

INFLUÊNCIA DA CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA NO CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM RONDÔNIA

Íria Vendrame, Válder F. de Albuquerque e Gilberto Fisch

Centro Técnico Aeroespacial – CTA

Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50 - V. das Acácias – CEP 12228-900 S. José dos Campos, SP

hiria@infra.ita.cta.br, gfisch@aca.iae.cta.br

RESUMO

A partir de dados coletados em Ji-Paraná, Rondônia foi calculada a condutância estomática, através do modelo de Stewart (1988) e a condutância aerodinâmica, ambas horárias, para um sítio onde a floresta foi desmatada (Fazenda Nossa Senhora) e para um sítio de floresta (Reserva Jaru). As medições utilizadas foram efetuadas em períodos compreendidos entre os anos de 1992 e 1993. De posse desses dados foram calculadas a evapotranspiração horária e a evapotranspiração diária, através da equação de Penman Monteith para ambos os sítios.

A seguir, os valores estimados de evapotranspiração através da equação de Penman-Monteith, levando-se em conta o modelo de Stewart para o cálculo da condutância estomática, foram comparados com a evapotranspiração medida pelo aparelho Hydra. Os valores medidos também foram comparados aos de evapotranspiração estimada através da equação de Penman-Monteith, mas considerando-se valores típicos de condutância estomática para as estações chuvosa e seca, em um trabalho desenvolvido anteriormente por Maia Alves (1997), no qual fez-se um estudo utilizando os mesmos dados micrometeorológicos. Tomando-se as medições do aparelho Hydra como dados verdadeiros, verificou-se uma grande melhora na estimativa da evapotranspiração no presente estudo, em relação ao trabalho de Maia Alves, para o sítio de floresta.

INTRODUÇÃO

O Projeto ABRACOS (Anglo Brazilian Amazonian Climate Observation Study), uma parceria entre cientistas brasileiros e britânicos teve como objetivo descobrir como o solo e a vegetação da Amazônia interagiam com a atmosfera para afetar o clima a nível global (Gash e Nobre, 1997).

Para alcançar esse objetivo, foram colhidos dados micrometeorológicos em diferentes sítios da região Amazônica. Dessa forma, conseguiu-se melhorar a maneira de representar a interação vegetação-atmosfera na pastagem, uma vez que esta usualmente substitui a floresta tropical. Coletaram-se também dados climáticos a fim de validar

algumas das previsões dos modelos de circulação geral da atmosfera (MCGA).

Maia Alves (1997) realizou um estudo sobre a análise comparativa do regime hidrológico em áreas de floresta tropical e de pastagem na Amazônia, visando compreender de que forma o desmatamento afeta o ciclo hidrológico da região. Entretanto, ao incluir o efeito do processo estomático na estimativa da evapotranspiração usando a fórmula de Penman-Monteith, o autor utilizou dados de condutância estomática típicos das estações seca e chuvosa. Tais dados de condutância estomática foram obtidos de Wright et al. (1996) e representam as características de apenas um dia de medição.

Visando a complementação do estudo de Maia Alves (1997) e a correção de divergências ocorridas entre valores de evapotranspiração calculados e os valores obtidos experimentalmente, foi realizado o presente estudo, que estima a evapotranspiração usando um modelo de cálculo de condutância estomática, baseado em dados observacionais de radiação solar, de temperatura, de umidade no solo e de déficit de umidade específica.

SÍTIOS EXPERIMENTAIS

Em cada sítio escolhido para coleta de dados foi instalada uma estação meteorológica automática para coleta de dados micro-meteorológicos. Nos sítios de floresta, as estações foram instaladas no topo de torres de alumínio a 50 m e em sítios de pastagem, devido à pequena dimensão da vegetação, as torres tinham dimensões menores.

As estações automáticas mediram fluxo de radiação solar, saldo de radiação, temperatura do ar, umidade específica, velocidade e direção do vento e fluxo de calor conduzido ao solo.

A reserva Jaru é uma reserva florestal de propriedade do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente, localizada a cerca de 80 km de Ji-Paraná (RO) e a 120 m de altitude. É caracterizada por uma altura média do dossel de cerca de 33 m. As maiores espécies de árvores situadas ao redor da torre são: *Cedrella Odorata*, *Inga sp*, *Dioclea cf bicolor Bth.*, *Strychnos Amazonicus Krukoff*, *Protium Polybotrium* e *Leonia Glycicarpa Ruiz*.

O sítio de pastagem Fazenda Nossa Senhora Aparecida, Ji-Paraná (RO), foi estabelecido em outubro de 1991, numa fazenda de gado a 220 m de altitude a cerca de 50 km a nordeste de Ji-Paraná. Esse sítio foi desmatado em 1983 e está no centro de uma área desmatada de aproximadamente 50 km de raio. A grama (*Brachiara Brizantha*) é grumosa e as raízes da cobertura vegetal original ainda podem ser vistas. Essa fazenda com bastante palmeiras, possui poucos troncos de árvores mortas. A pastagem foi queimada um mês antes da instalação da aparelhagem e desde então, não sofreu nova queima até o fim do período de medições. A estação automática está instalada no topo de uma torre de alumínio de 6 m de altura.

METODOLOGIA

O arquivo de dados utilizado para estimativa das variáveis micrometeorológicas dos sítios experimentais representa um ano de cada sítio específico e consiste de uma tabela contendo em cada coluna os seguintes dados (e medições horárias):

Tabela 1. Dados experimentais.

Col.	Dado	Unidade
1	Sítio	---
2	Ano	---
3	Dia	---
4	Hora	TMG
5	Radiação solar global	W/m ²
6	Radiação refletida	W/m ²
7	Saldo de radiação	W/m ²
8	Temperatura de bulbo úmido	°C
9	Temperatura de bulbo seco	°C
10	Velocidade do vento	m/s
11	Direção do vento	Graus
12	Fluxo de calor conduz. ao solo	W/m ²
13	Precipitação	mm

Cálculo da evapotranspiração

A evapotranspiração é comumente calculada pela equação de Penman-Monteith (Monteith, 1965):

$$\lambda E = (sA + \rho C_p(e_{as} - e)g_{av}) / (s + \gamma(1 + g_{av}/g_{sb})) \quad (1)$$

sendo:

$$A = R_n - G - B \quad (2)$$

onde E é a evapotranspiração em mm/dia, λ é o calor latente de vaporização da água em J/kg, A é a energia disponível em W/m², R_n é o saldo de radiação em W/m², G é o fluxo de calor no solo em W/m², B é a variação do armazenamento de energia na biomassa em W/m², s é o coeficiente angular da curva de umidade específica de saturação de vapor d'água versus temperatura do ar, sendo s em Pa/K, C_p é o calor específico do ar, à pressão constante, em J/kg °C, ρ é a densidade do ar seco em kg/m³, e_{as} é a a tensão de vapor de saturação em kPa, e é a tensão de vapor numa temperatura qualquer em kPa γ é a constante psicrométrica em Pa/K, g_{sb} é a condutância stomática em m/s e g_{av} é a condutância aerodinâmica em m/s.

