



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

---

---

**ANÁLISE DO PROCESSO DE  
INTERCEPTAÇÃO COMO AUXÍLIO À  
AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL DA  
SILVICULTURA**

**Thomaz Menna Barreto Moojen**

**Porto Alegre  
Dezembro 2010**

**THOMAZ MENNA BARRETO MOOJEN**

**ANÁLISE DO PROCESSO DE  
INTERCEPTAÇÃO COMO AUXÍLIO À  
AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL DA  
SILVICULTURA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO  
APRESENTADO AO CURSO DE  
ENGENHARIA AMBIENTAL DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO  
GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Orientador: Carlos André Bulhões Mendes

Co-orientadora: Rosane Barbosa Lopes Cavalcante

Porto Alegre

Dezembro 2010

THOMAZ MENNA BARRETO MOOJEN

ANÁLISE DO PROCESSO DE INTERCEPTAÇÃO  
COMO AUXÍLIO À AVALIAÇÃO DE IMPACTO  
AMBIENTAL DA SILVICULTURA

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 22/12/2010 pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

Eng. Rosane Barbosa Lopes Cavalcante - Co-orientadora

Prof. Dr. Alfonso Risso – IPH/UFRGS

Prof. Dr. Francisco Carlos Bragança de Souza – IPH/UFRGS

\

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1. Impacto na interceptação.....	12
Figura 2. Processos envolvidos na interceptação .....	16
Figura 3. Modelos de enchimento do reservatório foliar.....	19
Figura 4. Regime pluviométrico de Eldorado.....	23
Figura 5. Área de estudo .....	24
Figura 6. Determinação da visibilidade da abóboda celeste .....	27
Figura 7. Mapa solar .....	28
Figura 8. Mapa do céu .....	28
Figura 9. Precipitação mensal.....	35
Figura 10. Radiação estimada.....	36
Figura 11. Radiação diária .....	37
Figura 12. Radiação mensal.....	38
Figura 13. Evaporação potencial .....	39
Figura 14. Interceptação mensal .....	41
Figura 15. Impacto na interceptação mensal .....	42

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Parâmetros fornecidos pela empresa.....	25
Tabela 2. Valores obtidos da literatura para eucalipto .....	25
Tabela 3. Valores obtidos da literatura para pastagem .....	25
Tabela 4. Fonte dos dados meteorológicos utilizados .....	26
Tabela 5. Resumo das características dos modelos .....	30
Tabela 6. Resumo das variáveis utilizadas no cálculo da evaporação.....	34
Tabela 7. Evaporação anual potencial .....	39
Tabela 8. Interceptação anual .....	40

## SUMÁRIO

1.	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	8
1.1.	Relevância do estudo .....	8
1.2.	Objetivo e hipótese .....	10
2.	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	11
2.1.	Silvicultura.....	11
2.1.1.	Plantações florestais .....	11
2.1.2.	Impacto ambiental da silvicultura .....	11
2.2.	Radiação Solar .....	13
2.3.	Interceptação .....	15
2.3.1.	Capacidade de armazenamento .....	16
2.3.2.	Retenção da precipitação.....	17
2.3.3.	Drenagem do reservatório do dossel .....	19
2.3.4.	Evaporação do reservatório do dossel.....	19
2.3.4.1.	A equação de Penman .....	20
2.3.4.2.	Penman-Monteith.....	22
3.	<b>METODOLOGIA</b> .....	23
3.1.	Área de estudo .....	23
3.2.	Parâmetros da vegetação.....	24
3.2.1.	Eucalipto.....	24
3.2.2.	Pastagem.....	25
3.3.	Variáveis meteorológicas.....	25
3.3.1.	Dados medidos .....	26
3.3.2.	Estimativa da Radiação Solar.....	26
3.4.	Modelos Hidrológicos de Interceptação .....	29

3.4.1.	Detenção da precipitação .....	31
3.4.1.1.	Detenção linear .....	32
3.4.1.2.	Detenção exponencial .....	32
3.4.2.	Drenagem .....	33
3.5.	Evaporação da precipitação retida na superfície vegetal .....	34
4.	<b>RESULTADOS</b> .....	35
4.1.	Precipitação .....	35
4.2.	Radiação Solar .....	36
4.3.	Evaporação potencial .....	38
4.4.	Interceptação .....	40
4.5.	Impacto ambiental.....	42
5.	<b>CONCLUSÕES</b> .....	43
6.	<b>TRABALHOS FUTUROS</b> .....	44
7.	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	44

## **1. INTRODUÇÃO**

Apesar da grande produtividade observada no setor da silvicultura, segundo (Lima, 1993), em geral, as altas taxas de crescimento de florestas estão associadas à elevada utilização de recursos do ambiente. Assim, muitas preocupações têm sido levantadas sobre a expansão do uso da terra para as plantações de eucalipto no Brasil. Os órgãos ambientais e as Organizações Não Governamentais (ONG`s) indicam que este uso seca o solo e causa severa perda em termos de biodiversidade (Soares e Almeida, 2001).

As empresas do ramo florestal passaram a se preocupar com as questões ambientais quando constataram que as variáveis ambientais influenciam suas atividades e, conseqüentemente, seu desempenho. Assim sendo, os recursos naturais estão se tornando alvo de monitoramento e passam a ser considerados nos processos de decisão estratégica e no plano de investimento das empresas (Amaral, 2002). Segundo Almeida et al (2010), quantificar o efeito da seca sobre a produtividade é uma consideração importante para as indústrias florestais, que demandam fontes confiáveis e sustentáveis de madeira.

Segundo estudos recentes (STAPE et al, 2004 e STAPE et al , 2007), plantios de eucalipto com maiores taxas de crescimento estão associados a um maior suprimento de água. De acordo com FEPAM (2007), pode-se inferir que, nas regiões em que há menor disponibilidade hídrica, há também uma restrição de natureza econômica pois seria difícil se obter boas produtividades florestais.

Desta forma, quando o manejo florestal leva em conta as capacidades hídricas de cada região, além de proteger o ambiente, favorece a produtividade do empreendimento.

### **1.1. Relevância do estudo**

Existe um consenso geral de que a plantação de eucaliptos em terras antes utilizadas para pasto ou com outras culturas de menor porte, resulta em um decréscimo na geração de água e há evidências consideráveis de que isto pode ser atribuído ao aumento das perdas por transpiração e evaporação dos dosséis úmidos, resultando em uma menor precipitação atingindo o solo (Calder, 1986).

Sendo a evaporação dos dosséis úmidos, isto é, a interceptação, dos eucaliptos um aspecto importante no suprimento de água ao solo, o planejamento e o zoneamento

de áreas propícias a esta atividade devem levar em consideração este processo. Desta forma, a modelagem hidrológica incorporando a interceptação, além de ajudar na preservação de áreas que não são propícias para suportar a silvicultura, auxilia no direcionamento de recursos aos locais mais adequados à plantação de eucalipto.

Contudo, a interceptação é um processo difícil de ser medido diretamente. Uma das formas de avaliação é através do balanço hídrico, isto é, a interceptação pode ser estimada através da diferença entre a precipitação acima e abaixo do dossel da plantação. Todavia, são necessários diversos pluviômetros espalhados de forma aleatória para que os resultados sejam estatisticamente confiáveis. Daí a importância da utilização de modelos hidrológicos para a estimativa da interceptação.

Alguns dos modelos de interceptação existentes (Rutter, 1971 e Gash, 1979) requerem uma ampla gama de dados meteorológicos, e acabam se tornando pouco aplicáveis à prática do dia a dia, especialmente quando a área a ser analisada é grande e não há monitoramento constante das variáveis necessárias, tanto as meteorológicas como as da vegetação. Assim, estes modelos, embora sejam capazes de estimar a interceptação com relativa precisão, acabam se limitando a estudos acadêmicos e à áreas monitoradas.

O zoneamento do estado do Rio Grande do Sul para a silvicultura realizado pela FEPAM em 2007 ilustra o que acaba ocorrendo na prática. O estudo analisa o balanço hídrico climatológico, considerando a precipitação, a evapotranspiração e a capacidade de armazenamento de água no solo buscando avaliar a disponibilidade hídrica no solo para o desenvolvimento de espécies florestais. Embora este estudo reconheça a existência da interceptação como parte da evapotranspiração, não a considera na modelagem hidrológica.

Desta forma, faz-se necessário a utilização de modelos simplificados de interceptação, com baixa demanda de dados, pois, mesmo assumindo maiores margens de erros, podem ser aplicados em uma ampla gama de ambientes e regiões, e, assim, podem ser facilmente inseridos em modelos hidrológicos completos com a finalidade de quantificar os possíveis impactos da implantação de plantações de eucalipto.

## **1.2. Objetivo e hipótese**

O objetivo deste trabalho é a analisar o processo de interceptação da precipitação de forma a avaliar o impacto sobre a esta componente do ciclo hidrológico causado pela conversão de áreas de pastagem em plantação de eucalipto.

Ainda, este trabalho visa à análise das respostas de modelos de cálculo de interceptação quando alimentados com dados meteorológicos de simples obtenção e sob diferentes discretizações temporais.

A hipótese deste estudo é a seguinte:

O impacto na interceptação da água de chuva causado pela conversão de pastagem em plantações de eucalipto pode ser avaliado através de metodologias simplificadas cuja demanda de dados meteorológicos seja de simples obtenção?

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A revisão bibliográfica deste trabalho está dividida em três tópicos. O primeiro é referente à atividade silvicultura e seus impactos ambientais associados. O segundo trata da radiação solar e o último tópico é referente à interceptação da precipitação pela vegetação.

### **2.1. Silvicultura**

#### **2.1.1. Plantações florestais**

Comparativamente com as florestas naturais, que já são escassas e, em geral, ocupam áreas onde sua presença é muito mais importante para fins de conservação ambiental, as plantações florestais de manejo intensivo estão assumindo cada vez mais a importante missão de suprimento de madeira para fins industriais e para geração de energia (Lima, 1993).

O eucalipto adquiriu, rapidamente, a característica marcante de ser a espécie florestal mais plantada no mundo, apresentando condições de crescer e se desenvolver em qualquer condição climática, desde que a temperatura mínima do solo não seja limitante (Pryor, 1976 apud Lima, 1993).

Somente no Brasil, a área dedicada ao plantio de eucalipto ultrapassa 3,7 milhões de hectares, sendo que este valor dobrou na última década. A duração da rotação das plantações para a produção de celulose no Brasil é da ordem de 6 a 7 anos, sendo que o fechamento do dossel ocorre tipicamente dentro de 2 a 3 anos após o plantio (Hubbard et al, 2010).

#### **2.1.2. Impacto ambiental da silvicultura**

A conversão de áreas em plantações de eucalipto possui diversos impactos ambientais associados. Atribui-se ao eucalipto uma grande capacidade de absorção de água pelas raízes e altas taxas de evaporação por suas folhas. As raízes crescem ao longo de gradientes positivos de disponibilidade de água e, embora o número de raízes finas diminua com a profundidade, estas são importantes para a sobrevivência em períodos de secas sazonais (Carbon et al, 1980 apud Whitehead e Beadle, 2004)).

A monocultura extensiva de eucalipto pode resultar numa significativa diminuição das disponibilidades de recursos para a existência de uma fauna variada.

