

DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO DE UMA ÁREA DE PASTAGEM NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA

Josiane de Brito Gomes^{1}, Alberto Dresch Webler², Alice da Silva Gonçalves de Jesus³, Jéssica Mota⁴, Theophilo Benedicto Ottoni Filho⁵, Célia Maria Paiva⁶ & Otto Corrêa Rotunno Filho⁷*

Resumo – A evapotranspiração é um dos processos físicos mais importantes na regulação do clima, tanto em escala local como global, permitindo estabelecer a relação entre disponibilidade de água e de energia no âmbito da ciência hidrológica. Com o intuito de quantificar a transferência de água para a atmosfera em uma região de pastagem localizada no estado de Rondônia, Amazônia Ocidental, nos anos de 1999 a 2010, este estudo determinou a evapotranspiração de referência (ET_0) por meio do método de Blaney-Criddle – FAO (1975), empregando-a no cálculo do balanço hídrico climatológico proposto por Thornthwaite e Mather (1955). Os dados foram obtidos por instrumentos instalados em uma torre micrometeorológica a partir do experimento de grande escala da biosfera-atmosfera da Amazônia (programa LBA). Os resultados apontaram precipitação média anual de 1660 mm e ET_0 de 1559,61 mm, resultando em um déficit hídrico nos meses de maio a outubro e um excedente entre novembro e abril. A evapotranspiração real média durante o período em estudo foi de 1270,1 mm. O clima da região foi classificado segundo a metodologia proposta por Thornthwaite (1948) como sub-úmido, megatérmico, com estações seca e úmida bem definidas.

Palavras-Chave – Evapotranspiração, Blaney-Criddle – FAO (1975), Thornthwaite (1948).

DETERMINATION OF EVAPOTRANSPIRATION AND CLIMATIC WATER BALANCE IN AN AREA OF PASTURE IN SOUTHWEST OF AMAZONIA

Abstract – Evapotranspiration is one of the most important physical processes in regulating climate, both at local and global scales, which establishes the relationship between the availability of water and energy in the framework of the hydrological science. This study provides the estimation of the reference evapotranspiration (ET_0) by the Blaney-Criddle - FAO (1975) method and then it performs the climatic water balance proposed by Thornthwaite and Mather (1955) with the objective of quantifying the transference of water to the atmosphere in a region of grasslands in the state of Rondônia, Western Amazon, along the time period 1999-2010. The data were obtained by instruments installed in a micrometeorological tower due to the large scale biosphere-atmosphere experiment of Amazonia (LBA). The results showed average annual rainfall of 1660 mm and 1559.61 mm of ET_0 , resulting in a water deficit in the months from May to October and a surplus between November and April. The average actual evapotranspiration during the study period was

¹ Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Email: josianebrito@coc.ufrj.br

² Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, UFRJ. Email: albertowebler@coc.ufrj.br

³ Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, UFRJ. Email: alicesgs@coc.ufrj.br

⁴ Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, UFRJ.

Email: jessica.meteoro@gmail.com

⁵ Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente, Escola Politécnica, UFRJ. Email: teottoni@poli.ufrj.br

⁶ Departamento de Meteorologia, Instituto de Geociências, UFRJ. Email: celia@lma.ufrj.br

⁷ Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, UFRJ. Email: otto@coc.ufrj.br

1270.1 mm. The climate was classified according to the methodology proposed by Thornthwaite (1948) as sub-humid, megathermal with wet and dry seasons well defined.

Keywords – Evapotranspiration, Blaney-Criddle – FAO, Thornthwaite.

1 INTRODUÇÃO

A transferência natural de água da superfície para a atmosfera tem grande importância em estudos hidrometeorológicos, pois regula o balanço de energia na superfície terrestre, com impactos na atmosfera e correspondentes alterações nas características das massas de ar nela existentes. Possui, também, crucial importância na hidrologia, uma vez que a evapotranspiração, sendo um dos principais processos do ciclo hidrológico, condiciona a sua evolução. Em artigo relativamente recente, Shuttleworth (2010) enfatiza a importância de concentrar esforços no entendimento dos princípios básicos da evapotranspiração, apontando algumas inconsistências teóricas fundamentais quando de sua representação mediante a equação de Penman-Monteith. Nesse artigo, o autor propõe, inclusive, uma reavaliação teórica do papel dos tanques de evaporação no contexto de medição hidrológica do processo evaporativo.