Como os valores medidos são horários para se obter a evapotranspiração diária devem-se somar os 24 valores obtidos para cada dia.

Para o cálculo da evapotranspiração devem ser calculados alguns parâmetros que não são coletados nas estações automáticas. A seguir, apresentam-se as metodologias para determinação desses parâmetros, que são respectivamente: condutância aerodinâmica; energia armazenada na biomassa; déficit de umidade específica e condutância stomática.

Condutância aerodinâmica

O cálculo da condutância aerodinâmica depende da vegetação presente no sítio, se é floresta ou pastagem.

Para sítio de pastagem tem-se, de acordo com Wright et al (1992):

$$G_a = 5,4 V \quad (3)$$

sendo V a velocidade do vento em m/s e G_a a condutância aerodinâmica em m/s.

Segundo Shuttleworth (1989) para sítio de floresta tem-se:

$$G_a = V/33 \quad (4)$$

sendo V a velocidade do vento em m/s e G_a a condutância aerodinâmica em m/s.

Energia armazenada na biomassa

Segundo Moore e Fisch (1986), a variação da energia armazenada na biomassa pode ser estimada através de medidas da temperatura da biomassa e da distribuição da biomassa. A variação dessa energia armazenada pode ser um com-

ponente significativo do balanço de energia em nível horário, quando a quantidade de biomassa é grande (no caso, de florestas tropicais). Apesar disso, estimativas acuradas desse componente do balanço de energia são de difícil obtenção e normalmente desprezadas nos cálculos, principalmente em análises de períodos longos.

Quando representa a média horária, B pode ser uma fração significativa de R_n , especialmente durante períodos de transição tal como à noite, ao nascer e no pôr do sol, ou após uma chuva. Como total diário B pode alcançar 5% a 10% de R_n para dias úmidos ou dias com chuva prolongada.

A variação da energia armazenada na biomassa é composta dos seguintes termos:

$$B = S_b + S_{bc} + S_t + S_q \quad (5)$$

sendo S_b a variação da energia associada com a biomassa do caule, S_{bc} a variação da energia com a biomassa das folhas e galhos, S_t a variação da energia com a variação da temperatura do ar no dossel e S_q a variação da energia com a variação da umidade específica

Porém, nem sempre é possível obter medidas da temperatura da biomassa, da temperatura do ar do dossel e da umidade. Moore e Fisch (1986) propuseram uma parametrização mais simples para o cálculo da energia armazenada na biomassa, em áreas de floresta tropical.

$$B_i = 16,7dT_i + 28,0dq_i + 12,6dT_{i+1} \quad (6)$$

sendo B_i a energia da biomassa armazenada na hora i , ou seja, entre a hora $i-1$ e i , em W/m^2 , dT_i a variação apresentada pela temperatura na hora i , em $^{\circ}C$, dq_i a variação apresentada pela umidade específica na hora i , em g/kg e dT_{i+1} a variação apresentada pela temperatura na hora $i+1$, em $^{\circ}C$.

Déficit de umidade específica

Usou-se a expressão aproximada abaixo para o cálculo da pressão de vapor saturada e_{sa} para temperaturas entre $-5^{\circ}C$ e $50^{\circ}C$:

$$e_{sa} = \exp(a + (bT - c)/(T - d)) \quad (7)$$

onde e_{sa} é a pressão de vapor saturada em mb, $a = 1,80956664$, $b = 17,2693882$, $c = 4717,306081$, $d = 35,86$ e T é a temperatura de bulbo seco em K.

Para o cálculo da pressão de vapor numa temperatura qualquer foi usada a expressão:

$$e = e_{sa} - \gamma (T - T_u) \quad (8)$$

onde T é a temperatura de bulbo seco em $^{\circ}C$, T_u é temperatura de bulbo úmido em $^{\circ}C$, γ é a constante psicrométrica ($0,666 \text{ mb}/^{\circ}C$) e e_{sa} é a pressão de vapor saturada calculada pela Expressão (7), com T igual a temperatura de bulbo úmido em K.

A umidade específica foi obtida a partir da pressão de vapor, através da equação:

$$Q = \varepsilon e 10^3 / (p - 0,378e) \quad (9)$$

onde e é a pressão de vapor em mb, Q é a umidade específica em g/kg , p é a pressão atmosférica (1000 mb) e ε é a relação entre a massa molecular de vapor e a massa molecular do ar seco ($\varepsilon = 0,622$).

O fator 10^3 na Expressão (9) foi usado para que a umidade específica fosse representada em g/kg .

Da mesma forma se obteve a umidade específica de saturação:

$$Q_{sa} = \varepsilon e_{sa} 10^3 / (p - 0,378e_{sa}) \quad (10)$$

onde e_{sa} é tensão de vapor de saturação em mb, Q_{sa} é a umidade específica de saturação em g/kg .

O déficit de umidade específica D_0 correspondente a diferença entre Q_{sa} e Q :

$$D_0 = Q_{sa} - Q \quad (11)$$

Cálculo da condutância estomática

Jarvis (1976) propôs a modelagem analítica da condutância estomática, G_{sb} , para ser usada na equação de Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração. Esse modelo foi adotado em vários sub-modelos de circulação global (MCG's) para vegetação e é baseado em funções semi-empíricas de controle dos estômatos. A máxima condutância estomática, a_1 , é proporcionalmente modificada pelo índice de área foliar, L^* , e pelas variáveis climáticas que influenciam a abertura dos estômatos. O modelo de Jarvis tem a forma:

$$G_{sb} = a_1 L^* f_1(PAR) f_2(T_f) f_3(D_c) f_4(\psi) f_5(C_c) \quad (12)$$

onde as variáveis independentes PAR , T_f , D_c , ψ e C_c são respectivamente, radiação fotossinteticamente ativa, temperatura da folha, déficit de umidade do topo da folhagem, potencial de evaporação da água na folha e concentração de dióxido de carbono no topo da folhagem. Stewart (1988), produziu uma versão operacional desse modelo para florestas, que foi subsequentemente

usada por Gash et al. (1989) e Dolman et al. (1991). Stewart simplificou a parametrização substituindo PAR por radiação solar, S , e potencial de evaporação, ψ , por umidade do solo, θ . A concentração de dióxido de carbono, apesar de ter uma conhecida influência na abertura dos estômatos das plantas (Morison and Gifford, 1983), é excluída desse trabalho e de outros estudos similares (e. g. Stewart, 1988; Kim and Verna, 1991) devido à dificuldade de medição em campo e à falta de confiabilidade dos dados coletados. Porém, os modelos atuais de controle estomático para estimativa de transpiração funcionam relativamente bem para justificar seu uso em GCM's até a próxima geração de modelos que devem incluir o fluxo de gás carbônico como parâmetro.