Ainda, as altas taxas de crescimento, como no caso da maioria das espécies de eucalipto utilizadas em larga escala nas plantações industriais, resultam em altas demandas de nutrientes do solo. Contudo, a cultura do eucalipto apresenta uma demanda de nutrientes muito menos intensa que as culturas agrícolas (batata, cana-de-açúcar, café, milho e trigo). Com relação à precipitação, o efeito hidrológico mais significativo está relacionado com o processo de interceptação das chuvas, pelo qual a precipitação incidente é redistribuída pela copa da floresta e parte é perdida por evaporação direta da água interceptada (Lima, 1993).

Neste estudo será considerada apenas o impacto da plantação de eucaliptos na interceptação da chuva, isto é, apenas uma parcela da evapotranspiração é analisada. Assim, o impacto na interceptação da chuva causado pela conversão de pastagens em plantações de eucalipto pode ser entendido como o acréscimo na interceptação, conforme ilustrado pela Figura 1.

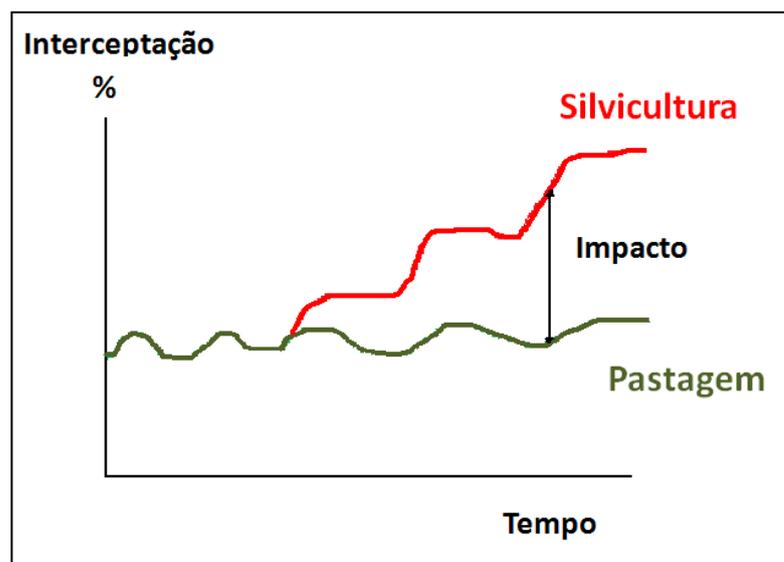


Figura 1. Impacto na interceptação

Fahey e Watson (1991) avaliaram o impacto da conversão de área de pastagem em área de plantação de pinus sobre o escoamento superficial. O estudo consistiu na comparação entre duas bacias: na primeira, a pastagem foi convertida em plantação de *Pinus radiata*, e, na segunda, a pastagem foi preservada. O estudo abrangeu apenas os primeiros dez anos após a conversão. De acordo com os resultados, nos primeiros sete anos, não houve grande alteração no escoamento gerado na bacia, contudo, após esta idade, foram observadas reduções de até 20% no escoamento. Segundo os autores, o principal fator causador do declínio do escoamento, a partir do sétimo ano, foi o

aumento da interceptação devida ao desenvolvimento e crescimento da copa das árvores.

De fato, quando se comparam os efeitos resultantes do florestamento de áreas de campo limpo, ou de pastagem, ou qualquer outra vegetação coberta, é bastante provável que ocorra uma redução da produção de água pela bacia hidrográfica, enquanto as perdas evaporativas da bacia poderiam, eventualmente, quase que duplicar. A principal explicação para este aumento das perdas evaporativas está no processo de interceptação das chuvas pela copa da floresta (Lima, 1993).

## 2.2. Radiação Solar

A radiação solar é fundamental para a maioria dos processos físicos e biofísicos devido ao seu papel no balanço de energia e de água (Fu e Rich, 2002).

A radiação que atinge uma superfície perpendicular aos raios solares no topo da atmosfera terrestre é chamada de constante solar e tem um valor aproximado de  $0,082 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{min}^{-1}$ . A projeção da constante sobre a superfície do topo da atmosfera, ou radiação extraterrestre, é determinada pelo ângulo entre a direção da luz solar e a superfície da atmosfera. Este ângulo varia durante o dia, com a latitude e a época do ano. Assim, a radiação extraterrestre é função da latitude, hora do dia e época do ano (Allen et al, 2006).

Quando a radiação solar atinge o topo da atmosfera terrestre, ela sofre três processos: reflexão, absorção e transmissão. Contudo, somente a parcela que, de fato, atinge a superfície terrestre é relevante nos processos hidrológicos.

A parcela que atinge a superfície terrestre, ou radiação global, ou ainda insolação, é composta pela radiação direta e pela radiação difusa conforme a equação (1). A transmissão e a atenuação da radiação direta na atmosfera são determinadas principalmente pelo processo de espalhamento Rayleigh, absorção pelo ozônio, pela água e pelos aerossóis (Wang et al, 2002).

$$R_G = R_{Dir} + R_{Dif} \quad (1)$$

Onde:

$R_G$	radiação global	$[\text{MJ.m}^{-2}.\text{t}^{-1}]$
$R_{Dir}$	radiação direta	$[\text{MJ.m}^{-2}.\text{t}^{-1}]$
$R_{Dif}$	radiação difusa	$[\text{MJ.m}^{-2}.\text{t}^{-1}]$

Kasten e Czeplak (1980) investigaram a correlação entre a radiação solar e a cobertura de nuvens. Foram avaliados dez anos de registros contínuos de hora em hora. Duas equações parametrizadas foram propostas para a cidade de Hamburgo, a primeira entre cobertura de nuvens e a transmitância de diferentes tipos de nuvem (2) e a segunda entre a cobertura de nuvens e a relação entre radiação global e a radiação difusa (3).

$$\frac{R_G(n)}{R_G(0)} = 1 - 0,75(n)^{3,4} \quad (2)$$

$$\frac{R_{Dif}(n)}{R_G(n)} = 0,3 + 0,7(n)^2 \quad (3)$$

Onde:

n: fração da cobertura de nuvens [-]

Além da influência das nuvens sobre as parcelas, direta e difusa da insolação, a topografia também possui significativa influência. De acordo com Fu e Rich (2002), em escala local, além da latitude, a topografia é o principal fator que modifica a distribuição de insolação. A variabilidade de altitude, de orientação da superfície (declividade e aspecto das vertentes) e do sombreamento causado pelas características topográficas circunvizinhas criam fortes gradientes locais de insolação.

Alguns algoritmos, como o TopoView e o Solar Analyst, foram desenvolvidos para o cálculo da insolação dentro de softwares de SIG (Sistema de Informação Geográfica) levando em conta a influência da topografia. A essência destes programas é um algoritmo desenvolvido por Rich et al (1994), que, com base no modelo digital de elevação do terreno, gera uma representação de todo o céu, avaliando se as seções são visíveis ou obstruídas pela topografia circunvizinha. Estas representações são avaliadas para cada célula do arquivo raster e, através delas, são calculadas as parcelas da insolação, direta e difusa, vindas de cada seção da abóboda celeste (Fu e Rich, 2002).

Em contraste com o alto custo de construção e manutenção de estações de monitoramento da radiação solar, modelos espaciais de radiação solar fornecem uma caracterização da insolação eficiente, tanto sob o ponto de vista espaço-temporal quanto sob o ponto de vista econômico (Fu e Rich, 2002).

### 2.3. Interceptação

A interceptação é o processo pelo qual a precipitação atinge a superfície vegetal, onde fica retida e sujeita à evaporação. O aspecto mais relevante desta interceptação é a proporção da chuva que cai sobre a comunidade vegetal e é coletada, armazenada e posteriormente perdida por evaporação, aumentando a perda de água no balanço hidrológico (Costin, 1961 apud Aston, 1979). As perdas por interceptação representam uma fração significativa da evapotranspiração na maioria das regiões (Dingman, 2002).

Segundo Van Dijk e Bruijnzeel (2001), a taxa de evaporação de um dossel úmido é superior a de um dossel em condições secas. Desta forma, a interceptação da chuva constitui uma perda líquida para o sistema, podendo assumir valores consideráveis em determinadas condições.

Horton (1919) foi o primeiro a expressar a interceptação como a soma da parcela armazenada na copa e a parcela evaporada antes e depois do evento de chuva (Gash, 1979).

$$I = \int_0^t E \cdot dt + C_{max} \quad (4)$$

Onde:

I:	interceptação	[mm.m <sup>-2</sup> ]
$C_{max}$ :	capacidade de armazenamento do dossel	[mm.m <sup>-2</sup> ]
t:	tempo	[t]
E	taxa de evaporação	[mm.m <sup>-2</sup> . t <sup>-1</sup> ]

Vários modelos têm sido propostos com o objetivo de avaliar a interceptação por diversos tipos de vegetações. Basicamente, os modelos levam em conta três processos: precipitação retida na superfície vegetal, evaporação e drenagem ao solo conforme apresentado na Figura 2. Desta forma, o balanço hídrico do reservatório do dossel pode ser expresso pela equação (5).

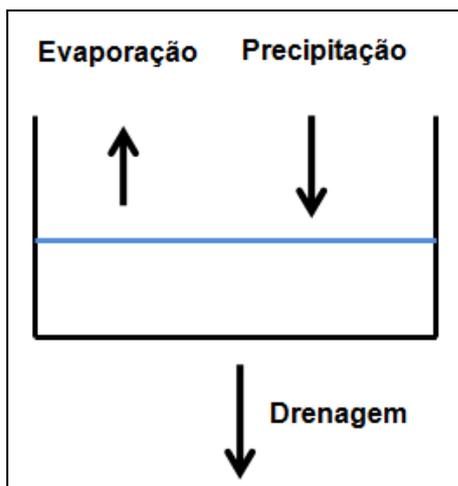


Figura 2. Processos envolvidos na interceptação

$$\frac{dS}{dt} = P_r - E_v - D \quad (5)$$

Onde:

S:	nível do reservatório vegetal	[mm]
$P_r$ :	precipitação retida na superfície vegetal	[mm.t <sup>-1</sup> ]
$E_v$	evaporação	[mm.t <sup>-1</sup> ]
D	drenagem ao solo	[mm.t <sup>-1</sup> ]

### 2.3.1. Capacidade de armazenamento

A água que fica retida na superfície vegetal devido à precipitação pode ser representada por um reservatório do dossel vegetal, cujo nível é o volume ou lâmina de água retida pela vegetação. Contudo, este reservatório possui nível máximo, denominado capacidade de armazenamento ( $C_{\max}$ ).

A capacidade de armazenamento de chuva no dossel é um dos importantes parâmetros de controle da interceptação e é determinada pelas características dos vegetais tais como: as espécies envolvidas, o índice de área foliar e a capacidade de armazenamento específica dos elementos vegetais: folhas, galhos e troncos (Liu, 1998).

Este parâmetro da vegetação tem sido definido de diversas maneiras ao longo do tempo. Liu (1997) o definiu como sendo a precipitação retida no dossel e que não irá drenar para o chão. Assim, o único caminho para a água retida abandonar a superfície vegetal é a evaporação durante e após o evento de chuva.

Herwitz (1985) definiu a capacidade de armazenamento do dossel como o valor máximo de água acumulada na superfície vegetal durante um evento de chuva, isto é, o

ponto a partir do qual a vegetação pára de acumular água. Na prática, esta definição permite que a capacidade de armazenamento seja superior durante o período de chuva, pois a drenagem do dossel não é instantânea. Desta forma, este parâmetro se torna função também das características da precipitação.

Neste trabalho, será utilizada a definição proposta por Liu (1997), pois, assim, a capacidade de armazenamento se torna função apenas da vegetação e a modelagem da drenagem fica simplificada.

