

ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO SERIAL NA BACIA DA REPRESA DO BROA, SP

Alexandre Kepler Soares¹; Alfredo Akira Ohnuma Jr¹; Alisson Carraro Borges¹; Antonio Amaro Pagnossi¹; Antonio Angelotti Netto¹; Carlos Roberto Ruchiga Corrêa Filho¹; Ciclene Maria Silva de Brito¹; Francisco José Vela¹; Guilherme de Lima¹; Rubens de Miranda Benini¹; Eduardo Mario Menciondo²;

Resumo – O conhecimento das diversas componentes do ciclo hidrológico é um importante pré-requisito para o desenvolvimento sustentável de uma região. Componentes de difícil quantificação são a evaporação e a evapotranspiração que ocorrem em uma bacia, mesmo de pequenas dimensões. Neste trabalho, é realizado um balanço hídrico para a Bacia da Represa do Broa, situada em Itirapina-SP, com dados coletados na Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA-USP). As taxas diárias de evaporação e evapotranspiração foram calculadas pelo método combinado para a série 1972-2002. Os valores estimados são apresentados e as deficiências e excessos de água são analisados, mostrando respectivos períodos.

Abstract – The knowledge of the several components of hydrological cycle is an important requirement for the sustainable development of a region. Components of difficult quantification are evaporation and evapotranspiration that it happens in a basin, as well as small dimension basins. In this work, a water balance is accomplished for the Broa Lake Basin, placed in Itirapina-SP, with collected data in the Climatological Station of Water Resources and Applied Ecology Center (CRHEA-USP). The daily rates of evaporation and evapotranspiration were calculated by the combined method for the 1972-2002 series. The estimated values are presented and the water deficiencies and excesses are analyzed, showing respective periods.

Palavras-Chave: balanço hídrico, evapotranspiração, bacia hidrográfica, método combinado.

INTRODUÇÃO

O ambiente físico na Terra tem sido constantemente modificado. Os sistemas naturais são influenciados pela atividade humana, bem como pelo crescimento da população, do

¹ Grupo de Hidrologia Física – SHS/EESC/USP - São Carlos - SP CEP: 13.560-250, Fone: 0xx16-2739534, Fax: 0xx16-2739550, E-mails: aksoares@sc.usp.br, doesto@terra.com.br, borges@dr.com, pagnossi@terra.com.br, nettoangelotti@ig.com.br, ruchiga@sc.usp.br, britocms@bol.com.br, fjvela@uol.com.br, guilherme_lima@uol.com.br, rubensbenini@yahoo.com.br

² Professor Doutor - SHS/EESC/USP - São Carlos - SP CEP: 13.560-250, Fone: 0xx16-2739534, Fax: 0xx16-2739550, E-mail: emm@sc.usp.br

desenvolvimento industrial e urbano, fazendo com que os impactos destas atividades humanas nos ecossistemas sejam cada vez maiores. No sentido de reduzir o impacto causado pelo homem na natureza, estudos vêm sendo realizados com foco predominante no comportamento do sistema terrestre diante das respostas dos diferentes mecanismos existentes na atmosfera, hidrosfera, biosfera e na esfera humana.

O meio ambiente global tem sido transformado em decorrência da atividade humana, sem exceções nos regimes hidrológicos. De fato, devido aos desenvolvimentos agrícola, industrial e urbano, tais como irrigação e drenagem e estruturas hidráulicas ao longo dos rios, os elementos do ciclo hidrológico têm sido alterados em termos de quantidade e qualidade, ambos no espaço e no tempo.

Dentro deste contexto, o conhecimento dos diversos mecanismos do ciclo hidrológico global ou regional desponta como uma das questões de grande interesse da hidrologia.

Este trabalho faz um estudo das componentes precipitação, evaporação e evapotranspiração através de um balanço hídrico serial (1972-2002) para a Bacia da Represa do Broa, utilizando dados históricos coletados na Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) da Universidade de São Paulo, localizada no município de Itirapina-SP, próximo à Represa do Broa. A estação está localizada em uma zona de importante recarga do Aquífero Guarani, o que destaca a importância de balanços hídricos de longa duração. A bacia hidrográfica do Reservatório do Broa é originada pela captação dos Ribeirões do Lobo e Itaqueri e pelos córregos do Geraldo e das Perdizes. Suas águas percolam uma vasta área de sedimentos holocênicos, apresentando em alguns pontos intrusão de basalto. A vegetação predominante na bacia é o cerrado, com manchas de mata galeria nos solos mais úmidos. Em algumas regiões encontra-se, também, o reflorestamento com *Pinus sp* e áreas de agricultura, principalmente cana-de-açúcar e laranja. O clima da região é controlado pelas massas de ar equatorial e tropical com períodos seco (maio a outubro) e úmido (novembro a abril). Na bacia, encontra-se a Represa do Lobo, construída em 1936, para fins de produção de energia elétrica, que se localiza entre os municípios de Brotas e Itirapina, (22°15'S e 47°40'W) (Cunha, 2003).