Segundo Stewart (1988) e Dolman et al. (1991) a equação inicialmente proposta para a condutância estomática em pastagens apresenta a forma final:

$$G_{sb} = a_1 L^* f_1(D_0) f_2(T_0) f_3(S) f_4(\theta) \quad (13)$$

onde a_1 é a máxima condutância estomática por unidade de área foliar, L^* é o índice de área foliar; θ é a umidade contida no solo, T_0 é a temperatura do ar e D_0 é o déficit de umidade específica, dado pela Equação (11), que possui a metodologia de cálculo demonstrada no item "Cálculo de déficit de umidade específica", nela as funções de controle são:

$$f_1(D_0) = \exp(-a_2 D_0) \quad (14)$$

$$f_2(T_0) = [(T_0 - T_l)(T_h - T_0)^t] / [(a_3 - T_l)(T_h - a_3)^t] \quad (15)$$

sendo $t = (T_h - a_3) / (a_3 - T_l)$

$$f_3(S) = (S/1000)[(1000+a_4) / (S+a_4)] \quad (16)$$

$$f_4(\theta) = 0 \text{ para } \theta \leq \theta_w$$

$$f_4(\theta) = (\theta - \theta_w) / (a_5 - \theta_w) \text{ para } \theta_w < \theta < a_5 \quad (17)$$

$$f_4(\theta) = 1 \text{ para } \theta \geq a_5$$

onde T_0 , T_l e T_h são dados em $^{\circ}\text{C}$, S é dado em W/m^2 e θ é a umidade relativa do solo, adimensional. T_l é o limite mínimo de temperatura para ocorrer transpiração, T_h é o limite máximo de temperatura para ocorrer transpiração, θ_w é a umidade do solo no ponto de murchamento da planta, ou seja, a umidade abaixo da qual a planta não conseguem mais captar água do solo. a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 são parâmetros empíricos encontrados por oti-

mização não linear. Para cada sítio é calculado um conjunto de parâmetros empíricos a_1 - a_5 , além de θ_w para sítio de pastagem.

Esse cálculo de condutância estomática pode ser estendido para sítios de floresta apenas suprimindo a função dependente da umidade no solo visto que em florestas, mesmo em períodos de seca, a umidade do solo tem valor suficiente para não ter efeito sobre o controle estomático da planta. Outro fator que contribui nesse sentido é a capacidade das raízes retirarem água de grandes profundidades em florestas. A metodologia aplicada no cálculo da umidade do solo é apresentada no final desse item.

Na Tabela 2 tem-se uma comparação entre os parâmetros de otimização para cada sítio e entre as funções parametrizadas para floresta e pastagem, como mostrado em Wright et al. (1992). Devido à parametrização, as funções, que têm como mínimo o valor 0 e máximo o valor 1, podem ser vistas como pesos na ponderação do valor máximo que a condutância estomática pode assumir para cada sítio, representado por $a_1 L^*$. Foi adotado $T_l = 0^{\circ}\text{C}$ e $T_h = 45^{\circ}\text{C}$ para todos os sítios.

Wright et al. (1992) constataram que, para os valores usuais de temperaturas que ocorrem nos dois sítios (entre 15°C e 33°C), a função $f(T)$ tem um maior valor médio para o sítio Nossa Senhora (pastagem), além de uma menor variância. Essa maior variância para sítios de floresta faz com que essa função exerça grande influência nesses sítios. Por outro lado, em sítios de pastagens, $f(T)$ tem uma fraca e incerta influência na resposta estomática. Consequentemente, alguns modelos não utilizam a função dependente da temperatura para cálculo da transpiração em sítios de pastagem. Nesse estudo, porém, a função $f(T)$ é sempre considerada no cálculo da condutância estomática. Constataram também que a função $f(D_0)$ é sempre maior para o sítio Nossa Senhora (pastagem), qualquer que seja o valor de D_0 do intervalo. Porém a variância dentro do intervalo é grande para qualquer sítio. Esse fato faz com que a função $f(D_0)$ tenha uma forte influência na resposta estomática, tanto em pastagens quanto em florestas.

Wright et al (1992) verificaram que a função $f(S)$ é sempre ligeiramente maior para a Reserva Jarú em relação a Nossa Senhora. A variância de $f(S)$ dentro do intervalo é grande para ambos os sítios, o que mostra a forte influência da função da radiação incidente na resposta estomática, tanto em floresta quanto em pastagem. No decorrer do dia a radiação incidente pode variar do valor 0, nas primeiras horas do dia, a valores próximos de 1000, logo após o meio-dia, percorrendo quase todo o domínio da função $f(S)$. Isso faz com

Tabela 2. Parâmetros de otimização para cada sítio. Wright et al. (1992).

	R. Jaru	N. Senhora	F. Dimona	R. Ducke
a_1	80,1	43,2	27,1	20,8
a_2	0,1248	0,0592	0,0670	0,064
a_3	43,1	23,5	28,5	30,2
a_4	3916	108934	2922	250
a_5		0,272	0,387	
θ_w		0,15	0,33	

que $f(S)$ varie do valor mínimo 0 até quase o valor máximo 1, fazendo com que a condutância estomática varie de 0 a valores máximos durante o decorrer do dia, provando novamente a grande influência da radiação solar incidente na abertura e fechamento dos estômatos. Constataram também que para o cálculo da condutância estomática em sítio de floresta (Reserva Jaru) a função $f(\theta)$ não tem influência. Isso se deve ao fato da umidade do solo em floresta, mesmo em períodos de seca, ser grande o bastante para não requerer um fechamento dos estômatos. Além disso, as raízes de árvores em floresta obtêm água a maiores profundidades que as plantas em sítios de pastagem, podendo conseguir água mesmo com valores menores de umidade próximo da superfície do solo. A função $f(\theta)$ varia linearmente com θ . Os valores extremos de θ , são $\theta_w = 0,15$ e $a_5 = 0,272$. Abaixo de θ_w , a planta já não tem capacidade de tirar a água residual do solo, portanto $f(\theta) = 0$ e os estômatos se fecham. Acima de a_5 , a umidade no solo é suficiente para a planta obter água sem necessitar de uma resposta estomática a fim de reter a evaporação.

Estimativa da umidade do solo

Os valores médios de umidade volumétrica foram medidos próximos às estações automáticas através de sondas de nêutrons. Para o sítio experimental localizado na reserva Jaru, havia oito tubos de medição de umidade, enquanto na fazenda Nossa Senhora Aparecida havia apenas seis. As medições iniciaram em outubro de 1991, na reserva Jaru, e em novembro de 1991 na fazenda Nossa Senhora Aparecida. Os dados disponíveis são de outubro de 1991 até dezembro de 1993 em ambos os sítios.

Os tubos de medição foram instalados em um relevo de planalto em ambos os sítios experimentais. Na reserva Jaru, as profundidades de seis dos oito tubos de acesso foram limitadas pela pre-

sença de formações rochosas. Nesses tubos, as leituras máximas foram efetuadas entre 2 e 3,6 m. Os valores de umidade foram medidos na profundidade 0,1 e 0,2 m, e a partir de então, em intervalos de 0,2 m até a profundidade máxima. A umidade volumétrica foi medida aproximadamente a cada sete dias.