Por outro lado, a estimativa da evapotranspiração, com base em modelos matemáticos que utilizam variáveis mais comumente medidas em estações meteorológicas, tem sido uma alternativa amplamente utilizada para contornar a falta de informações de parâmetros biofísicos em uma região. A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) constitui-se, assim, em procedimento comumente adotado para o cálculo do balanço hídrico, permitindo representar o poder evaporativo de uma cultura hipotética, crescendo ativamente, sem limitação de água e não considerando as características do solo e da cultura (Doorenbos e Pruitt, 1977).

O balanço hídrico climatológico, desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955), é uma das alternativas para estimar o armazenamento médio de água do solo ao longo do tempo. Apresenta o potencial de emprego em uma série de estudos, como, por exemplo, no zoneamento agroclimático e na avaliação quantitativa das deficiências e excedentes hídricos em uma região (Galvani, 2008). Adicionalmente, pesquisas que enfatizam o emprego conjunto de dados meteorológicos coletados *in situ* e de imagens de satélite adquiridas por sensores de média resolução possibilitam a estimativa do balanço de energia na superfície terrestre na escala da bacia hidrográfica (Gomes *et al.*, 2013).

Com base no exposto, o presente estudo propõe-se a estimar a evapotranspiração de referência (ET_0) pelo método de Blaney-Criddle, modificado pela FAO (1975), empregando-a, então, na determinação do balanço hídrico climatológico proposto por Thornthwaite e Mather (1955) em uma região de pastagem, localizada no estado de Rondônia, sudoeste da Amazônia.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição da área de estudo

As medidas foram realizadas, nos anos de 1999 a 2010, em uma estação meteorológica pertencente à rede de torres do experimento de grande escala da biosfera-atmosfera na Amazônia (programa LBA), no estado de Rondônia. O sítio experimental está localizado na Fazenda Nossa Senhora (FNS), nas coordenadas 10°45'S e 62°22'O, no município de Ouro Preto do Oeste. A área foi desmatada no ano de 1977, com raio de aproximadamente 50 km, e encontra-se na maior área

plana com pastagem da região, com aproximadamente 4 km² de área, estando em uma altitude de 220 m acima do nível do mar (Culf *et al.*, 1996).

A cobertura vegetal predominante é a gramínea *Brachiaria brizantha*, além de pequenas palmeiras dispersas. O solo é classificado como podzólico vermelho-amarelo (Hodnett *et al.*, 1996). Não se encontram obstáculos no entorno do sítio experimental em uma área que abrange aproximadamente 1-2 km (*fetch*) em todas as direções (Von Randow *et al.*, 2004). A temperatura média anual varia entre 23 °C e 24 °C, com eventos de friagem entre maio e julho. A precipitação média anual é de 1754,3 mm, com período úmido característico de janeiro a março, úmido-seco de abril a junho, seco de julho a setembro e seco-úmido de outubro a dezembro (Webler *et al.*, 2007). A umidade relativa é, em média, de 80% para a estação chuvosa e 70% para a estação seca.

2.2 Descrição dos instrumentos e medidas

A precipitação (P) foi mensurada por um pluviômetro de balsa, modelo EM ARG-100 (Wattera, UK). Os instrumentos utilizados para medir a temperatura e a umidade relativa do ar foram termohigrômetros HMP35A e o HMP45C (Vaisala Inc., FIN), instalados a 10 metros de altura, que realizaram medidas a cada 30 segundos e médias a cada 10 minutos. Essas medidas foram, posteriormente, armazenadas mediante o cálculo do valor médio a cada 30 minutos em um dispositivo de armazenamento de dados (*datalogger*) CR10X (*Campbell Scientific Instrument, USA*).