Aston (1979) avaliou a interceptação em oito pequenas árvores de espécies diferentes, sendo seis destas de Eucalipto. Através de experimento em simulador de chuvas, observou que a capacidade de armazenamento do dossel se relaciona de forma linear com a área foliar. Diversos autores (Van Dijk e Bruijnzeel, 2001, Gash, 1995 e Liu, 1996) têm utilizado uma relação semelhante para a determinação da capacidade de armazenamento do dossel:

$$C_{max} = IAF \cdot IAF_e \quad (6)$$

Onde:

$C_{max}$ :	capacidade de armazenamento do dossel	[mm.m <sup>-2</sup> ]
IAF	índice de área foliar	[-]
$IAF_e$	capacidade de armazenamento específica	[mm.m <sup>-2</sup> ]

### 2.3.2. Retenção da precipitação

Quando ocorre precipitação, uma parcela da chuva atinge a cobertura vegetal e o restante atinge diretamente o solo. A parcela que atinge a cobertura vegetal é chamada de precipitação coberta e é a única entrada do reservatório do dossel. A parcela que atinge diretamente o solo é chamada de precipitação descoberta e não influencia o processo de interceptação. A relação adimensional entre a precipitação coberta e a precipitação total é o coeficiente de cobertura vegetal sendo definido pela equação (7).

$$c = \frac{P_c}{P_t} \quad (7)$$

Onde:

$c$ :	coeficiente de cobertura vegetal	[-]
$P_c$	precipitação coberta	[mm]
$P_t$	precipitação total	[mm]

Existem basicamente duas alternativas de modelagem do enchimento do reservatório. A primeira considera que o reservatório é enchido de forma linear e a segunda considera que o enchimento ocorre de forma exponencial.

A primeira alternativa (Gash, 1979 e Valente, 1997) considera que o reservatório do dossel é preenchido de forma linear, isto é, toda a precipitação é retida até que a capacidade máxima de armazenamento seja atingida. A equação (8) representa esta relação linear, considerando que o reservatório está vazio antes do evento de chuva.

$$S = P_c \text{ sujeito a } S \leq C_{max} \quad (8)$$

Aston (1979) propôs uma abordagem mais complexa, porém em concordância com os resultados obtidos em laboratório, utilizando um modelo exponencial para o preenchimento do reservatório do dossel, conforme a equação (9):

$$S = C_{max} \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{P_c}{C_{max}}} \right] \quad (9)$$

Herwitz (1985) e Calder (1986) obtiveram resultados semelhantes que confirmam o estudo de Aston (1979). Segundo Herwitz, o preenchimento do armazenamento da planta ocorre de forma assintótica devido ao acúmulo gradual de salpico no lado inferior das folhas, protegidos da precipitação direta. De acordo com Calder, a capacidade de armazenamento do dossel só é alcançada após a aplicação de uma precipitação muitos superior à capacidade de armazenamento. O autor propôs que a causa pode ser a forma estocástica com que os elementos individuais da superfície vegetal são atingidos e molhados pelas gotas de chuva.

A comparação entre as duas alternativas de modelagem pode ser observada na Figura 3. Observa-se que o modelo linear satura o reservatório vegetal muito antes do exponencial.

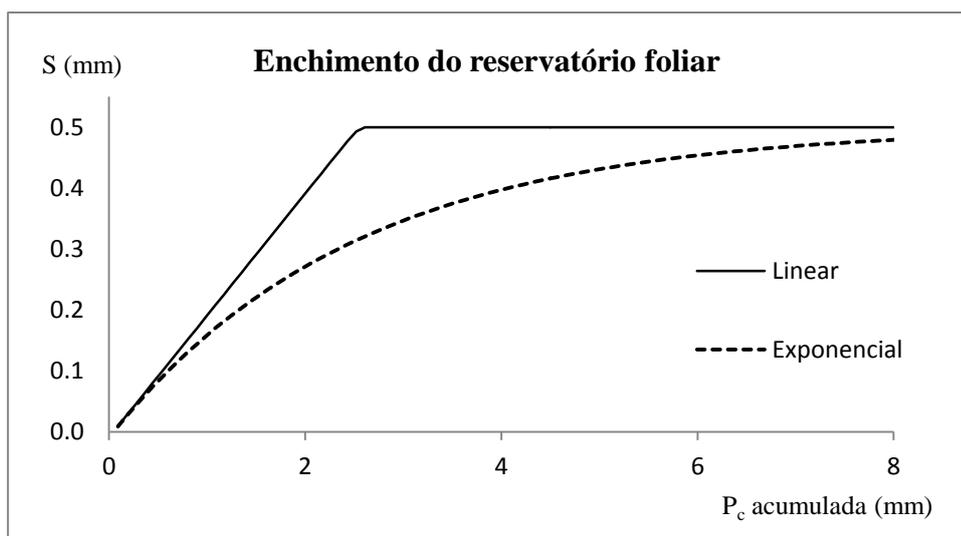


Figura 3. Modelos de enchimento do reservatório foliar

### 2.3.3. Drenagem do reservatório do dossel

A drenagem do dossel se refere à precipitação coberta que não fica retida na cobertura vegetal e escoar em direção ao solo. Existem basicamente duas alternativas para a modelagem da drenagem: a primeira relaciona-a com o armazenamento do dossel e a segunda, mais simplificada, relaciona-a com a capacidade de armazenamento.

Pela primeira formulação, quanto maior o nível do reservatório, maior será a drenagem. No modelo de Rutter (1971), por exemplo, existe drenagem do reservatório antes do nível máximo ser atingido, contudo, o armazenamento do dossel pode ser, durante as tempestades de chuva, temporariamente maior do que o máximo, pois a precipitação pode ser superior à drenagem. No entanto, este excesso de água acabará sendo drenado do dossel como precipitação interna assim que a precipitação cessar.

Pela segunda abordagem, considera-se que a drenagem ao solo só ocorre quando a capacidade máxima de armazenamento é atingida, e, a partir deste momento, a drenagem passa a ter valor igual à precipitação coberta, isto é, a superfície vegetal não retém mais água (Wigmosta, 1994 e Liu, 1996).

### 2.3.4. Evaporação do reservatório do dossel

A evaporação do reservatório do dossel é o processo pelo qual a precipitação detida na superfície vegetal se torna vapor atmosférico. A equação de Penman-Monteith tem sido utilizada por diversos autores para a estimativa da evaporação da precipitação interceptada (Rutter et al, 1971, Gash, 1979, Gash, 1995, Liu, 1997, Valente et al, 1997 e Van Dijk e Bruijnzeel, 2001).

### 2.3.4.1. A equação de Penman

Penman (1948) foi o primeiro a mostrar que as abordagens de transferência de massa e balanço de energia podiam ser combinadas para se chegar a uma equação de evaporação que não exige dados de temperatura de superfície (Dingman, 2002).

A equação (10) representa a formulação de Penman (1948):

$$E_w = \frac{\Delta \cdot R_n + \gamma \cdot \lambda_v \cdot E_a}{\rho_w \cdot \lambda_v (\Delta + \gamma)} \quad (10)$$

Onde:

$E_w$	evaporação de superfície de água livre	[m.t <sup>-1</sup> ]
$\Delta$	taxa de variação da pressão de saturação de vapor	[kPa.K <sup>-1</sup> ]
$R_n$	radiação efetiva	[MJ.m <sup>-2</sup> .t <sup>-1</sup> ]
$\gamma$	constante psicrométrica	[kPa.K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_v$	calor latente de vaporização da água	[MJ.kg <sup>-1</sup> ]
$E_a$	fluxo de transporte de vapor	[kg.m <sup>-2</sup> .t <sup>-1</sup> ]
$\rho_w$	massa específica da água	[kg.m <sup>-3</sup> ]

A equação de Penman pode ser reescrita da seguinte forma (Dingman, 2002):

$$E_w = \frac{\Delta \cdot R_n + \rho_a \cdot c_p \cdot C_{at} \cdot e_a^* (1 - W_a)}{\rho_w \cdot \lambda_v (\Delta + \gamma)} \quad (11)$$

Onde:

$C_{at}$	condutividade atmosférica para vapor de água	[m.t <sup>-1</sup> ]
$W_a$	umidade (relativa) do ar	[-]
$e_a^*$	pressão de saturação de vapor	[kPa]
$\rho_a$	massa específica do ar	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$c_p$	calor específico do ar seco	[MJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]

Penman (1948) estimou a radiação efetiva a partir da radiação global utilizando o albedo, ou coeficiente de reflexão da superfície.

$$R_n = R_G (1 - a) \quad (12)$$

Onde:

a:	coeficiente de reflexão da superfície	[-]
----	---------------------------------------	-----

A constante psicrométrica ( $\gamma$ ) não é estritamente uma constante, pois depende da pressão conforme a equação (13), e, sabe-se que, esta varia com a altitude. Contudo, utilizando valores típicos:  $c_p=0,001$  MJ.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>,  $P=101,3$  kPa e  $\lambda_v=2,47$  MJ.kg<sup>-1</sup>, obtém-se  $\gamma=0,066$  kPa.K<sup>-1</sup> (Dingman, 2002).

$$\gamma = \frac{c_p \cdot P}{0,622 \cdot \lambda_v} \quad (13)$$

Onde:

P: pressão atmosférica [kPa]

A taxa de variação da pressão de saturação do vapor  $\Delta$  [kPa.K<sup>-1</sup>], a pressão de saturação de vapor  $e_a^*$  [kPa] e o calor latente de vaporização  $\lambda_v$  [MJ.kg<sup>-1</sup>], podem ser estimados pelas equações (14), (15) e (16) respectivamente, onde T é a temperatura do ar em °C (Dingman, 2002):

$$\Delta = \frac{2508.3}{(T + 237,3)^2} \cdot e^{\left(\frac{17,3 \cdot T}{T+237,3}\right)} \quad (14)$$

$$e_a^* = 0,611 \cdot e^{\frac{17,3 \cdot T_s}{T_s+237,3}} \quad (15)$$

$$\lambda_v = 2,5 - 2,36 \cdot 10^{-3} \cdot T \quad (16)$$

Por fim, a condutividade atmosférica para vapor de água pode ser estimada pela equação (17):

$$C_{at} = \frac{U}{6,25 * \left[\ln\left(\frac{z_m - z_d}{z_0}\right)\right]^2} \quad (17)$$

Onde:

U	velocidade do vento	[m.t <sup>-1</sup> ]
z <sub>m</sub> :	altura de medição do vento	[m]
z <sub>d</sub>	plano de deslocamento zero	[m]
z <sub>0</sub>	rugosidade	[m]

Adotando as aproximações sugeridas por Dingman (2002), isto é, as equações (18), (19) e (20) e substituindo-as em (17), obtém-se a condutividade atmosférica para vapor de água com função apenas da velocidade do vento e da altura da vegetação:

$$z_m = z_{veg} + 2 \quad (18)$$

$$z_d = 0.7 \cdot z_{veg} \quad (19)$$

$$z_0 = 0.1 \cdot z_{veg} \quad (20)$$

$$C_{at} = \frac{U}{6,25 * [\ln\left(\frac{20 + 3 \cdot z_{veg}}{z_{veg}}\right)]^2} \quad (21)$$

Penman (1948) definiu  $E_w$  como a evaporação de uma superfície de água livre. Ele expressou a evaporação de alguns ambientes (solo descoberto, solo úmido e gramíneas),  $E_o$ , como fração da evaporação da superfície livre, conforme a equação (22), onde o fator  $f$  varia para cada ambiente:

$$\frac{E_o}{E_w} = f \quad (22)$$

Onde:

$E_o$	evaporação do ambiente	[m.t <sup>-1</sup> ]
$f$	fator do ambiente	[-]

A abordagem padrão para estimar a evapotranspiração na prática é através da moderação da taxa de evaporação potencial ( $E_p$ ) de acordo com as características do solo e da vegetação. A vantagem desta modelagem é que se torna um procedimento simples, direto e faz uso de variáveis fáceis de medir da atmosfera, do solo e da vegetação (Granger e Gray, 1989).