Os valores medidos pela sonda de nêutrons foram convertidos em umidade volumétrica através da calibração indicada na expressão:

$$\theta = m (R/R_w) + n \quad (18)$$

sendo θ a umidade volumétrica, R a contagem no solo, a uma dada profundidade, fornecida pela sonda de nêutrons, R_w contagem em um sistema padrão fornecida pela sonda de nêutrons e m e n parâmetros determinados pelo método de Couchat et al. (1975).

A umidade média do solo foi determinada pela expressão abaixo:

$$\theta = \sum \theta_i \Delta z_i / \sum \Delta z_i \quad (19)$$

onde θ_i é a umidade volumétrica, Δz_i é a espessura da camada i e D é o número de camadas de solo analisadas.

RESULTADOS

Após o cálculo da condutância estomática obtida através do modelo de Stewart, descrito anteriormente, foi calculada a evapotranspiração diária através da equação de Penman-Monteith, para um conjunto específico de dias, durante os anos de 1992 e 1993. Esses resultados são comparados com os dados de fluxo de calor latente, obtidos do aparelho de medição Hydra em campanhas durante os anos de 1992 e 1993 na Reserva Jaru e na Fazenda Nossa Senhora Aparecida, na região de Ji-Paraná. No aparelho Hydra, (Shuttleworth et al., 1988) a evapotranspiração é medida através da técnica de correlação de vórtices (eddy correlation). Também é feita a comparação com os valores de evapotranspiração calculados no trabalho de Maia Alves (1997), com o intuito de verificar a melhora nos resultados obtida pela adoção do modelo de cálculo da condutância estomática. Em alguns dias do período analisado não foi possível calcular a evapotranspiração devido às falhas existentes nos dados que são considerados no cálculo da evapotranspiração diária, consequentemente não foi possível compará-la aos dados medidos pelo Hydra. Nas Figuras 1, 3, 5 e 7 os eventos, referem-se

a dias contidos no período em questão, para os quais existem simultaneamente medições do Hydra e estimativas de evapotranspiração diária pelos dois métodos mencionados anteriormente. Os resultados dessas comparações podem ser vistos nas figuras apresentadas a seguir.

Reserva Jaru – ano de 1992

A Figura 1 apresenta a comparação dos resultados obtidos durante o período de 09/08 a 03/11 de 1992. Assumindo que os valores medidos pelo aparelho Hydra sejam valores reais, foi efetuada a comparação entre os valores calculados por Maia Alves (1997) e os calculados nesse trabalho, tendo como base os valores medidos

Na Tabela 3 são mostrados os parâmetros estatísticos para cada conjunto de valores, calculados e medidos. REMQ é a raiz quadrada do erro médio quadrático, EMA é o erro médio aritmético e EVT_m é a evapotranspiração diária média do número de eventos considerados no período analisado.

A evapotranspiração calculada, levando-se em conta o modelo de Stewart, foi, em média, 0,10 mm/dia maior que a evapotranspiração medida. Ocorreu uma sensível melhora em relação ao trabalho de Maia Alves (1997), que calculou uma evapotranspiração média de 1,1 mm/dia maior. O desvio quadrático médio em relação aos valores medidos foi 0,11 mm/dia, mostrando uma melhora em relação ao trabalho anterior, que foi 1,38 mm/dia, em média.

A Figura 2 apresenta a correlação linear entre os valores calculados de evapotranspiração e os valores medidos pelo aparelho Hydra no período compreendido pela Figura 1. A equação da reta de regressão obtida por essa correlação foi:

$$Y = 0,057 + 1,021X \tag{20}$$

sendo X o valor de evapotranspiração medido pelo aparelho Hydra e Y o valor de evapotranspiração calculado pelo modelo.

A reta em linha contínua representa a reta de regressão linear entre os dados enquanto a outra reta é a função $Y = X$. Ocorreu uma pequena melhora na correlação linear entre os dados, comparando-se com o trabalho de Maia Alves (1997), o qual obteve um coeficiente de correlação linear $\rho = 0,885$, enquanto nesse estudo o coeficiente de correlação linear obtido foi $\rho = 0,927$.

Fazenda Nossa Senhora – 1992

A Figura 3 apresenta a comparação dos resultados durante o período de 06/08 a 06/11 de 1992.

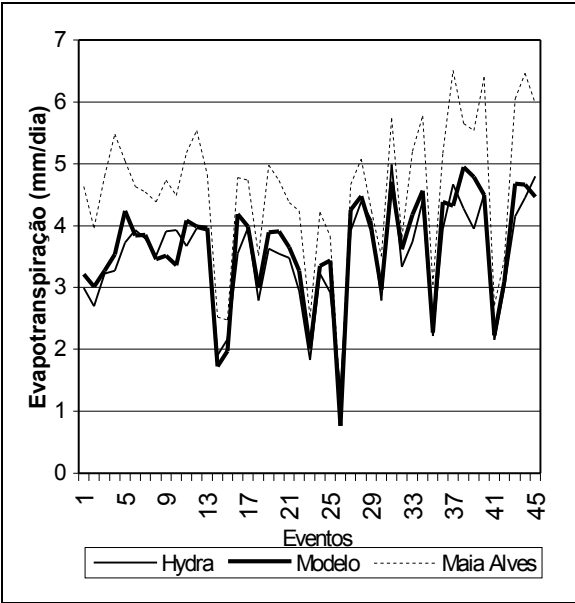


Figura 1. Evapotranspiração medida no Hydra, calculada pela Equação de Penman Monteith (considerando-se o modelo de Stewart) e calculada por Penman Monteith (Maia Alves, 1997). Reserva Jaru (09/08 a 03/11 de 1992).

Tabela 3. Parâmetros estatísticos dos valores estimados e medidos. Reserva Jaru.

	Modelo	M.Alves	Hydra
C.Correl.	0,927	0,885	
REMQ mm/d	0,11	1,38	
EMA mm/d	0,10	1,1	
EVT_m mm/d	3,60	4,56	3,50
D. Padrão mm/d	0,90	1,16	0,83

Na Tabela 4 podemos ver os parâmetros estatísticos para cada conjunto de valores, calculados e medidos.

A evapotranspiração calculada pelo modelo foi em média 0,02 mm/dia maior que a evapotranspiração medida. Esse desvio médio foi sensivelmente menor comparando-se ao do trabalho de Maia Alves, que calculou uma evapotranspiração média 1,2 mm/dia maior que a medida. O desvio médio quadrático em relação aos valores medidos foi 0,48 mm/dia, contra 1,98 mm/dia obtido pelo trabalho anterior.

A Figura 4 apresenta a correlação linear entre os valores calculados de evapotranspiração e os valores medidos pelo aparelho Hydra no período compreendido pela Figura 3. A reta em linha contínua representa a reta de regressão linear enquanto a outra reta é a função $Y = X$.