BALANÇO HÍDRICO (CICLO HIDROLÓGICO)

Devido ao permanente movimento sob a ação da energia solar e da gravidade, a água se apresenta na Terra em diferentes fases, as quais formam um ciclo. O movimento de circulação da água na natureza envolve a troca de água entre a terra, os oceanos e a atmosfera, não somente no que diz respeito às mudanças em quantidade, mas também em qualidade.

Boa parte do aproveitamento dos recursos hídricos se dá por captação do escoamento superficial. Águas subterrâneas são ocasionalmente utilizadas para abastecimento urbano e industrial. Sendo assim, o estudo da geração deste recurso desponta no elenco de questões de hidrologia. As componentes relevantes do ciclo hidrológico são a precipitação, infiltração, escoamento superficial, evaporação e transpiração. Na Figura 1, pode-se visualizar um corte esquemático do continente com as diversas fases do ciclo hidrológico (Silveira, 1993).

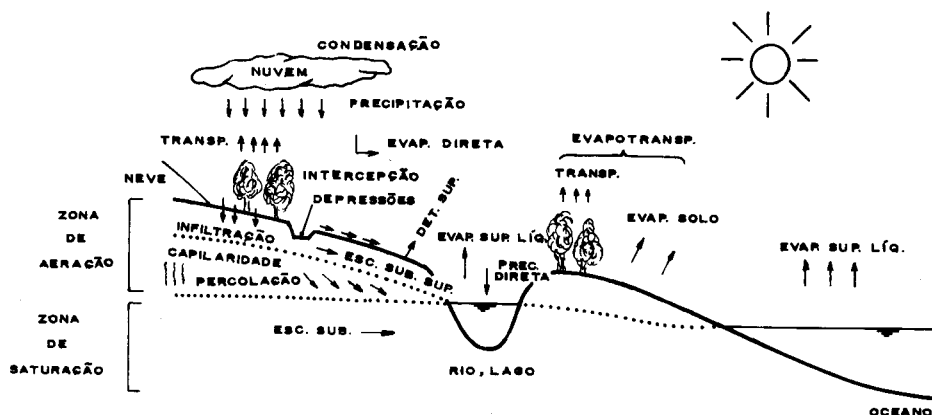


Figura 1 – Componentes do Ciclo Hidrológico (Fonte: Tucci, 1993)

Utiliza-se o princípio de conservação de massa, chamado de balanço hídrico, para relacionar os volumes de cada componente. O balanço hídrico pode ser efetuado em diversos níveis, escolhendo o volume de controle conveniente. Caso este volume de controle seja uma bacia hidrográfica ou um sistema hídrico particular, a equação hidrológica fundamental é expressa por (Righetto, 1998):

$$Q_e - Q_s = V(t) \quad (1)$$

sendo Q_e a vazão de entrada, Q_s a vazão de saída e V o volume armazenado na bacia ou no sistema hídrico.

A aplicação dessa equação em um intervalo de tempo Δt permite que a equação do balanço hídrico superficial seja expressa da seguinte forma:

$$\Delta V_P = \Delta V_S + \Delta V_Q + \Delta V_I + \Delta V_E \quad (2)$$

sendo ΔV_P o volume precipitado, ΔV_S o volume armazenado na superfície, ΔV_Q o volume escoado superficialmente, ΔV_I o volume infiltrado e ΔV_E o volume evaporado.

Para um volume de controle subsuperficial, o balanço hídrico pode ser expresso por:

$$\Delta V_I = \Delta V_{SOLO} + \Delta V_G + \Delta V_{ET} \quad (3)$$

em que ΔV_{SOLO} é o volume de água armazenado no solo, ΔV_G , o volume percolado e ΔV_{ET} , o volume evapotranspirado.

Assim, quando consideramos um volume de controle que inclui a superfície e o perfil de solo, tem-se a seguinte expressão para o balanço hídrico:

$$\Delta V_P = \Delta V_S + \Delta V_{SOLO} + \Delta V_Q + \Delta V_G + \Delta V_E + \Delta V_{ET} \quad (4)$$

A avaliação de cada termo da equação do balanço envolve o levantamento de dados observados ou de expressões que expressem o mecanismo de transporte dos volumes. Para quantificação dessas variáveis, utilizam-se modelos empíricos ou determinísticos com embasamento físico, com ou sem componentes aleatórios ou probabilísticos.

No caso do balanço hídrico realizado neste trabalho, os valores de entrada e saída são a precipitação e a evapotranspiração potencial respectivamente, e o solo é considerado como um reservatório capaz de armazenar 100 mm de umidade para o uso das plantas, dando seguimento ao trabalho realizado pelo Convênio DNAEE-EESC (1980).