#### 2.3.4.2. Penman-Monteith

A proposta de Monteith (1965) foi modificar a equação de Penman (1948) para representar a taxa de evapotranspiração de uma superfície vegetal ao invés da evaporação de uma superfície de água livre, incorporando a condutividade do dossel:

$$ET = \frac{\Delta \cdot R_n + \rho_a \cdot c_p \cdot C_{at} \cdot e_a^* (1 - W_a)}{\rho_w \cdot \lambda [\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{C_{at}}{C_d}\right)]} \quad (23)$$

Onde:

ET	evapotranspiração	[m.d <sup>-1</sup> ]
$C_d$	condutividade do dossel para vapor de água	[m.d <sup>-1</sup> ]

Esta equação se tornou conhecida como a equação de Penman- Monteith e tem sido testada com sucesso em diversos ambientes. Uma outra forma de expressar a equação de Penman-Monteith é através da relação entre a evapotranspiração potencial ( $ET_p$ ) e a evapotranspiração real (ET):

$$\frac{ET}{ET_p} = \frac{\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{C_{at}}{C_d}\right)} \quad (24)$$

Observa-se que, quando  $C_d$  tende ao infinito, a equação (23) se reduz à equação de Penman (11), ou seja,  $ET$  tende a  $ET_p$  (24).

No processo de interceptação, a água fica retida na superfície vegetal. Desta forma, pode-se considerar que a evaporação ocorre de forma semelhante a que ocorreria em uma superfície de água livre. Assim, a evaporação do reservatório do dossel pode ser calculada pela equação (11).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Área de estudo

A área de estudo, denominada microbacia do Horto Florestal Terra Dura, está localizada no município de Eldorado do Sul- RS e é delimitada pelas coordenadas UTM 22K 440.902 e 441.931E e 6.662.028 e 6.660.462 S (Datum SAD 69). O clima, segundo a classificação de Köppen, é o Cfa, subtropical ou virginiano (Costa et al, 2009).

A precipitação anual da região é de cerca de 1445 mm, sendo estes distribuídos de forma relativamente uniforme, conforme a Figura 4.

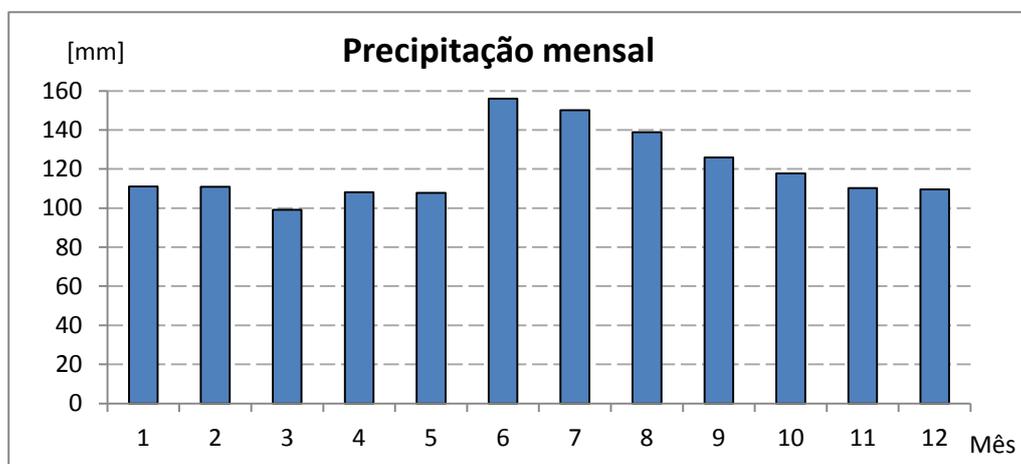


Figura 4. Regime pluviométrico de Eldorado - normal climatológica (1970-2000)

A microbacia do Horto Florestal possui área de 115,9 ha, sendo 86,8 destes plantados com eucalipto para produção de celulose. A microbacia é propriedade da empresa Celulose Riograndense, pertencente ao grupo chileno CMPC (Companhia Manufatureira de Papéis e Papelões). Somente no estado, a empresa possui cerca de 116.000 ha plantados.



*Eucalyptus saligna* plantados em espaçamento 3x3 metros com 5 anos de idade. Esta espécie ocupa atualmente cerca de 19% da microbacia.

Tabela 1. Parâmetros fornecidos pela empresa

$z_{veg}$	altura da vegetação	11,6 [m]
IAF	índice de área foliar	3,0 [m <sup>2</sup> .m <sup>-2</sup> ]

Os demais parâmetros para eucalipto, dos quais não se dispõem medidas de campo, foram estimados utilizando dados da literatura. A Tabela 2 apresenta os valores adotados com suas respectivas referências:

Tabela 2. Valores obtidos da literatura para eucalipto

k	-0,42 [-]	(Soares e Almeida, 2001)
a	0,18 [-]	(Dingman, 2002)
IAF <sub>e</sub>	0,21 [mm]	(Valente et al, 1997)

### 3.2.2. Pastagem

Uma vez que não se dispõem de dados medidos para a pastagem, foram utilizados dados da literatura, conforme a Tabela 3 :

Tabela 3. Valores obtidos da literatura para pastagem

IAF	1,8 [m <sup>2</sup> .m <sup>-2</sup> ]	(Zhou et al, 2006)
k	-0,42 [-]	(Galzerano et al, 2009)
IAF <sub>e</sub>	0,2 [mm]	(Wigmosta etl al, 1994)
a	0,23 [-]	(Zhou et al, 2006)
$z_{veg}$	0,375 [m]	(Zhou et al, 2006)

### 3.3. Variáveis meteorológicas

Para o modelo proposto de estimativa da interceptação, são necessárias cinco variáveis meteorológicas: precipitação total, temperatura média do ar, umidade relativa do ar média, velocidade média do vento e radiação total. Com exceção da radiação solar que, além de medida, foi estimada, os valores das variáveis meteorológicas foram ou medidos ou foram utilizadas as normais climatológicas. Além destas variáveis, para a estimativa da radiação, foram utilizados dados acerca da cobertura de nuvens. Neste

estudo foram utilizadas as coberturas de nuvem mensais a partir de normal climatológica de estação meteorológica mais próxima.

### 3.3.1. Dados medidos

Os dados meteorológicos medidos utilizados são provenientes de três estações meteorológicas. A Tabela 4 apresenta todas as séries de dados meteorológicos utilizados juntamente com a frequência e o período dos dados.

Tabela 4. Fonte dos dados meteorológicos utilizados

Dado	Frequência	Estação	Responsável	Período
Precipitação	horária	in situ	CMPC	2009
Precipitação	mensal	Eldorado	UFRGS	1970-2000*
Umidade do ar	horária	in situ	CMPC	2009
Umidade do ar	mensal	Eldorado	UFRGS	1970-2000*
Velocidade vento	horária	in situ	CPMC	2009
Velocidade vento mensal	mensal	Eldorado	UFRGS	1970-2000*
Radiação	horária	in situ	CMPC	2009
Cobertura de nuvens	mensal	Encruzilhada do Sul	INMET	1961-1990*
Temperatura do ar	horária	in situ	CMPC	2009
Temperatura do ar	mensal	Eldorado	UFRGS	1970-2000*

\* Normal climatologica

### 3.3.2. Estimativa da Radiação Solar

Da mesma forma que Fu e Rich (2002) usaram parâmetros de transmissividade e proporção difusiva para condições atmosféricas médias, uma vez que não dispunham destes dados em uma base diária, neste estudo, foram utilizados os dados de cobertura de nuvens provenientes da normal climatológica de Encruzilhada do Sul.

A transmissividade e a difusividade atmosférica foram calculadas utilizando as equações (26) e (27), adaptação das equações (2) e (3) propostas por Kasten and Czeplak (1980):

$$\tau_{atm} = 1 - 0,75(n)^{3,4} \quad (26)$$

$$Dif = 0,2 + 0,7(n)^2 \quad (27)$$

Onde:

$\tau_{atm}$	transmissividade atmosférica	[-]
Dif	difusividade atmosférica	[-]
n	fração de cobertura de nuvens	[-]

A estimativa da radiação solar incidente sobre a bacia hidrográfica foi realizada utilizando o software ArcGis (versão 9.3). A ferramenta (Area Solar Radiation) deste programa utiliza apenas o modelo digital de elevação e as características atmosféricas no cálculo da radiação global. O algoritmo completo deste programa pode ser encontrado em Fu e Rich (1999). De forma resumida, o algoritmo pode ser descrito em seis etapas:

### I. Determinação da visibilidade da abóboda celeste:

Para cada célula do MDE (modelo digital de elevação do terreno), é avaliada a obstrução da abóboda celeste causada pela topografia vizinha, através do ângulo de horizonte em diversas direções, conforme a Figura 6:

### II. Determinação do mapa solar

O mapa solar é idêntico para todas as células, pois representa a posição solar e como ela varia ao longo do dia e do ano, conforme a Figura 7:

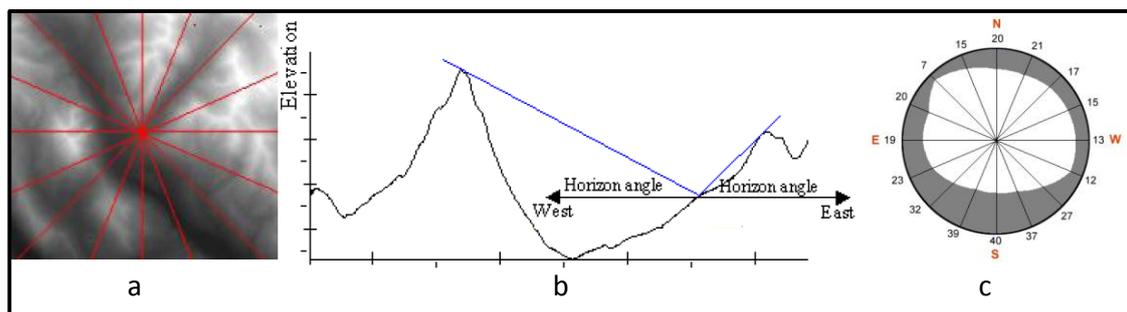


Figura 6. Determinação da visibilidade da abóboda celeste: a) Direções de cálculo; b) Cálculo do ângulo horizontal; c) Visibilidade da abóboda celeste - Fu e Rich (1999)

### III. Determinação do mapa do céu

Este mapa está relacionado apenas com a radiação difusa, que é originada de todos os setores do céu. A construção deste mapa é feita através da divisão da abóboda celeste em setores definidos por azimutes e zênites, conforme a Figura 8.