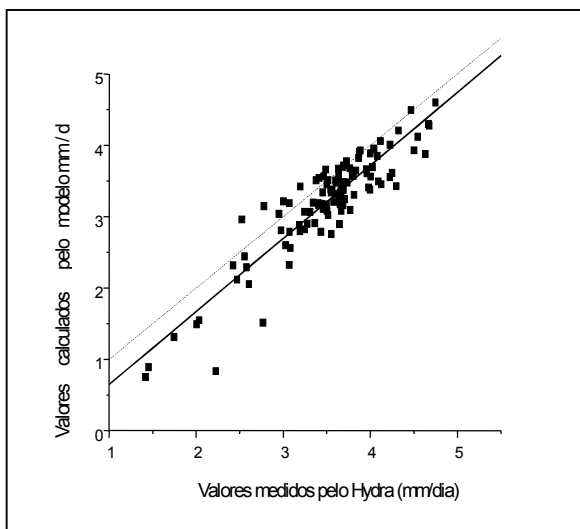


Figura 2. Comparação entre os valores de evapotranspiração medidos pelo aparelho Hydra e os valores calculados pelo modelo. Reserva Jaru de 09/08 a 03/11 de 1992.

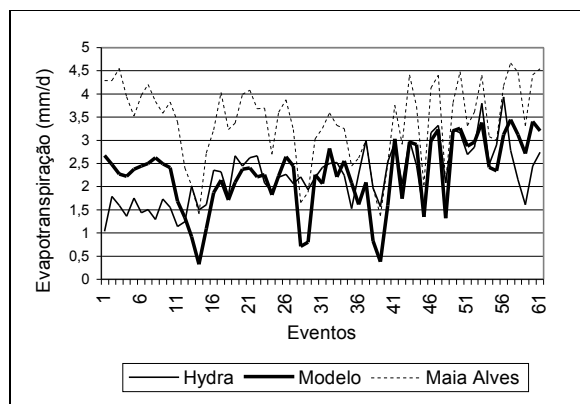


Figura 3. Evapotranspiração medida no Hydra, calculada pela Equação de Penman Monteith (considerando-se o modelo de Stewart) e calculada por Penman-Monteith (Maia Alves, 1997). F.N. Senhora (06/08 a 06/11 de 1992).

Tabela 4. Parâmetros estatísticos dos valores calculados e medidos. Fazenda N. Senhora.

	Modelo	M.Alves	Hydra
C. Correl.	0,524	0,157	
REMQ mm/d	0,48	1,98	
EMA mm/d	0,02	1,2	
EVT _m mm/d	2,25	3,39	2,23
D. Padrão mm/d	0,77	0,85	0,65

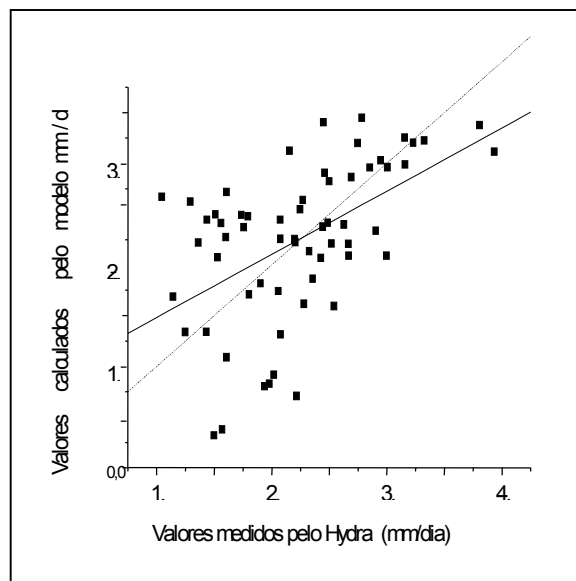


Figura 4. Comparação entre os valores de evapotranspiração medidos pelo aparelho Hydra e os valores calculados pelo modelo. Nossa Senhora (06/08 a 06/11 de 1992).

O coeficiente de correlação linear obtido foi $\rho = 0,524$, melhorando em relação ao trabalho de Maia Alves (1997) em que foi obtido $\rho = 0,157$.

A equação da reta de regressão obtida por essa correlação foi:

$$Y = 0,859 + 0,622X \quad (21)$$

Reserva Jaru – ano de 1993

A Figura 5 apresenta a comparação dos resultados obtidos durante o período de 08/04 a 26/07 de 1993. Nela são comparados os valores estimados através da equação de Penman-Monteith, considerando-se o modelo de Stewart, os valores estimados por Maia Alves e os valores medidos pelo Hydra.

A Tabela 5 mostra os parâmetros estatísticos para cada conjunto de valores, calculados e medidos.

A evapotranspiração estimada foi em média, 0,29 mm/dia menor que a medida. Isso mostra uma sensível melhora em relação ao trabalho de Maia Alves (1997), que calculou uma evapotranspiração média de 1,1 mm/dia maior.

O desvio médio quadrático em relação aos valores medidos foi 0,17 mm/dia, mostrando uma melhora em relação ao trabalho anterior, que obteve 0,7 mm/dia.