2.3 Método de determinação da ET₀ - Blaney-Criddle modificado pela FAO (1975)

Este método é sugerido para áreas onde os dados climáticos disponíveis consistem apenas em dados de temperatura e de umidade relativa do ar. Assim como o método de Thornthwaite, utiliza, também, um fator ligado à duração do dia. O método de Blaney-Criddle modificado pela FAO (BC-FAO) pode ser adaptado, para uso de unidades do sistema métrico decimal, escala Celsius e para fins computacionais, na forma

$$ET_0 = a + bf \quad (1)$$

sendo

$$f = p(0,46T + 8,13) \quad (2)$$

$$a = 0,00043UR_{min} - n/N - 1,41 \quad (3)$$

$$b = a_0 + a_1UR_{min} + a_2 n/N + a_3 U_d + a_4 UR_{min} n/N + a_5 UR_{min} U_d \quad (4)$$

em que

ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm.dia⁻¹), p é percentagem das horas de luz solar real em relação ao total anual, para um dado mês e latitude, T é a temperatura do ar média mensal (°C), UR_{min} é a umidade relativa do ar mínima média (%), n/N expressa o número de horas de brilho solar para determinado dia e região, U_d é a velocidade média do vento no período diurno, a 2 m de altura (m.s⁻¹), destacando-se, ainda, os seguintes valores:

$$a_0 = 0,81917; a_1 = -0,0040922; a_2 = 1,0705; a_3 = 0,065649; a_4 = -0,0059684; a_5 = -0,0005967.$$

No presente estudo, os valores dos coeficientes “a” e “b” foram -2,18 e 1,2, respectivamente.

2.4 Balanço hídrico climatológico

O balanço hídrico climatológico foi determinado a partir da proposta de Thornthwaite e Mather (1955). Partindo-se do suprimento natural de água ao solo, simbolizado pela chuva, e da demanda atmosférica, simbolizada pela evapotranspiração, e com uma capacidade de água disponível apropriada, o balanço hídrico climatológico fornece estimativas da deficiência hídrica, do excedente hídrico e do armazenamento da água no solo.

Tal método é a forma mais usual para determinação do balanço climatológico de uma região, levando em consideração algumas premissas básicas:

- o solo e topografia não interferem na transformação da chuva (P) em evapotranspiração real (ETR) e no enchimento de água no solo;
- a distribuição da chuva (P) é uniforme ao longo do mês;
- a demanda hídrica vegetal plena é igual à evapotranspiração de referência ET_0 ; logo, ET_0 representa a demanda hídrica climatológica;
- a chuva P é a única forma de entrada de água; assim, P é a oferta hídrica climatológica.

Assim, são necessárias, como dados de entrada, as médias ou normais mensais de precipitação e da evapotranspiração de referência. É preciso, também, assumir um determinado valor da capacidade de água disponível no solo (CAD). Neste estudo, o CAD assumido é de 100 mm. Com base nos dados descritos, o balanço hídrico climatológico de Thornthwaite e Mather (1955) fornece, em escala mensal, as estimativas da evapotranspiração real (ETR), do déficit (DEF) e do excedente hídrico (EXC), da diferença acumulada entre P e ET_0 (NEG-AC), do armazenamento de água no solo (ARM) e correspondentes alterações (ALT).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta a distribuição mensal da precipitação e da evapotranspiração de referência média estimada pelo método de Blaney-Criddle, modificado pela FAO (1975), durante o período de 1999 a 2010. O índice pluviométrico médio no sítio experimental Fazenda Nossa Senhora (FNS) foi de 1660 mm, valor inferior ao apresentado por Webler *et al.* (2007), que encontraram uma precipitação total média de 1754,3 mm para o período de 1999 a 2006.

O período de menor pluviosidade compreendeu os meses de junho a agosto (67,52 mm), enquanto o período de maior quantidade de chuvas correspondeu aos meses de novembro a fevereiro (953,85 mm). O mês com maior índice pluviométrico foi o de janeiro com 267,43 mm.

A ET_0 apresentou uma média de 1559,6 mm para o período estudado. Em escala diária, a média anual foi de 4,27 mm.dia⁻¹. O mês que apresentou menor taxa de ET_0 foi o mês de junho (3,77 mm.dia⁻¹), que coincidiu com o mês de menor temperatura média, quando comumente ocorrem os eventos de friagem na região. A maior taxa de ET_0 ocorreu no mês de novembro, com 4,68 mm.dia⁻¹. Durante o período úmido, a ET_0 média foi de 4,57 mm.dia⁻¹, enquanto, no período seco, os valores médios foram de 4,03 mm.dia⁻¹.