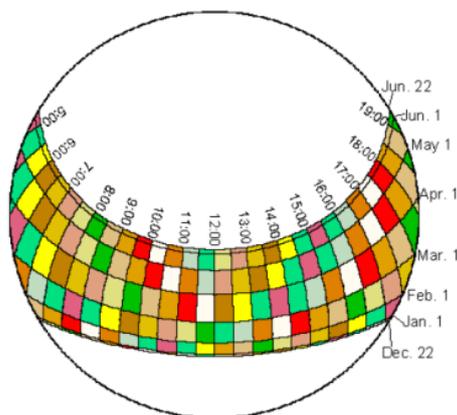


Figura 7. Mapa solar - (Fu e Rich, 1999)

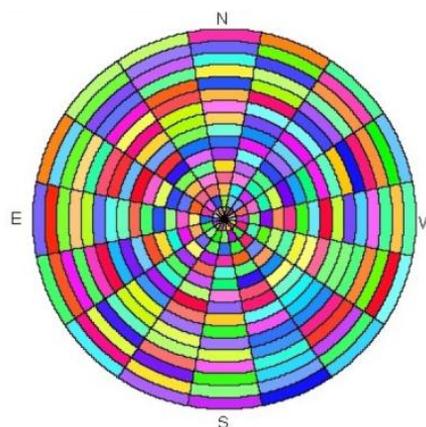


Figura 8. Mapa do céu - (Fu e Rich, 1999)

### IV. Cálculo da radiação direta:

O algoritmo calcula a radiação direta para cada setor do mapa solar que esteja obstruído pelo relevo circunvizinho. A radiação direta total que atinge a superfície é a soma das radiações diretas de cada setor do mapa solar.

### V. Cálculo da radiação difusa

Foi utilizado o modelo de céu uniformemente nublado, isto é, considerou-se que todos os setores da abóboda celeste emitem radiação difusa de mesma intensidade. Assim, a radiação difusa é calculada utilizando o mapa do céu levando em conta o sombreamento causado pelo relevo circunvizinho.

### VI. Cálculo da radiação global:

A radiação global é calculada com a soma das radiações difusa e global. O resultado obtido é a radiação global acumulada durante o período de um dia para cada célula do arquivo raster. Considerou-se que a radiação incidente é homogênea para toda a bacia hidrográfica, de forma que a radiação global utilizada é a média aritmética da radiação global de cada célula pertencente à bacia hidrográfica. Para redução dos efeitos de borda, foi calculada a radiação solar para uma área maior que a bacia hidrográfica.

O modelo digital de elevação do terreno utilizado foi o ASTER GDEM. Este modelo possui resolução espacial de 30 metros e foi obtido gratuitamente do site da NASA (disponível em <https://wist.echo.nasa.gov/api>).

A radiação global diária acumulada foi estimada para 27 dias ao longo do ano, espaçados por no máximo 15 dias.

### 3.4. Modelos Hidrológicos de Interceptação

Foram propostos quatro alternativas para o cálculo da interceptação da precipitação por eucaliptos. Os modelos diferem na forma como o reservatório vegetal é preenchido e na demanda de dados meteorológicos utilizados. A interceptação pela pastagem foi estimada apenas pelo modelo considerado mais completo.

Algumas considerações foram feitas nos modelos:

- A radiação global é constante em toda a microbacia;
- O relevo não influencia na interceptação;
- A precipitação é vertical;
- Os dados da vegetação utilizados são representativos da área analisada.

A seguir são brevemente descritos os cinco modelos propostos:

**M1:** Esta é a abordagem mais complexa deste trabalho, o modelo utiliza os dados meteorológicos horários e considera que o enchimento do reservatório vegetal ocorre de forma exponencial. Por ser o mais sofisticado, é considerado como referência para os modelos 2, 3 e 4.

**M2:** Este modelo utiliza a mesma base de dados que o M1, contudo, considera que o enchimento do reservatório ocorre de forma linear. Assim, esta simplificação tende a superestimar as perdas por evaporação, uma vez que considera que toda a precipitação coberta pode ser retida no dossel se este não estiver com sua capacidade de armazenamento completa.

**M3:** Por sua vez, é uma simplificação do modelo 2. A única diferença está no espaçamento de tempo, pois este modelo é diário. A base de dados meteorológicos utilizados são os mesmos dos modelos 1 e 2, porém, os dados efetivamente utilizados são ou as médias diárias (temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento) ou os valores acumulados ao longo do dia (precipitação e radiação).

**M4:** Por sua vez, é uma simplificação do modelo 3. Além de utilizar um espaçamento temporal diário, a única variável meteorológica medida no ano de estudo é a precipitação, pois as demais foram estimadas através de normais climatológicas. Ainda, a radiação foi estimada através do modelo digital de elevação do terreno e de dados de cobertura de nuvens de normal climatológica.

**M5:** A estrutura deste modelo é idêntica ao modelo 1, contudo, a cultura vegetal analisada é a pastagem ao invés da plantação de eucalipto.

A Tabela 5 apresenta o resumo dos modelos utilizados neste trabalho.

Tabela 5. Resumo das características dos modelos

Modelo	1	2	3	4	5
Cultura vegetal	Eucalipto	Eucalipto	Eucalipto	Eucalipto	Pastagem
Espaçamento temporal	horário	horário	diário	diário	horário
Enchimento	exponencial	linear	linear	linear	exponencial
Dados meteorológicos	medidos	medidos	medidos	normais climatológicas	medidos
Radiação	Medida	Medida	Medida	Estimada	Medida

Os modelos de interceptação avaliados seguem uma mesma lógica temporal, isto é, consideram que a toda a precipitação acumulada no espaçamento de tempo,  $\Delta t$ , ocorre no início do período, a drenagem ao solo ocorre após a precipitação, e a evaporação ocorre com mesma intensidade ao longo de todo o período. Cada processo é discutido nas seções seguintes, o balanço hidrológico na superfície vegetal pode ser expresso pela equação (28):

$$S(t + 1) = S(t) + P_r(t) - D(t) - E(t) \quad (28)$$

Desta forma, o modelo diário, por exemplo, considera que a precipitação acumulada diária ocorre de forma instantânea no início do dia. Em seguida o excesso de água é drenado e, ao longo do dia, parte ou toda a água retida é evaporada. De forma análoga, o modelo horário considera que a precipitação acumulada horária ocorre de forma instantânea no início de cada hora seguida da drenagem e evaporação.

Por se tratar de uma cultura esparsa, existe uma parcela da área que é coberta e uma parcela que é descoberta. De forma semelhante à equação (7), define-se aqui a cobertura vegetal "c", como a razão entre a área coberta e a área total:

$$c = \frac{A_c}{A_t} \quad (29)$$

Onde:

$c$	cobertura vegetal	[-]
$A_c$	área coberta	[m <sup>2</sup> ]
$A_t$	área total	[m <sup>2</sup> ]

Considerando que a chuva seja vertical, a interceptação pela cobertura vegetal só ocorrerá na parcela coberta. Assim, as precipitações na área coberta e na área descoberta são dadas pelas equações (30) e (31):

$$P_c = P_t \cdot c \quad (30)$$

$$P_{des} = P_t \cdot (1 - c) \quad (31)$$

Onde:

$P_t$	precipitação total	[mm.t <sup>-1</sup> ]
$P_c$	precipitação coberta	[mm.t <sup>-1</sup> ]
$P_{des}$	precipitação descoberta	[mm.t <sup>-1</sup> ]

As folhas da copa do eucalipto atuam como pequenos reservatórios capazes de reter, em sua superfície, parte da precipitação coberta. Podemos representar todos estes pequenos reservatórios como um único reservatório de capacidade  $C_{max}$ , conforme a equação (6) previamente apresentada:

$$C_{max} = IAF \cdot IAF_e \quad (6)$$

### 3.4.1. Detenção da precipitação

Conforme discutido na seção 2.3.2, existem basicamente duas alternativas para a modelagem da detenção. Em ambos os casos, considera-se que o aumento do nível do reservatório é devido apenas à precipitação detida. Assim, imediatamente após a precipitação, têm-se:

$$S(t + 1) = S(t) + P_d(t) \quad (32)$$

A diferença das abordagens linear e exponencial está na forma como a precipitação detida é calculada. A modelagem linear é a mais simplificada e foi aplicada nos modelos 2, 3 e 4, enquanto a modelagem exponencial foi utilizada somente no modelo 1. A seguir são descritas as metodologias adotadas para cada abordagem.

#### 3.4.1.1. Detenção linear

A detenção linear considera que toda a precipitação coberta ( $P_c$ ) contribui para o enchimento do reservatório. Desta forma, a precipitação detida é igual a precipitação coberta:

$$P_d = P_c \quad (33)$$

Logo,

$$S(t + 1) = S(t) + P_c(t) \quad (34)$$

Observa-se que aparentemente o reservatório vegetal não está limitado à capacidade máxima de armazenamento, contudo, caso haja excesso, este será drenado de forma instantânea.

#### 3.4.1.2. Detenção exponencial

Esta abordagem considera que o enchimento do reservatório ocorre de forma exponencial, isto é, quanto mais cheio está, mais lentamente será o processo de enchimento. Considerando o reservatório inicialmente vazio, após a precipitação, têm-se:

$$S(t + 1) = C_{\max} \left( 1 - e^{\frac{-P_c}{C_{\max}}} \right) \quad (35)$$

E, neste caso, a precipitação detida é o nível do reservatório ao final da precipitação:

$$P_d = C_{\max} \left( 1 - e^{\frac{-P_c}{C_{\max}}} \right) \quad (36)$$

Supondo que o nível inicial do reservatório seja  $S_0$ , substituindo  $S$  por  $S_0$  em (34) e isolando  $P_c$ , obtém-se a precipitação  $P_0$  necessária para atingir tal nível:

$$P_0 = -C_{\max} \cdot \ln \left( 1 - \frac{S(t)}{C_{\max}} \right) \quad (37)$$

Considerando  $P_f$  como sendo a soma de  $P_0$  e  $P_c$ , obtém-se:

$$P_f = P_0 + P_c \quad (38)$$

$$P_f = P_c - C_{max} \cdot \ln\left(1 - \frac{S(t)}{C_{max}}\right) \quad (39)$$

Finalmente, substituindo  $P_c$  por  $P_f$  em (35), chega-se ao nível final do reservatório como função do nível inicial e da precipitação acumulada:

$$S(t+1) = C_{max} \left( 1 - e^{\frac{C_{max} \cdot \ln\left(1 - \frac{S(t)}{C_{max}}\right) - P_c}{C_{max}}} \right) \quad (40)$$

Observa-se que se  $S(t) = 0$ , a equação (40) se reduz à equação (35).

A precipitação detida pode ser expressa pela diferença os níveis final e inicial do reservatório, isto é:

$$P_d = S(t+1) - S(t) \quad (41)$$

### 3.4.2. Drenagem

A drenagem do dossel é a parcela da precipitação coberta que não fica retida no reservatório do dossel. Considera-se que ela ocorra de forma instantânea e imediatamente após a precipitação.

No caso da detenção linear, ela só ocorre quando o nível do reservatório é superior à capacidade de armazenamento. Assim, se o nível máximo for ultrapassado, a drenagem é calculada pela equação (40):

$$D(t) = S(t-1) + P_d(t) - C_{max} \quad (42)$$

No caso da detenção exponencial, sempre que houver precipitação haverá drenagem. A drenagem neste caso pode ser entendida como a diferença entre a precipitação coberta e a precipitação retida:

$$D(t) = P_c(t) - P_d(t) \quad (43)$$

Substituindo (41) em (43), obtém-se:

$$D(t) = P_c(t) + S(t) - S(t+1) \quad (44)$$

### 3.5. Evaporação da precipitação retida na superfície vegetal

Conforme discutido na seção 3.4, a evaporação da água presente no reservatório somente é iniciada após ocorrer a drenagem. Desta forma, a evaporação real máxima é limitada à capacidade máxima de armazenamento para qualquer que seja o intervalo de tempo adotado.