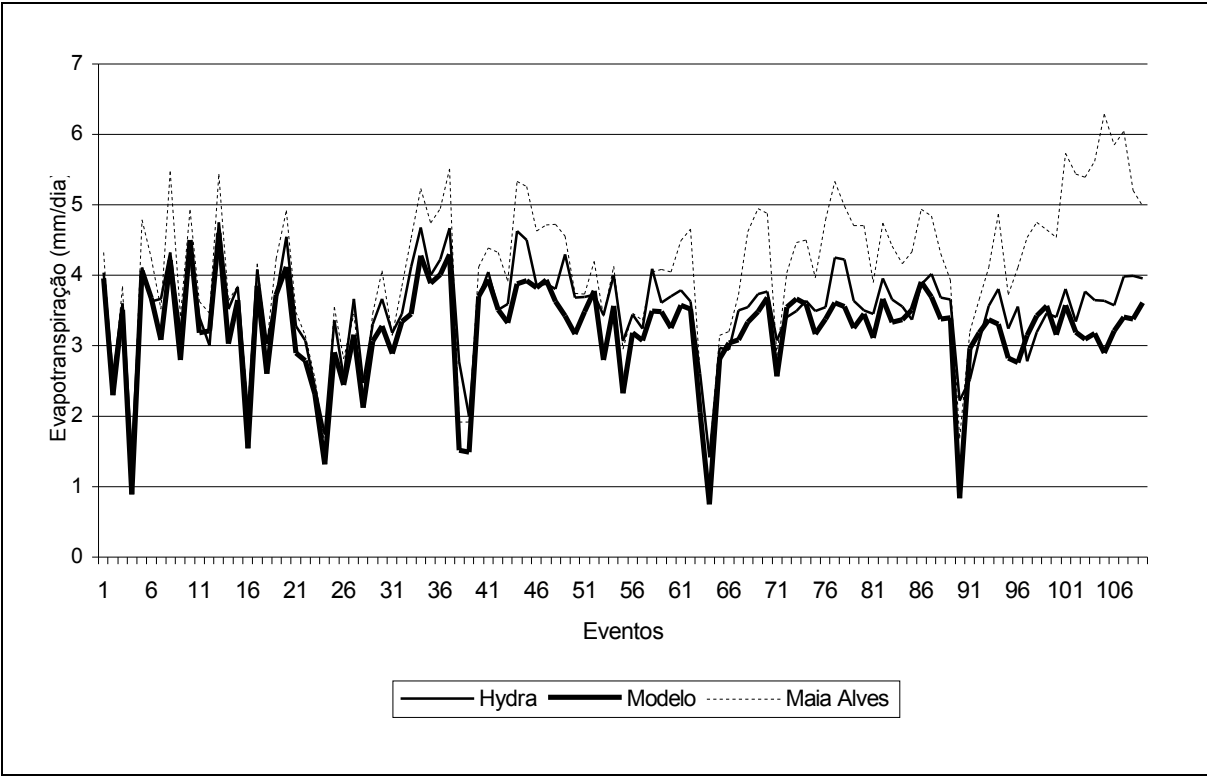


Figura 5. Evapotranspiração medida pelo Hydra, evapotranspiração calculada pela equação de Penman-Monteith (considerando o modelo de Stewart) e evapotranspiração calculada por Maia Alves (1997). R. Jaru, em Ji-Paraná-RO, (08/04 a 26/07 de 1993).

Tabela 5. Parâmetros estatísticos dos valores calculados e medidos. Reserva Jaru 1993.

	Modelo	M. Alves	Hydra
C. Correl.	0,91	0,73	
REMQ mm/d	0,17	0,70	
EMA mm/d	-0,29	1,1	
EVT _m mm/d	3,22	4,09	3,51
D. Padrão mm/d	0,71	1,02	0,64

A Figura 6 apresenta a correlação linear entre os valores calculados de evapotranspiração e os valores medidos pelo aparelho Hydra no período compreendido pela Figura 5.

A equação da reta de regressão obtida por essa correlação foi:

$$Y = -0,375 + 1,024X \tag{22}$$

A reta em linha contínua representa a reta de regressão linear entre os dados enquanto a outra reta é a função $Y = X$. Ocorreu uma melhora na correlação linear entre os dados, comparando-

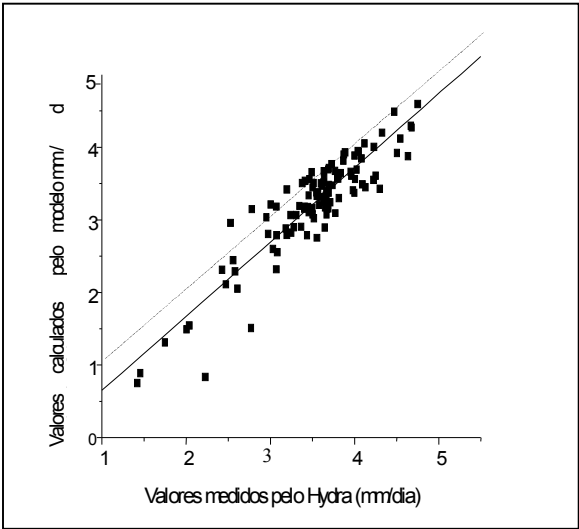


Figura 6. Comparação entre os valores de evapotranspiração medidos pelo aparelho Hydra e os valores calculados pelo modelo. Reserva Jaru (08/04 a 26/07 de 1993).

se com o trabalho de Maia Alves (1997), no qual foi obtido um coeficiente de correlação linear $\rho = 0,726$, enquanto nesse estudo o coeficiente de correlação linear obtido foi $\rho = 0,91$.

Fazenda Nossa Senhora – ano de 1993

A Figura 7 apresenta a comparação dos resultados obtidos durante o período de 08/04 a 26/07 de 1993. Assumindo que os valores medidos pelo aparelho Hydra sejam valores reais, foi efetuada a comparação entre os valores calculados por Maia Alves (1997) e os calculados nesse trabalho, tendo como base os valores medidos.

A Tabela 6 mostra os parâmetros estatísticos para cada conjunto de valores, calculados e medidos.

A evapotranspiração calculada foi em média 0,55 mm/dia menor do que a evapotranspiração medida. Esse desvio médio foi praticamente igual ao do trabalho anterior, que estimou uma evapotranspiração média 0,5 mm/dia maior que a medida. O desvio médio quadrático em relação aos valores medidos foi 0,53 mm/dia, contra 0,55 mm/dia obtido pelo trabalho anterior. Esses dados mostram que o modelo se ajustou melhor a sítios de florestas, quando comparado à sua utilização em pastagens. Na Reserva Jaru (floresta) ocorreu uma melhora nos valores calculados, comparando com o trabalho anterior, visto que aqueles se aproximaram mais dos valores medidos de evapotranspiração. Porém, no sítio Nossa Senhora (pastagem) essa melhora não foi significativa.

A Figura 8 apresenta a correlação linear entre os valores calculados de evapotranspiração e os valores medidos pelo aparelho Hydra no período compreendido pela Figura 7.

A equação da reta de regressão obtida por essa correlação foi:

$$Y = -0,636 + 1,032X \quad (23)$$

A reta em linha contínua representa a reta de regressão linear enquanto a outra reta é a função $Y = X$. O coeficiente de correlação linear obtido foi $\rho = 0,76$, melhorando em relação ao trabalho anterior, onde foi obtido $\rho = 0,69$.

Análise de erros cometidos

A fim de analisar os fatores que influem nos erros cometidos, quando se considera o mode-

Tabela 6. Parâmetros estatísticos dos valores calculados e medidos. F. N. Senhora 1993.

	Modelo	M. Alves	Hydra
C. Correlação		0,76	0,69
REMQ	mm/d	0,53	0,55
EMA	mm/d	-0,55	0,5
EVT _m	mm/d	2,07	3,09
Desv. Padrão	mm/d	0,73	0,84
			0,54

lo de Stewart no cálculo da evapotranspiração, escolheram-se os dois dias em que o erro de cálculo foi máximo e os dois dias em que o erro de cálculo foi mínimo durante o ano de 1993, para ambos os sítios (Reserva Jaru e Fazenda Nossa Senhora). Esses quatro dias foram confrontados para identificarem-se os dias de grandes e de pequenos desvios em comum para ambos os sítios.

Os dias de grandes desvios selecionados foram:

15/05 (135) (-1,26 - pastagem; -1,25 - floresta) e
07/07 (188) (-1,0 - pastagem; -1,39 - floresta).

Os dias de pequenos desvios selecionados foram:

16/07 (197) (-0,04 - pastagem; 0,106 - floresta) e
19/05 (139) (0,14 - pastagem; 0,003 - floresta).