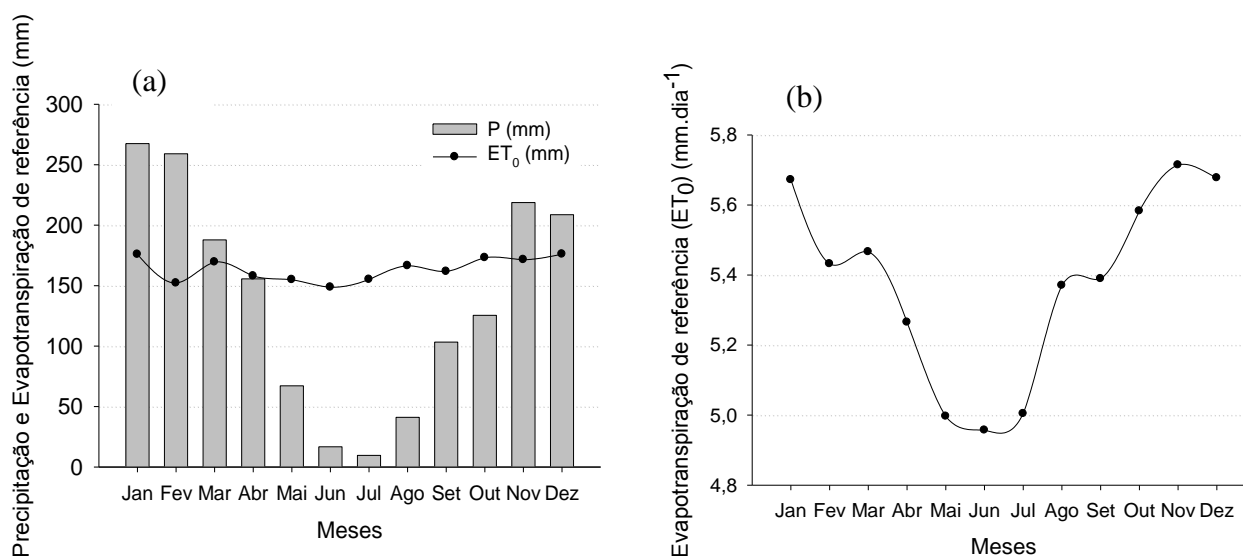


Figura 1 – (a) Média mensal da precipitação (mm) e da evapotranspiração de referência (mm) da FNS nos anos de 1999 a 2010; (b) evapotranspiração de referência diária (mm.dia⁻¹).

Os resultados do balanço hídrico climatológico estão descritos na Tabela 1. Com base nos valores totais de P e ET₀, é possível constatar que houve períodos com excedente e outros com deficiência hídrica. A evapotranspiração real média da região, durante o período em estudo, foi de 1270,1 mm, aproximadamente 18% inferior à evapotranspiração ocorrida em condições padronizadas (ET₀).

Tabela 1 – Balanço hídrico climatológico segundo Thornthwaite e Mather (1955) da FNS no período de 1999 a 2010.

Meses	T	P	ET ₀	P-ET ₀	NEG-AC	ARM	ALT	ETR	DEF	EXC
	°C	mm	mm	mm		mm	mm	mm	mm	mm
Jan	24,8	267,4	143,42	124,0	0,0	100,00	0,00	143,4	0,0	124,0
Fev	24,5	259,0	121,48	137,5	0,0	100,00	0,00	121,5	0,0	137,5
Mar	24,8	187,8	135,77	52,0	0,0	100,00	0,00	135,8	0,0	52,0
Abr	24,7	155,6	124,15	31,5	0,0	100,00	0,00	124,1	0,0	31,5
Mai	24,1	67,1	118,30	-51,2	-51,2	59,96	-40,04	107,2	11,1	0,0
Jun	23,8	16,7	113,05	-96,3	-147,5	22,89	-37,07	53,8	59,2	0,0
Jul	24,2	9,6	118,57	-108,9	-256,4	7,70	-15,19	24,8	93,7	0,0
Ago	25,6	41,1	132,20	-91,1	-347,5	3,10	-4,60	45,7	86,5	0,0
Set	25,7	103,3	128,62	-25,3	-372,8	2,40	-0,69	104,0	24,6	0,0
Out	25,7	125,4	140,10	-14,7	-387,4	2,08	-0,33	125,8	14,3	0,0
Nov	25,2	218,7	140,32	78,4	-21,7	80,50	78,42	140,3	0,0	0,0
Dez	24,9	208,7	143,63	65,0	0,0	100,00	19,50	143,6	0,0	45,5
TOTAIS	297,9	1660,7	1559,61	101,1		679	0,00	1270,1	289,5	390,6
MÉDIAS	24,8	138,4	129,97	8,4		56,6		105,8	24,1	32,5