A evaporação potencial  $E_p$  foi calculada através da equação de Penman-Monteith, conforme a equação (45). As variáveis necessárias ao cálculo da  $E_p$  são apresentadas na Tabela 6 juntamente com os valores ou métodos de cálculo adotados.

$$E_p = \frac{\Delta \cdot R_n + \rho_a \cdot c_p \cdot C_{at} \cdot e_a^* (1 - W_a)}{\rho_w \cdot \lambda_v (\Delta + \gamma)} \quad (45)$$

Segundo Valente et al (1997), a evaporação da superfície vegetal só ocorre na área coberta, e, portanto, varia linearmente com a cobertura vegetal. Desta forma, a evaporação real da superfície vegetal ( $E_r$ ) foi calculada como o produto entre a evaporação potencial e a cobertura vegetal:

$$E_r = E_p \cdot c \quad (46)$$

Tabela 6. Resumo das variáveis utilizadas no cálculo da evaporação

Variável	Método de cálculo	Referência	
$\Delta$	taxa de variação da pressão de saturação	Equação (14)	Dingman, 2002
$R_n$	radiação efetiva	Equação (12)	Penman, 1948
$\rho_a$	massa específica do ar	1.22 kg.m <sup>-3</sup>	Dingman, 2002
$c_p$	calor específico do ar seco	10 <sup>-3</sup> MJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	Dingman, 2002
$C_{at}$	condutividade atmosférica para vapor de água	Equação (30)	Dingman, 2002
$e_a^*$	pressão de saturação do ar	Equação (15)	Dingman, 2002
$W_a$	umidade relativa do ar	Variável	Dado meteorológico
$\rho_w$	massa específica da água	1000 kg.m <sup>-3</sup>	Dingman, 2002
$\lambda_v$	calor latente de vaporização	Equação (23)	Dingman, 2002
$\gamma$	constante psicrométrica	Equação (13)	Dingman, 2002

Contudo, a evaporação real está limitada à disponibilidade de água no reservatório foliar, isto é, se torna nula a partir do momento em que o reservatório está vazio.

#### 4. RESULTADOS

Os resultados foram divididos em cinco tópicos independentes, porém inter-relacionados. O primeiro é referente à precipitação, compara-se as precipitações medidas no ano de 2009 com as precipitações da normal climatológica. O segundo trata da radiação solar e nele são comparadas as radiações medida e estimada. O terceiro trata da evaporação potencial da água interceptada na superfície vegetal. O quarto tópico é referente à interceptação esperada para os dois tipos de vegetação. O quinto e último tópico apresenta os resultados do impacto esperado na interceptação ao converter área de pastagem em plantação de eucalipto.

##### 4.1. Precipitação

A distribuição temporal da precipitação é apresentada na Figura 9. Observa-se que o ano de estudo possui comportamento distinto da normal climatológica. A maior parte da precipitação, cerca de 76%, ocorreu de agosto a janeiro, sendo que era esperado que neste período a precipitação fosse próxima de 49% do total anual.

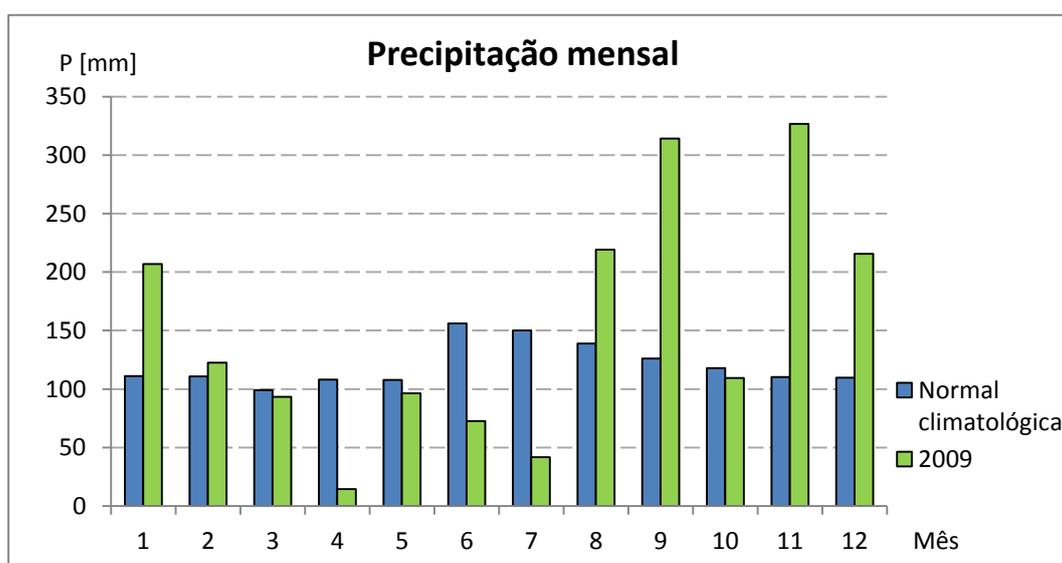


Figura 9. Precipitação mensal

Além da variação na distribuição temporal, no ano de 2009 a precipitação total foi de 1833 mm, isto é, aproximadamente 27% acima da esperada pela normal climatológica (1445mm).

## 4.2. Radiação Solar

Foram calculadas as radiações acumuladas para 27 dias. Foi utilizado um espaçamento temporal de 15 dias, e também foram calculadas as radiações nos dias especiais, isto é, o mais longo e o mais curto do ano. A Figura 10 apresenta a variação da radiação ao longo do ano. Com base nestes dias, foi ajustada a equação (47) para a interpolação.

$$R_d = 5130,294 + 2537,42 \cdot \cos(0,017214 \cdot D_j) - 474,671 \cdot \text{sen}(0,017214 \cdot D_j) \quad (47)$$

Onde:

$R_d$	Radiação diária acumulada	[W.h.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> ]
$D_j$	Dia do calendário Juliano	[1-365]

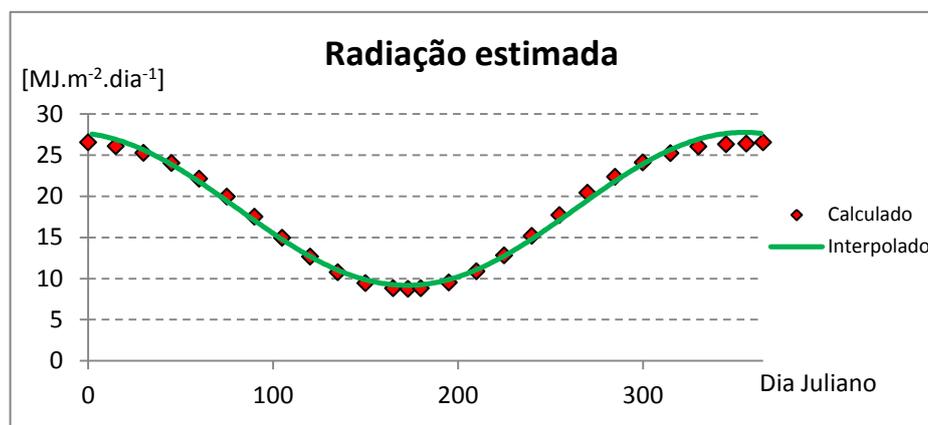


Figura 10. Radiação estimada

A Figura 11 apresenta a radiação acumulada para cada dia do ano. Observa-se que as medições diárias apresentam grande variação. Esta variação é causada principalmente devido às variações na cobertura de nuvens. Contudo, a média quinzenal da radiação diária possui comportamento semelhante ao da radiação estimada, isto é, maiores valores de novembro a fevereiro e menores valores de maio a agosto.

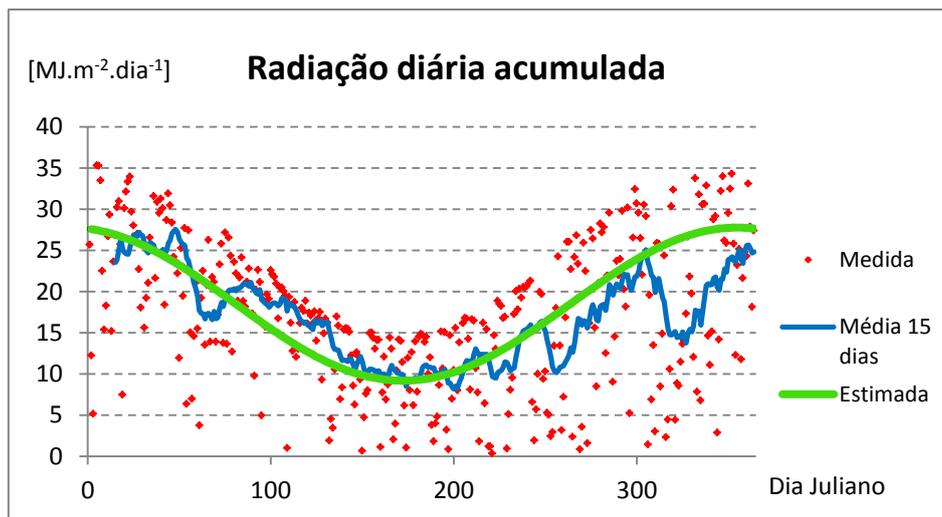


Figura 11. Radiação diária - 2009

Os resultados da radiação mensal acumulada são ilustrados na Figura 12. Observa-se que nos meses de janeiro, setembro, novembro e dezembro as estimativas de radiação superestimam os valores das medições. Levando em conta os resultados da precipitação, observa-se que estes meses são os mesmos em que a precipitação medida é muito acima da esperada pela normal climatológica. Desta forma, o aumento da cobertura de nuvens devido à precipitação pode ter sido o responsável pela redução da radiação. Por outro lado, nos meses de abril, maio, junho e julho as estimativas de radiação subestimam os valores das medições e estes são os meses em que a precipitação mensal foi inferior à normal climatológica. Uma vez que a estimativa da radiação foi realizada com base na cobertura de nuvens da normal climatológica, as variações neste parâmetro no ano de análise não são incorporadas no cálculo e estas se tornam fonte de erro. Assim, observa-se que o método utilizado apresenta menores erros quando a precipitação é semelhante à precipitação da normal climatológica.

A radiação anual acumulada medida foi de 6260 MJ.m<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup> enquanto a radiação estimada foi de 6714 MJ.m<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup>. Assim, os resultados do cálculo da radiação através do modelo digital de elevação do terreno e da cobertura de nuvens de normais climatológicas foram superestimados em 7,2%.