Os dados meteorológicos relevantes para cada dia encontram-se nas Tabelas 7 e 8. Nelas RSG é a radiação solar global, RI é a radiação refletida, R_n é o saldo de radiação, P é a precipitação, E é a evaporação do dia, T é a temperatura do bulbo seco, V é a velocidade do vento e D_0 é o déficit de umidade específica.

Analisando as Tabelas 7 e 8 vemos que nos dias em que ocorreram maiores desvios tivemos uma baixa incidência de radiação solar, seja pela ocorrência de precipitação ou apenas pelo fato do dia estar nublado. Nesses dias também estava ventando com certa intensidade (a velocidade média do vento era considerável) e o déficit de umidade específica era pequeno. Em decorrência desses fatos tivemos uma queda na temperatura média e pequena evapotranspiração nesses dias, tanto na floresta quanto na pastagem.

Devido ao exposto anteriormente esses dias não são considerados típicos na Amazônia. Num dia típico temos uma grande incidência de radiação solar, altas temperaturas e pouco vento. Na modelagem utilizada nesse estudo, as fórmulas e os parâmetros de otimização são determinados, por regressão, a partir de uma massa de dados

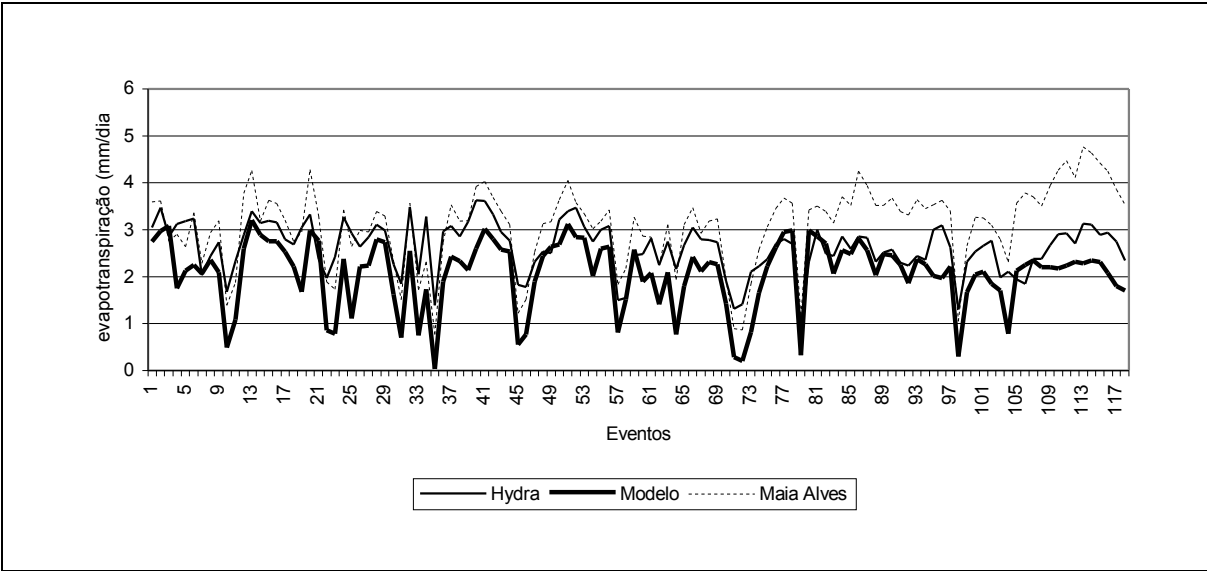


Figura 7. Evapotranspiração medida pelo Hydra, evapotranspiração calculada pela equação de Penman-Monteith (considerando o modelo de Stewart) e calculada por Maia Alves (1997). Fazenda N. Senhora, em Ji-Paraná-RO, (08/04 a 26/07 de 1993).

Tabela 7. Dados meteorológicos nos dias de pequenos e grandes desvios para a R. Jarú.

Dia	RSG MJ/m ²	RI MJ/m ²	R _n MJ/m ²	P mm/dia	E mm/dia	T °C	V m/s	D ₀ g/kg
135	9,83	1,22	6,72	5,53	1,9	21,5	2,98	2,03
139	17,88	2,17	12,07	14,08	4,3	24,7	0,93	2,85
188	7,08	0,89	4,50	3,97	1,7	19,9	3,01	1,55
197	20,26	2,63	12,17	0,00	4,6	21,5	0,96	5,15

Tabela 8. Dados meteorológicos nos dias de pequenos e grandes desvios para a fazenda Nossa Senhora, Ji-Paraná, RO.

dia	RSG MJ/m ²	RI MJ/m ²	R _n MJ/m ²	P mm/dia	E mm/dia	T °C	V m/s	D ₀ g/kg
135	9,08	1,83	5,93	17,66	1,2	19,2	3,64	1,71
139	16,72	3,27	10,73	4,99	3,2	24,0	0,61	3,32
188	6,98	1,29	3,98	0,13	1,0	18,3	3,28	1,63
197	20,23	3,76	11,36	0,00	3,7	20,1	0,29	5,67

provenientes de vários dias de medição. Porém esse conjunto é composto na sua maioria de dias “típicos”, com as características descritas acima. Assim, o modelo, por mais abrangente que se apresente, tende a dar uma resposta melhor nesses dias “típicos”, não tendo a mesma eficácia em dias “atípicos”, onde ocorre uma variação repentina das variáveis meteorológicas. Esse foi o caso dos dias 135 (15/mai) e 188 (07/jul), que resultou em erros consideráveis do modelo.

CONCLUSÕES

Os resultados mostram que a inclusão da estimativa da condutância estomática, utilizando o modelo proposto, no cálculo da evapotranspiração melhorou sensivelmente os resultados, em comparação ao cálculo utilizando dados de resistência estomática para dias típicos, como utilizado por Maia Alves (1997).

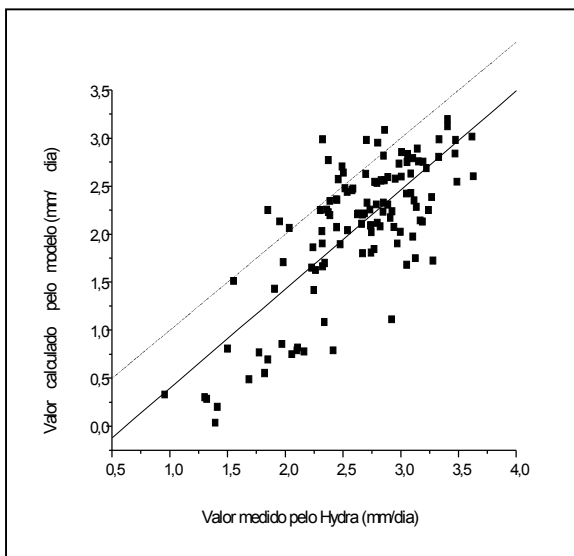


Figura 8. Comparação entre os valores de evapotranspiração medidos pelo Hydra e os valores calculados pelo modelo. F. Nossa Senhora (08/04 a 26/07 de 1993).