A deficiência hídrica anual foi de aproximadamente 387,4 mm, distribuída entre os meses de maio a outubro (Figura 2). O excedente hídrico anual, por sua vez, foi de 488,5 mm, distribuído entre os meses de novembro a abril. Assim, são evidenciados dois períodos distintos no ano, um

chuvoso que compreende os meses de novembro a abril e um seco que compreende os meses de maio a outubro. A taxa de armazenamento de água no solo, em termos médios, foi de 679 mm, com menores taxas (menores que 5 mm) ocorridas entre os meses de agosto a outubro e taxas bastante elevadas (maiores que 80 mm) ocorridas durante toda a estação chuvosa.

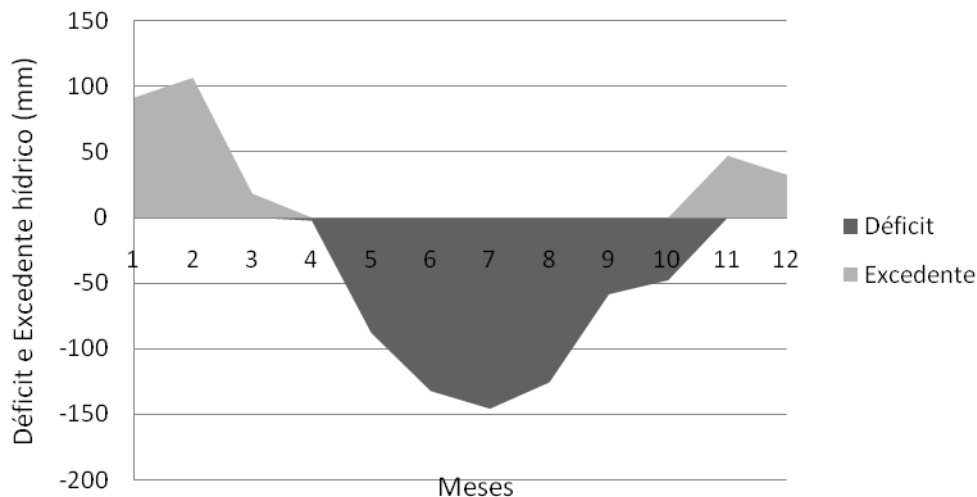


Figura 2 – Extrato do balanço hídrico climatológico segundo Thornthwaite e Mather (1955) da FNS nos anos de 1999 a 2010.

Com base nos resultados encontrados e na metodologia proposta por Thornthwaite (1948), é atribuído, à região, o tipo climático $C_2 w s_2 A' a'$, que indica um clima sub-úmido, com deficiência de água moderada no inverno, grande excesso de água no verão e com índice de temperatura megatérmico.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, enfocou-se a compreensão do balanço hídrico de uma região com base em dados coletados *in situ* a partir de uma torre meteorológica, instalada no âmbito do programa LBA, para o período de tempo que abrangeu os anos de 1999 a 2010. Em especial, concentrou-se a atenção no estudo da evapotranspiração, processo que requer mais atenção por parte da comunidade hidrológica, na medida em que há carência de estudos com base em dados de qualidade para análise da disponibilidade de água e energia na superfície terrestre continental.