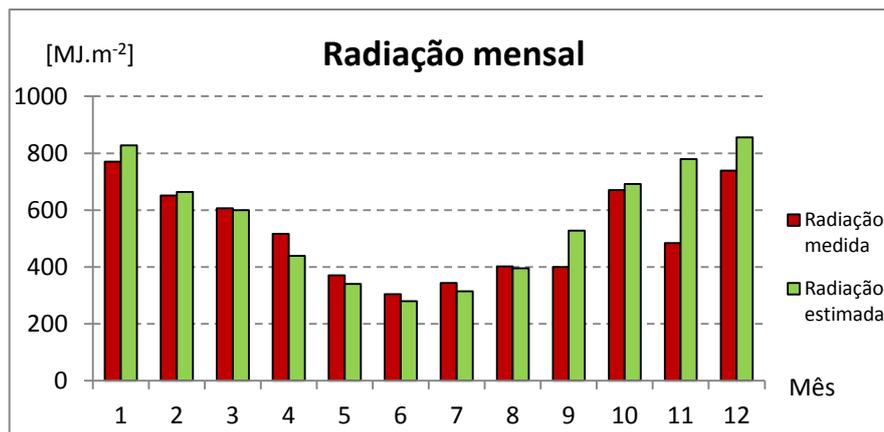


Figura 12. Radiação mensal - 2009

### 4.3. Evaporação potencial

A evaporação potencial calculada pela equação de Penman-Monteith foi calculada conforme o espaçamento de tempo de cada modelo. Nas simulações horários (1, 2 e 5), os dados meteorológicos utilizados foram medidos de hora em hora. Na simulação diária (3), os dados utilizados foram os mesmos das simulações horárias, porém foram ou acumulados ao longo do dia (radiação e precipitação) ou são médias das variáveis ao longo do dia (temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento). A simulação diária (4) utilizou os dados meteorológicos mais simples e de fácil obtenção. Somente a precipitação diária é referente ao ano em questão. Os dados de temperatura média do ar, umidade relativa do ar média e velocidade média do vento foram obtidos de normais climatológicas.

A Figura 13 apresenta a evaporação potencial calculada para cada um dos cinco modelos em cada mês do ano de 2009. Os resultados dos modelos horários 1 e 2 são iguais, uma vez que são referentes à cultura vegetal, utilizam os mesmos dados meteorológicos e foram calculados para mesmo intervalo de tempo.

Quando comparados ao modelo 3, observa-se que os modelos 1 e 2, em qualquer mês, apresentam evaporação potencial levemente superior. A única diferença entre estes modelos é o intervalo de tempo. Essa diferença ocorre, pois a equação de Penman-Monteith, assim como as variáveis por ela utilizada, não variam de forma linear com as variáveis meteorológicas.

O modelo 4 difere de forma mais significativa dos modelos anteriores. Observa-se que a evaporação potencial é novamente superestimada nos meses de janeiro, setembro, novembro e dezembro e subestimada nos meses de abril e maio. Estes

resultados estão em acordo com os resultados da radiação, uma vez que esta é uma das componentes da evaporação.

O modelo 5 é o que apresenta a menor evaporação potencial para a maioria dos meses ao longo do ano, com exceção de abril e maio, meses nos quais a mínima evaporação potencial é atingida pelo modelo 4. Ressalta-se que os valores de radiação são exatamente os mesmos utilizados nos modelos 1 e 2, contudo, é importante notar que por se tratar de uma cobertura vegetal diferente, na pastagem, cuja altura difere muito da plantação de eucalipto, a componente de transferência de massa da equação de Penman-Monteith é alterada de forma relevante.

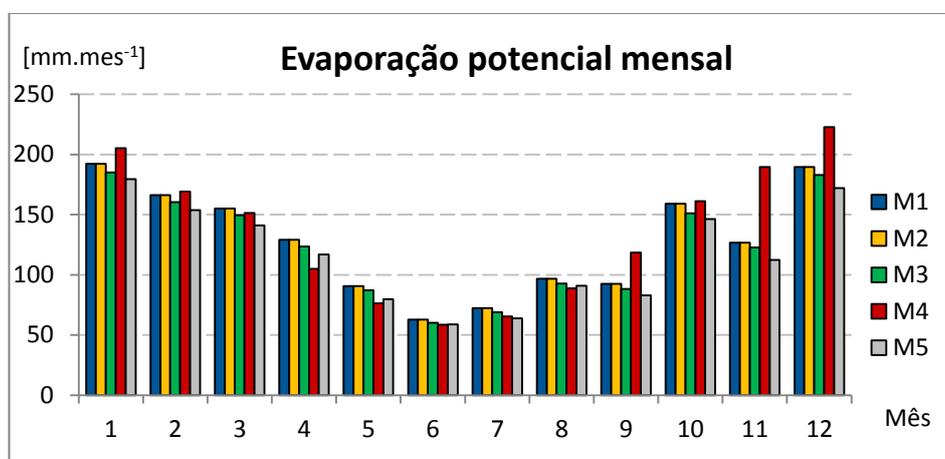


Figura 13. Evaporação potencial - 2009

Os resultados anuais estão resumidos na Tabela 7. Observa-se o modelo 4 apresentou a maior evaporação potencial (1612 mm.ano<sup>-1</sup>), este valor superestimado (aumento de 5,2%) pode ser explicado pela utilização da radiação solar estimada, pois esta foi superestimada em 7,2% com relação à radiação medida.

Tabela 7. Evaporação anual potencial

	Radiação acumulada	Evaporação potencial
M1	6260 MJ.m <sup>-2</sup> .ano <sup>-1</sup>	1533 mm.ano <sup>-1</sup>
M2	6260 MJ.m <sup>-2</sup> .ano <sup>-1</sup>	1533 mm.ano <sup>-1</sup>
M3	6260 MJ.m <sup>-2</sup> .ano <sup>-1</sup>	1472 mm.ano <sup>-1</sup>
M4	6714 MJ.m <sup>-2</sup> .ano <sup>-1</sup>	1612 mm.ano <sup>-1</sup>
M5	6260 MJ.m <sup>-2</sup> .ano <sup>-1</sup>	1398 mm.ano <sup>-1</sup>

#### 4.4. Interceptação

Analisando os modelos horários para cultura de eucalipto M1 e M2, observa-se um aumento na estimativa da interceptação quando utilizado um modelo linear de enchimento de reservatório vegetal comparado ao modelo exponencial. Esta tendência está de acordo com o enunciado da metodologia/ teoria. Contudo, as diferenças observadas são muito pequenas (2,2% no acumulado anual). Os resultados de interceptação dos modelos diários M3 e M4 foram, respectivamente, 8,5% e 9,7% superiores ao modelo horário de referência (M1). Ainda, analisando todas as estimativas de interceptação para cultura de eucalipto e tomando como referência os resultados do modelo 1, observa-se que o modelo 4 apresentou as maiores variações.

Com relação à estimativa de interceptação por pastagens, observou-se um comportamento semelhante à interceptação por eucaliptos, todavia, os valores obtidos foram inferiores para todos os meses ao longo do ano. A

Figura 14 ilustra a variação da interceptação ao longo do ano para cada modelo analisado e a Tabela 8 apresenta os resultados de interceptação acumulada anual.

Tabela 8. Interceptação anual

	Evaporação potencial	Interceptação
M1	1533 mm.ano <sup>-1</sup>	73,9 mm
M2	1533 mm.ano <sup>-1</sup>	75,5 mm
M3	1472 mm.ano <sup>-1</sup>	80,2 mm
M4	1612 mm.ano <sup>-1</sup>	81,1 mm
M5	1398 mm.ano <sup>-1</sup>	42,3 mm

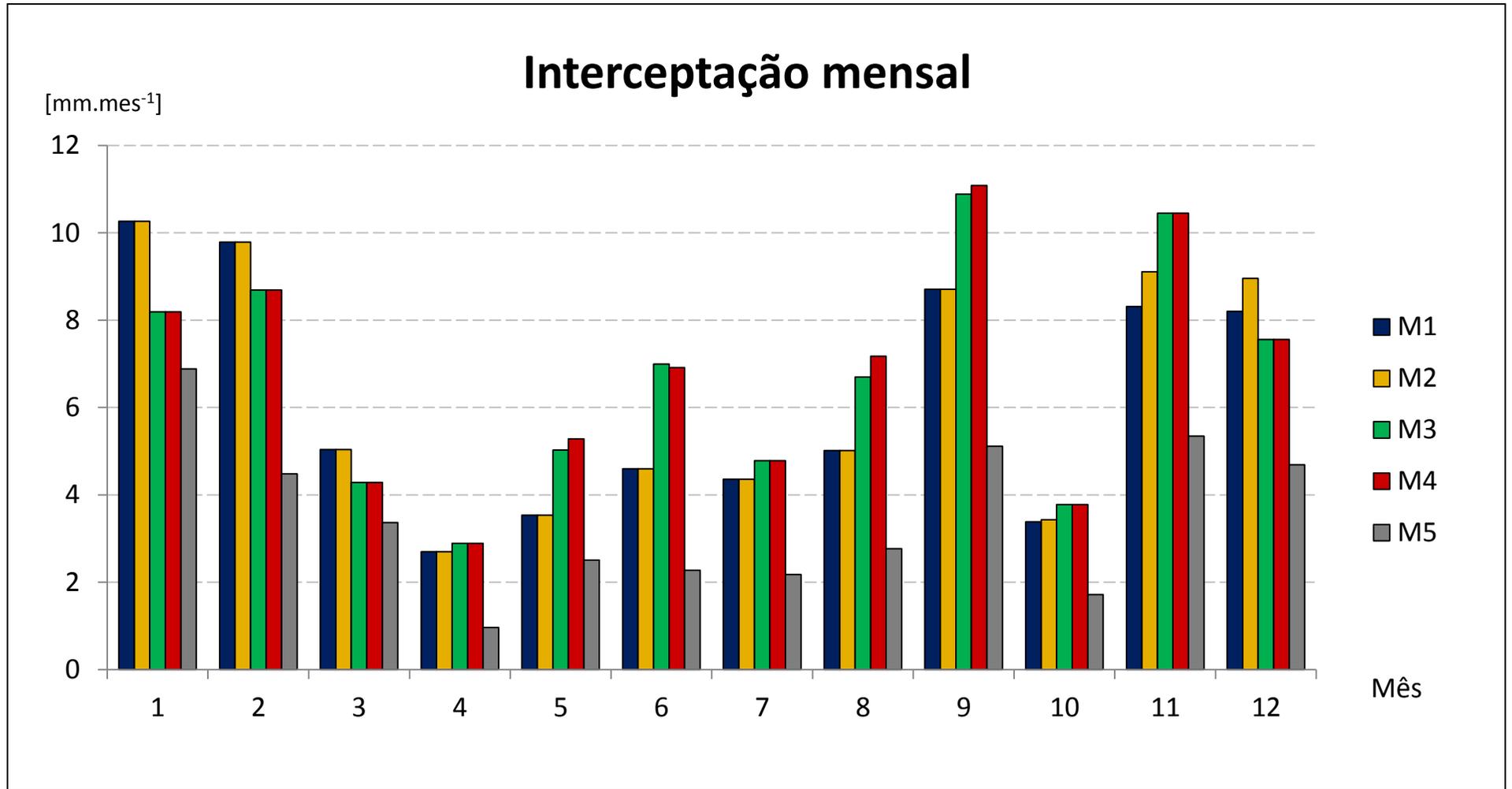


Figura 14. Interceptação mensal

#### 4.5. Impacto ambiental

Conforme discutido na seção 2.1.2, existem diversos impactos ambientais associados com a silvicultura. Todavia, o único impacto ambiental analisado neste estudo foi a variação da interceptação da precipitação causado pela conversão de áreas de pastagem em plantações de eucalipto.

Assim, o impacto ambiental avaliado é definido pela diferença entre a interceptação de área de plantação de eucalipto e área de pastagem. A Figura 15 apresenta a interceptação mensal calculada para a plantação de eucalipto (M1) e para a pastagem (M5). É importante ressaltar que valores de interceptação obtidos neste estudo não são absolutos, pois não foi feita nenhuma comparação com medições reais.

