOBBÁGY, E.G.; BRIZUELA, A.B.; JACKSON, R.B. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 2011.
- NOTTER, B.; McMILLAN, L.; VIRIROLI, D. et al. Impacts of environmental change on water resources in the Mt. Kenya region. **Journal of Hydrology**, v. 343, p. 266-278, 2007.
- O'GRADY, A.P.; WORLEDGE, D.; BATTAGLIA, M. Constraints on transpiration of *Eucalyptus globules* in southern Tasmania, Australia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 453-465, 2008.
- OLIVEIRA, L.L.; COSTA, R.F.; COSTA, A.C.L. et al. Modelagem da interceptação na Floresta Nacional de Caxuanã, no leste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 3, p. 318-326, 2008.
- PAIVA, H.G. **Estimativa do índice de área foliar por métodos óticos e sensoriamento remoto para calibrar modelo ecofisiológico em plantios de eucalipto em áreas de relevo ondulado**. 2009. 73 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- PEREIRA, D.R.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M.; YANAGI, S.N.M. Evapotranspiration and estimation of aerodynamic and stomatal conductance in a fragment of atlantic forest in mantiqueira range region, MG. **Revista Cerne**, n. 1, p. 32-40, 2010.
- PEREZ, P.J.; CASTELLVI, F.; IBÁÑEZ, M.; ROSELL, J I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, p. 141-150, 1999.
- ROGERS, J.S.; ALLEN, L.H.; CALVERT, D.V. Evapotranspiration from a humid-region developing citrus grove with grass cover. **Transactions of the ASAE**, v. 26, p. 1778-1783, 1983.
- SACRAMENTO NETO, O.B. **Balanço hídrico em plantios jovens de eucalipto na região de Belo Oriente-MG**. 2001. 82 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SCOTT, D.F.; BRUIJNZEEL, L.A.; MACKENSEN, J. The hydrological and soil impacts of forestation in the tropics. In: BONELL, M.; BRUIJNZEEL, L.A. (Eds.). **Forests, water and people in the humid tropics**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005. p. 622-651.

SHINZATO, E.T.; TONELLO, K.C.; GASPAROTO, E.A.G.; VALENTE, R.A.V. Escoamento pelo tronco em diferentes povoamentos florestais na Floresta Nacional de Ipanema em Iperó, Brasil. **Scientia. Forestalis**, v. 39, p. 395-402, 2011.

SILVA, J.C. Reflexos sociais e econômicos da agregação de valor a produtos de base florestal. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 8, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2003.

SILVA, T.G.F. **Análise de crescimento, interação biosfera-atmosfera e eficiência do uso de água para a cana-de-açúcar irrigada no Submédio do Vale do São Francisco**. 2009. 176 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SILVA, M.A.; SILVA, M.L.N.; CURI, N. et al. Sistemas de manejo em plantios florestais de eucalipto e perdas de solo e água na região do vale do rio Doce, MG. **Ciência Florestal**, v. 21, p. 765-776, 2011.

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

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA – SBS. **Fatos e números do Brasil florestal**. Disponível em: <ftp://http://www.sbs.org.br/FatoseNumerosdoBrasilFlorestal.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2010.

SOUSA, R.C.; RANZINI, M.; ARCOVA, F.C.S. et al. **Redistribuição das chuvas em plantio de *Araucaria angustifolia* (bertol.) kuntze (araucariaceae) no Parque Estadual da Serra do Mar, Cunha-SP**. 2009. (IF Série Regional, 40).

SOUZA, M.H. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em três regiões da bacia do Rio Doce. **Revista Árvore**, v. 30, n. 3, p. 399-410, 2005.

SOUZA, P.JO.P. **Avanço da fronteira agrícola na Amazônia: impactos no balanço de energia e simulação do crescimento e rendimento da soja**. 2009. 262 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

THANAPAKPAWIN, P.; RICHEY, J.; THOMAS, D. et al. Effects of land-use change on the hydrologic regime of the Mae Chaem river basin, NW Thailand. **Journal of Hydrology**, v. 334, p. 215-230, 2007.

THOMAS, D.S.; MONTAGU, K.D.; CONROY, J.P. Effects of leaf and branch removal on carbon assimilation and stem wood density of *Eucalyptus grandis* seedlings. **Trees**, v. 20, p. 725-733, 2006.

UNLAND, H.E.; HOUSER, P.R.; SHUTTLEWORTH, W.J.; WANG, Z.L. Surface flux measurement and modeling at a semi-arid Sonoran Desert site. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 82, p. 119-153, 1996.

VALENTE, F.; DAVID, J.; GASH, J. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. **Journal of Hydrology**, v. 190, p. 141-162, 1997.

VERTESSY, R.A.; WATSON, F.G.R.; O'SULLIVAN, S.K. Factors determining relations between stand age and catchment water balance in mountain ash forests. **Forest Ecology and Management**, v. 143, p. 13-26, 2001.

VON STACKELBERG, N.O.; CHESCHEIR, G.M.; SKAGGS, R.W.; AMATYA, D.M. Simulation of the hydrologic effects of afforestation in the Tacuarembó River Basin, Uruguay. **Transactions of the ASABE**, v. 50, p. 455-468, 2007.

XIAO, Q.; McPERSON, E.; USTIN, S.; GRISMER, M. A new approach to modeling tree rainfall interception. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, p. 173-188, 2000.

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

ZHANG, L.; DAWES, W.R.; WALKER, G.R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. **Water Resour. Res.**, v. 37, p.701-708, 2001.

ZHOU, G.H.; MORRIS, J.D.; YAN, J.H. et al. Hydrological impacts of reafforestation with eucalypts and indigenous species: a case study in southern China. **Forest Ecology and Management**, v. 167, p. 209-222, 2002.