PRECIPITAÇÃO

Segundo Bertoni e Tucci (1993), a precipitação é entendida em hidrologia como toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre e a disponibilidade de precipitação numa bacia durante o ano é o fator determinante para quantificar, entre outros, a necessidade de irrigação e o abastecimento de água doméstico e industrial. Por sua capacidade de produzir escoamento, a chuva é o tipo de precipitação mais importante para a hidrologia.

As características principais da precipitação são o seu total, duração e distribuições temporal e espacial. Neste trabalho, foi objeto de estudo apenas o total precipitado, adquirido pelos pluviômetros da estação climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) para cada dia do ano.

EVAPORAÇÃO

Em meteorologia, o termo evaporação restringe-se à mudança da água no estado líquido para vapor devido à radiação solar e aos processos de difusão molecular e turbulenta. Além da radiação solar, as variáveis meteorológicas que interferem na evaporação, particularmente de superfícies livres de água, são a temperatura do ar, vento e pressão de vapor (Tucci e Beltrame, 1993).

Neste trabalho, as taxas de evaporação para os anos de 1972 a 2002, foram calculadas pelo Método Combinado (Penman, 1956) para os dados colhidos neste período. São dados da estação climatológica para este trabalho os valores de precipitação diária (mm), temperatura do ar média no dia (°C), temperaturas mínima e máxima da água (°C), velocidade do vento a 2 metros de altura (m/s), radiação solar incidente na superfície terrestre [cal/(cm².dia)], o tempo de insolação (horas),

pressão atmosférica (mb), umidade relativa (%), além dos valores de evaporação dos tanques Classe A e Padrão.

No método utilizado, considera-se que a taxa de evaporação E em uma superfície de 1 m^2 de água aberta é dada pela seguinte formulação:

$$E(m/s) = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot E_R + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot E_A \quad (5)$$

sendo E_R a taxa de evaporação por radiação, E_A a taxa de evaporação aerodinâmica, Δ o gradiente da curva pressão x vapor de saturação (Pa/°C) e γ a constante psicrométrica (Pa/°C).

A taxa de evaporação por radiação é dada por:

$$E_R(m/s) = \frac{1}{l_v \cdot \rho_w} (R_N - H_S - G) \quad (6)$$

sendo l_v o calor latente de vaporização (J/kg), necessário para transformar de líquido a vapor 1 mm/cm^2 de água, dado por:

$$l_v = 2500000 - 2360 \cdot T \quad (7)$$

em que T é a temperatura ambiente (°C); ρ_w é a massa específica da água (kg/m^3), variável com a temperatura; R_N é a radiação líquida disponível para a mudança de estado da água (W/m^2), dada por:

$$R_N = R_i \cdot (1 - r) - R_e \quad (8)$$

sendo r o coeficiente de albedo, quociente entre a radiação refletida e a radiação incidente e estimado de acordo com as características da superfície (para água, Righetto (1998) propõe o valor de 0,05 para o albedo), R_i a radiação incidente global [$\text{cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{dia})$], e R_e a radiação líquida de onda longa, dada por:

$$R_e = \sigma \cdot T^4 \left(A - B \sqrt{e} \right) \left(0,1 + 0,9 \frac{n}{N} \right) \quad (9)$$

sendo σ a constante de Stephan-Boltzmann [$117 \times 10^{-9} \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{dia} \cdot \text{K}^4)$], T a temperatura ambiente (°K), A e B parâmetros locais (para o estado de São Paulo: $A = 0,56$ e $B = 0,078$), n o número de horas de brilho solar efetivo, N o número máximo de horas de brilho solar teórico, função da latitude (São Carlos, aproximadamente 22° S) e época do ano (Tabela 1), e e a pressão de vapor de água, dada por:

$$e = 611 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{237,3 + T}\right) \quad (10)$$

sendo T a temperatura no ponto de orvalho (°C).

Para o cálculo da taxa de evaporação por radiação, foi suposto que o calor sensível H_S e o fluxo de calor no solo G são nulos.

Tabela 1 - Insolação Máxima Diária, N , em horas

Latitude	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
0	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
10°S	12,6	12,4	12,1	11,9	11,7	11,5	11,6	11,8	12,0	12,3	12,6	12,7
20°S	13,2	12,8	12,2	11,6	11,2	10,9	11,0	11,4	12,0	12,5	13,2	13,3
22°S	13,4	12,5	12,2	11,6	11,1	10,8	10,9	11,3	12,0	12,6	13,2	13,3
30°S	13,9	13,1	12,3	11,4	10,6	10,2	10,4	11,0	11,9	12,8	13,6	14,1
40°S	14,7	13,6	12,4	11,1	9,9	9,3	9,6	10,5	11,6	13,1	14,3	15,0

Fonte: Righetto (1998)

A constante psicrométrica é dada por:

$$\gamma = \frac{C_p \cdot K_h \cdot p}{0,622 \cdot I_v \cdot K_w} \quad (11)$$

sendo C_p o calor específico a pressão constante igual a 1005 J/(kg.°K), p a pressão atmosférica (Pa) e K_h/K_w a relação de difusividades de calor e vapor, suposto igual a 1.