Contudo, pode-se dizer que a conversão de áreas de pastagem em plantações de eucalipto aumenta consideravelmente a interceptação. De acordo com os resultados obtidos, neste caso a interceptação passaria de 2,3% (M5) para 4,0 (M1) da precipitação anual, isto é, a interceptação aumentaria em 73,9%. Nesta área de estudo, representa um aumento de 31,6 mm interceptados.

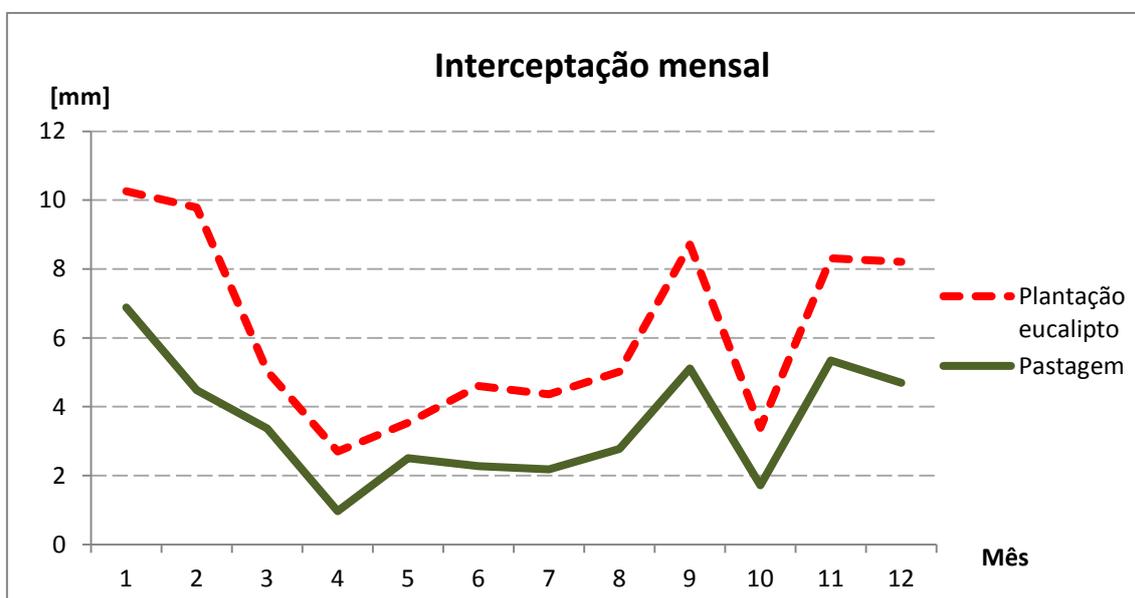


Figura 15. Impacto na interceptação mensal

Esta diferença se deve exclusivamente às características vegetais, uma vez que os dados meteorológicos utilizado foram os mesmos. As características vegetais influem em todos os processos da interceptação: a cobertura vegetal está diretamente relacionada com a precipitação coberta e, por conseqüência, com a precipitação passível de ser retida; o índice de área foliar e a capacidade de armazenamento específica são

determinantes no cálculo da capacidade máxima de armazenamento e, assim, determinam a lâmina máxima de água que pode ser retida para cada intervalo de tempo analisado; o albedo foliar e a altura da vegetação estão relacionados com a evaporação potencial, o albedo influencia a radiação efetiva e a altura da vegetação influencia a condutividade atmosférica.

## 5. CONCLUSÕES

Foi utilizado um método simplificado para a estimativa da radiação solar diária. A grande vantagem desta metodologia consiste na baixa demanda de dados, necessitando apenas do modelo digital de elevação do terreno e de dados de cobertura de nuvens, possibilitando que esta seja aplicada em locais com baixa disponibilidade de dados meteorológicos. Neste estudo foram utilizados dados de cobertura de nuvens de normal climatológica, sendo que os resultados obtidos foram semelhantes à radiação medida em campo. Contudo, observou-se que quando a precipitação é muito superior a esperada pela normal climatológica, a radiação é superestimada e, quando a precipitação é muito inferior a esperada, a radiação é subestimada.

Os resultados de evaporação potencial apresentaram flutuações anuais semelhantes à radiação, evidenciando a importância desta componente na evaporação.

Considerando as estimativas de interceptação para cultura de eucalipto e tomando como referência os resultados do modelo 1, observa-se que o modelo 4 apresentou as maiores distorções (9,8% ao ano). Contudo, como este modelo utiliza a radiação estimada e dados meteorológicos de normais climatológicas, assim esta metodologia embora apresente resultados menos precisos, possui grande aplicação, pois pode ser utilizada em regiões com baixa disponibilidade de dados climatológicos. Assim, com base neste estudo, o impacto na interceptação pode ser estimado com relativa precisão através desta metodologia proposta.

Por fim, o impacto na interceptação foi avaliado. Os resultados deste estudo mostram que a conversão de áreas de pastagem em plantações de eucalipto aumentariam a interceptação em 73,9%.

## 6. TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi avaliado somente o impacto na interceptação, assim, propõem-se que em trabalhos futuros seja avaliado o impacto na evapotranspiração, isto é, que seja incorporado à atual metodologia os processos de transpiração e evaporação do solo.

Ainda, uma vez que a interceptação depende das características vegetais, e estas variam com o crescimento do vegetal, propõem-se que seja avaliado os impactos na interceptação e/ou evapotranspiração ao longo de um período mais longo, que seja capaz de incorporar as variações temporais nas características vegetais, desde a plantação até a extração da madeira.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, A. C.; Siggins, A.; Batista, T.R.; Beadle, C.; Fonseca, S. e Loos, R., 2010. **Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on Eucalyptus plantation production with 3-PG, a process-based growth model.** Forest Ecology and Management, 259: 1730-1740

Amaral, T. M., 2002. **Inclusão do controle de deflúvio em modelos de gestão florestal: um estudo no vale do Paraíba – SP.** Dissertação (mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – USP. Piracicaba

Aston, A. R., 1979. **Rainfall interception by eight small trees.** Journal of Hydrology, 42: 383-396.

Calder, I.R., 1986. **A stochastic model of rainfall interception.** Journal of Hydrology, 89: 65-71

Carbon, B.A; Bartle, G.A; Murray, A.M e MacPherson, D.K., 1980. **The distribution of root length, and the limits to flow of soil water to roots in a dry sclerophyll forest.** Forest Science, 26: 656-664

Costin, A,B e Wimbush, D.J., 1961. **Studies in catchment hydrology in the Australian Aps, IV. Interception by trees of rain, cloud and fog.** Div. Plant. Ind., Tech. Pap. No. 16. CSIRO, Melbourne, Vic.

Costa, A.M.; Curi, N.; Menezes, M.D.; Araújo, E.F. e Marques, J.J., 2009. **Levantamento detalhado de solos da microbacia hidrográfica do horto florestal Terra Dura (RS) e considerações sobre escalas de mapeamento.** Ciênc. agrotec., 33: 1272-1279

Dingman, S. L., 2002. **Physical Hydrology.** Prentice Hall, Upper Saddle River, 646pp.

Fahey, B.D. e Watson, A.J., 1991: **Hydrological impacts of converting tussock grassland to pine plantation, Otago, New Zealand.** Journal of Hydrology (New Zealand), 30: 1-15.

Fepam, 2007. **Zoneamento ambiental para a atividade de silvicultura no RS - Bases dos estudos de fauna, flora e recursos hídricos.** Disponível em: <[http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/zoneam\\_silvic.asp](http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/zoneam_silvic.asp)>

Fu, P. e Rich, P.M., 1999. **Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales.** Proceedings of the Nineteenth Annual ESRI User Conference

Fu, P. e Rich, P.M., 2002. **A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry.** Computers and Electronics in Agriculture 37: 25–35

Galzerano, L.; Rossiello, R.O.P.; Moulin, G.F.; Silva, R.P. e Morgado, E. S., 2009. **Índice de área foliar e interceptação de radiação solar durante o desenvolvimento inicial do capim tifton 85.** XIII INIC, IX EPG e III INIC Jr.

Gash, J.H.C., 1979. **An analytical model of rainfall interception by forests.** Q. J. of the Royal Meteorological Society, 105: 43-55

Gash, J.H.C.; Lloyd, C.R; e Lachaud, G., 1995. **Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model.** Journal of Hydrology, 170: 79-86

Granger, R.J. e Gray, D.M., 1989. **Evaporation from natural nonsaturated surfaces.** Journal of Hydrology, 111: 21-29

Herwitz, S.R., 1985. **Interception storage capacities of tropical rainforest canopy trees.** Journal of Hydrology, 77: 237-252

Horton, R. E., 1919. **Rainfall interception.** Monthly Weather Review, vol. 47, n.9, 603-623

Hubbard, R.M.; Stape, J.; Ryan, M.G.; Almeida, A.C. e Rojas, J., 2010. **Effects of irrigation on water use and water efficiency in two fast growing Eucalyptus plantations.** Forest Ecology and Management 259: 1714-1721

Kasten, F. e Czeplak, G., 1980. **Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud.** Solar Energy, 24: 177-189

Lima, W. P., 1993. **Impacto ambiental do eucalipto.** Edusp, São Paulo, 301p.

Liu S., 1996. **Evapotranspiration from cypress (Taxodium ascendens) wetlands and splash pine (Pinus elliottii) uplands in north-central Florida.** Dissertação Ph.D. University of Florida, Gainesville, Fl.

Liu, S., 1997. **A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies.** Ecological Modelling, 99: 151-159

Liu, S., 1998. **Estimation of rainfall storage capacity in the canopies of cypress wetlands and splash pine uplands in North-Central Florida.** Journal of Hydrology, 207: 32-41

Monteith, J. L., 1965. **Evaporation and environmental.** Symp. Soc. Exp. Biol., 19: 205-234

Penman, H.L., 1948. **Natural evaporation from open water, bare soil and grass.** Proc. Soc. London A193: 120-146

Pitman, J.I., 1989. **Rainfall interception by bracken in open habitats - Relations between leaf area, canopy storage and drainage rate.** Journal of Hydrology, 105: 315-334

Pyror, L.D., 1976. **The biology of Eucalytus.** London, Edward Arnold, 1976. 82p.

Rich, P.M; Hetrick, W.A e Saving, S.C., 1994. **Using Viewshed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology.** American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers, pp 524-529

Rutter, A.J; Kershaw, K.A; Robins, P.C e Morton A.J, 1971. **A predictive model of rainfall interception in forest. I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine.** Agricultural Meteorology, 9: 367-384

Soares, J.V. e Almeida, A.C., 2001. **Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing Eucalyptus plantation in Brazil.** Journal of Hydrology, 253: 130-147

Stape, J.L.; Binkley, D. e Ryan, M.G., 2004. **Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil.** Forest Ecology and Management, 193: 17-31

Valente, F.; David, J. S. e Gash, J.H.C., 1997. **Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forest in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models.** Journal of Hydrology, 190: 141:162

Van Dijk, A.I.J.M, e Bruijnzeel, L.A., 2001. **Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 1. Model description.** Journal of Hydrology, 247: 230-238

Wang, S.; Chen, W., e Cihlar, J., 2002. **New calculation methods of diurnal distribution of solar radiation and its interception by canopy over complex terrain.** Ecological Modelling, 155: 191-204

Whitehead, D. e Beadle, C. L., 2004. **Physiological regulation of productivity and water use in Eucalyptus: a review.** Forest Ecology and Management, 193: 113-140

Wigmosta, M.S.; Vail, L.W. e Lettenmaier, D. P., 1994. **A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain.** Water Resources Research, 30: 1665-1679