Em síntese, o índice pluviométrico médio anual foi de 1660 mm, e a ET_0 estimada pelo método Blaney-Criddle FAO (1975) foi de 1559,61 mm, resultando em uma deficiência hídrica anual de 387,4 mm, distribuída entre os meses de maio a outubro, e em um excedente hídrico anual de 488,5 mm, distribuído entre os meses de novembro a abril. A evapotranspiração real média da região, durante o período de estudo, foi de 1270,1 mm. Com base na classificação climática de Thornthwaite (1948), o clima da região pode ser classificado como sub-úmido, megatérmico ($C_2 w s_2 A' a'$), com duas estações bem definidas.

Finalmente, recomenda-se que estudos futuros conduzam a análise do processo de evapotranspiração, na escala da bacia, conjugando dados medidos localmente com imagens de satélite.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa LBA, pela disponibilidade dos dados; ao Programa de Engenharia Civil-COPPE/UFRJ e ao Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente – POLI/UFRJ; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelas bolsas concedidas; aos técnicos do ICMBio, pelo suporte nas coletas e aos alunos bolsistas da Universidade Federal de Rondônia (UNIR) – Ji-Paraná pela coleta e processamento dos dados. Adicionalmente, os autores reconhecem o suporte da FAPERJ pelo apoio financeiro através dos projetos PEC/COPPE – FAPERJ 014/2010 (2010-2012), projeto FAPERJ – Processo E-26/103.116/2011 (2012-2014), projeto FAPERJ – Pensa Rio – Edital 19/2011 (2012-2014) e projeto IME-PEC/COPPE - CAPES - Aux-PE-PRO-Defense 1783/2008 (2008-2012).

REFERÊNCIAS

- CULF, A. D.; FISCH, G.; MALHI, Y.; NOBRE, C. A. (1996). The influence of the atmospheric boundary layer on carbon dioxide concentrations over a tropical forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 85, pp. 149-158.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. (1977). Guidelines for predicting crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper*, 24, pp. 179-192.
- GALVANI, E. (2008). Estudo comparativo dos elementos do balanço hídrico climatológico para duas cidades do Estado de São Paulo e para Paris. Disponível em: <confins.revues.org/4733 ; DOI : 10.4000/confins.4733>. Acesso em: 25.08.12.
- GOMES, J. B.; PAIVA, C. M.; NUÑES, M. L. A.; WEBLER, A. D.; ROTUNNO FILH, O. C. (2013). Estimativa do balanço de radiação via sensoriamento remoto na Amazônia Ocidental, XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13 a 18 de abril de 2013, Foz do Iguaçu, Paraná.
- HENRIQUE, F. A. N. (2006). *Estimativa da Evapotranspiração de Referência em Campina Grande – PB*. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB.
- HODNETT, M. G.; OYAMA, M. D.; TOMASELLA, J.; MARQUES FILHO, A. O. (1996). Comparisons of long-term soil water storage behaviour under pasture and forest in three areas of Amazonia. In: *Amazonian deforestation and climate* (eds. J.H.C. Gash, C. A. Nobre, J. M. Roberts, R. L. Victoria). Chichester, John Wiley, pp. 235-278.
- SHUTTLEWORTH, W. J. (2010). Back to the basics of understanding ET. Hydrocomplexity: New Tools for Solving Wicked Water Problems, Kovacs Colloquium, July 2010, IAHS Publ. 338, pp. 13-34.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. (1955). *The water balance*. Publications in Climatology, Drexel Inst. of Technology, New Jersey 195p.

THORNTHWAITE, C.W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38, (1), pp. 55-94.

VON RANDOW, C.; MANZI, A. O.; KRUIJT, B.; OLIVEIRA, P. J.; ZANCHI, F. B.; SILVA, R. L.; HODNETT, M. G.; GASH, J. H. C.; ELBERS, J. A.; WATERLOO, M. J.; CARDOSO, F. L.; KABAT, P. (2004). Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. *Theoretical and Applied Climatology*, pp. 1-22.

WEBLER, A. D.; AGUIAR, R. G.; AGUIAR, L. J. G. (2007). Características da precipitação em área de floresta primária e área de pastagem no Estado de Rondônia. *Revista Ciência e Natura, Esp.*, pp. 55-58.