O desvio médio quadrático para a floresta foi 0,11 mm/dia (3% da média) em 1992 e 0,17 mm/dia (5% da média) em 1993. Para a pastagem o desvio médio quadrático foi de 0,48 mm/dia (21% da média) em 1992 e 0,53 mm/dia (25% da média) em 1993. Esses resultados mostram que o modelo teve uma resposta melhor para floresta do que para pastagem, mostrando uma melhor adequação do modelo para aquele sítio. Alguns fatores contribuem para isso. O primeiro fator é a umidade no solo, um fator de influência no cálculo da condutância estomática, ser de difícil estimativa para a pastagem em comparação à floresta. Na floresta, a abundância de água no solo e a facilidade das raízes conseguirem captá-la, tornam a umidade do solo fácil de ser estimada e de pouca influência na abertura estomática. Na pastagem, ao contrário, não é bem conhecida a capacidade das raízes da grama em captar água do solo (por exemplo, a que profundidade). A escassez de água faz da umidade do solo um fator influente na abertura estomática, o que dificulta a estimativa da condutância estomática em pastagens. Também foi observado que nos dias em que foi registrada precipitação ocorreu a tendência de maior aproximação entre os valores calculados e medidos. Este fato pode estar correlacionado com uma predominância do termo energético na expressão da evapotranspiração de Penman-Monteith, no período úmido. No período chuvoso o termo aerodinâmico da equação de Penman-

Monteith é numericamente desprezível em comparação ao termo energético, o que minimiza os erros relacionados com os valores da resistência estomática. Além disso, existem incertezas associadas ao cálculo da resistência aerodinâmica, já que foi utilizado um modelo simplificado.

Outro fator relevante é o fato de existir em sítios de pastagem "ilhas" de florestas, áreas que não foram completamente desmatadas. Essas áreas influem na evapotranspiração do local, medida pelo aparelho Hydra. Porém, esse fato não é previsto pelo modelo, que considera o local composto apenas de pastagem. A última razão foi o fato de utilizarmos um valor constante para o índice foliar ($L^* = 1,2$) no cálculo da condutância estomática em pastagem. Esse índice na verdade varia durante o ano de 0,7 a 4,5, sendo menor na época de seca. Na floresta não existe essa variação.

REFERÊNCIAS

- COUCHAT, P.; CARRÉ, C.; MARCESSE, J. e LE HO, J. (1975). *The measurement of thermal neutron constants of the soil: Application to the calibration of neutron moisture gauges and to the pedological study of the soil*. Proc. Conf. Nuclear Data Cross Section on Technology, Washington D. C.,
- DOLMAN A. J.; GASH J. H. C.; ROBERTS J. and SHUTTLEWORTH W. J. (1991). Stomatal and surface conductance tropical rainforest. In *Agric. For. Meteorol.*, 54: 303 – 318.
- GASH, J. H. C.; SHUTTLEWORTH, W. J.; LLOYD, C. R.; ANDRÉ, J. C.; GOUTORBE, J. P. and GELPE, J. (1989). *Micrometeorological measurements in Les Landes Forest during HAPEX-MOBILHY*. *Agric. For. Meteorol.*, 46: 131 – 147.
- ROCHA, H. R.; SELLERS, P. J.; COLLATZ, G. J.; WRIGHT, I. R. and GRACE J. (1996). Calibration and use of the SiB2 model to estimate water vapour and carbon exchange at the ABRACOS forest sites. In J. H. C. Gash, C. A. Nobre, J. M. Roberts and R. L. Victoria, *Amazonian Deforestation and Climate*. Chichester, New York, John Wiley & Sons.
- JARVIS, P. G. (1976). *The interpretation of the variations in leafwater potential and stomatal conductances found in canopies in the field*. *Philos. Trans. R. Soc., London, Ser. B*, 273: 593 – 610.
- KIM, J. and VERMA, S. B. (1991). Modelling canopy stomatal conductance in a temperate grassland ecosystem. *Agric. For. Meteorol.*, 55: 149 – 166.
- MAIA ALVES (1997). *Análise comparativa do regime hidrológico em áreas de floresta tropical e de pastagem da Amazônia*. Trabalho de Graduação, ITA. 1 – 78.
- MONTETH, J. L. (1965). *Evaporation and environment. The State and Movement of Water in Living Organisms*. Symp. Soc. Exp. Biol., 19th, p. 205-234.

- MOORE, C. J. e FISCH, G. (1991). Estimating heat storage in Amazonian tropical forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 38 (1-3):147-169, Oct.
- MORISON, J. I. L. e GIFFORD, R. M. (1983). *Stomatal sensitivity to carbon dioxide and humidity*. Plant physiol., 71: 789 – 796.
- STEWART, J. B. (1988). Modelling surface conductance of pine forest. *Agric. For. Meteorol.*, 43: 19 – 35.
- SHUTTLEWORTH, W. J.; GASH, J. H. C; LLOYD, C. R.; McNEIL, D. D.; MOORE, C. J. and WALLACE, J. S. (1988). An integrated micrometeorological system for evaporation measurements. *Agric. For. Met.* 43, 295-317.
- SHUTTLEWORTH, W. J. (1989). *Micrometeorology of temperate and tropical forest*. Phil. Trans. R. Soc. Lon. B 324, 299-334.
- WRIGHT, I. R.; GASH, J. H. C; ROCHA, H. R.; SHUTTLEWORTH, W. J.; NOBRE, C. A; MAITELLI, G. T.; ZAMPARONI, C. A G. P.; CARVALHO, P. R. A. A. (1992) Dry season micrometeorology of Central Amazonian ranchland. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 118 (508): 1083-1100, Oct.
- WRIGHT, I. R.; MANZI, A. O; ROCHA, H. R. 1994. Surface conductance of Amazonian pasture: model application and calibration for canopy climate. In *Agric. For. Meteorol.*, 75: 51 –70.
- WRIGHT, I. R.; GASH, J. H. C.; ROCHA, H. R. e ROBERTS, J. M. (1996) Modelling surface conductance for Amazonian pasture and forest. In J. H. C. Gash, C. A. Nobre, J. M. Roberts and R. L. Victoria, *Amazonian Deforestation and Climate*. Chichester, New York, John Wiley & Sons.

Influence of Stomatal Conductance in Estimating Evapotranspiration in Rondonia

ABSTRACT

Evaporation was measured or estimated from meteorological data for two sites in Rondonia, one in pastures, at Fazenda Nossa Senhora, and the other in the forest, at Reserva Jaru. The evaporation was estimated using the Penman-Monteith (Monteith, 65) equation, considering the stomatal conductance estimated according to Stewart (1988) on an hourly basis. The evaporation had already been estimated for the same sites, for the same period and data by Maia Alves (1997) using Penman-Monteith but considering typical stomatal conductance values for the dry season and for the wet season. The evaporation estimated using Penman-Monteith, considering the Stewart model, shows a better correlation than that estimated by Maia Alves when compared to the measured values.