O gradiente da curva pressão x vapor de saturação é dado por:

$$\Delta = \frac{de_s}{dT} = \frac{4098 \cdot e_s}{(237,3 + T)^2} \quad (12)$$

sendo T a temperatura ambiente (°C) e e_s a pressão de vapor de saturação (Pa), dada pela equação:

$$e_s = \frac{e}{HR} \quad (13)$$

sendo HR a umidade relativa (%).

A taxa de evaporação aerodinâmica é dada por:

$$E_A = B \cdot (e_s - e) \quad (14)$$

sendo B a constante aerodinâmica (m/Pa.s), dado pela seguinte equação:

$$B = \frac{0,622 \cdot k^2 \cdot \rho_a \cdot u_2}{p \cdot \rho_w \left[\ln \left(\frac{z_2}{z_0} \right) \right]^2} \quad (15)$$

sendo k a constante de distribuição de velocidade do vento ou constante de von Kármán igual a 0,4, u_2 a velocidade do vento a 2 metros de altura (m/s), z_2 a altura de coleta dos dados de vento (2 metros); z_0 a rugosidade da água na camada limite (igual a 0,0003 m), e ρ_a a densidade do ar (kg/m³), podendo ser estimada pela lei de gás ideal:

$$\rho_a = \frac{p}{R_a \cdot T} \quad (16)$$

sendo a pressão atmosférica p em Pa, a temperatura T em °K e a constante de gás do ar úmido em J/(kg.°K) e dada por:

$$R_a = 287 \cdot (1 + 0,608 \cdot q_v) \quad (17)$$

sendo q_v a umidade específica (kg/kg) dada por:

$$q_v = 0,622 \cdot \frac{e}{p} \quad (18)$$

EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Em solos vegetados, o processo combinado de evaporação pela superfície do solo e transpiração pelas plantas é chamado de evapotranspiração. A quantificação da evapotranspiração através de formulações físicas é complicada devido à complexidade dos fenômenos físicos intervenientes e pela variabilidade das escalas em que esses fenômenos acontecem (Righetto, 1998).

As equações semi-empíricas utilizadas para as estimativas da evapotranspiração normalmente consideram tanto a umidade do solo quanto as condições meteorológicas. Nestas, são utilizadas definições de evapotranspiração potencial (ETP) e evapotranspiração real (ETR). A ETP é a quantidade de água transferida para a atmosfera de uma superfície coberta de vegetação e bem suprida de água. Como a própria definição, a ETR é a quantidade de água transferida para a atmosfera nas condições reais (existentes) de condições atmosféricas e umidade do solo.

Neste trabalho, o método combinado, apresentado no item anterior para o cálculo da evaporação de superfícies livres de água, também é utilizado para as estimativas de evapotranspiração potencial.

No método utilizado, os termos aerodinâmico e de radiação efetiva são modificados e a taxa de evapotranspiração *ETP* em uma superfície de 1 m² de solo é dada pela seguinte formulação:

$$ETP(mm/d) = \frac{\Delta}{\Delta + \varepsilon^*} \cdot (R_N - G) \frac{1}{l_v} + \frac{\varepsilon}{\Delta + \varepsilon^*} \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e - e_s) \quad (19)$$

sendo ε a constante psicrométrica (kPa/°C), dada por:

$$\varepsilon = 0,0016286 \cdot \frac{p}{l_v} \quad (20)$$

e ε^* a constante psicrométrica modificada (kPa/°C), de acordo com a seguinte equação:

$$\varepsilon^* = \varepsilon \cdot (1 + 0,33 \cdot u_2) \quad (21)$$

BACIA DA REPRESA DO BROA

A Bacia da Represa do Broa tem uma área de 21149,375 ha, incluindo a área urbana de Itirapina que é de 117,5 ha e a área da Represa do Broa que é de 460,0 ha. A bacia hidrográfica (Figura 2) é originada pela captação artificial dos Ribeirões do Lobo e Itaqueri e pelos córregos do Geraldo e das Perdizes. A vegetação predominante é o cerrado e um levantamento realizado por Freire et al. (1978) identificou os tipos de solo e de vegetação na bacia. De acordo com esse

inventário, foi possível a estimativa dos valores de reflexão da radiação incidente (albedo) para as diversas unidades pedológicas, necessário para a estimativa da evaporação e evapotranspiração.

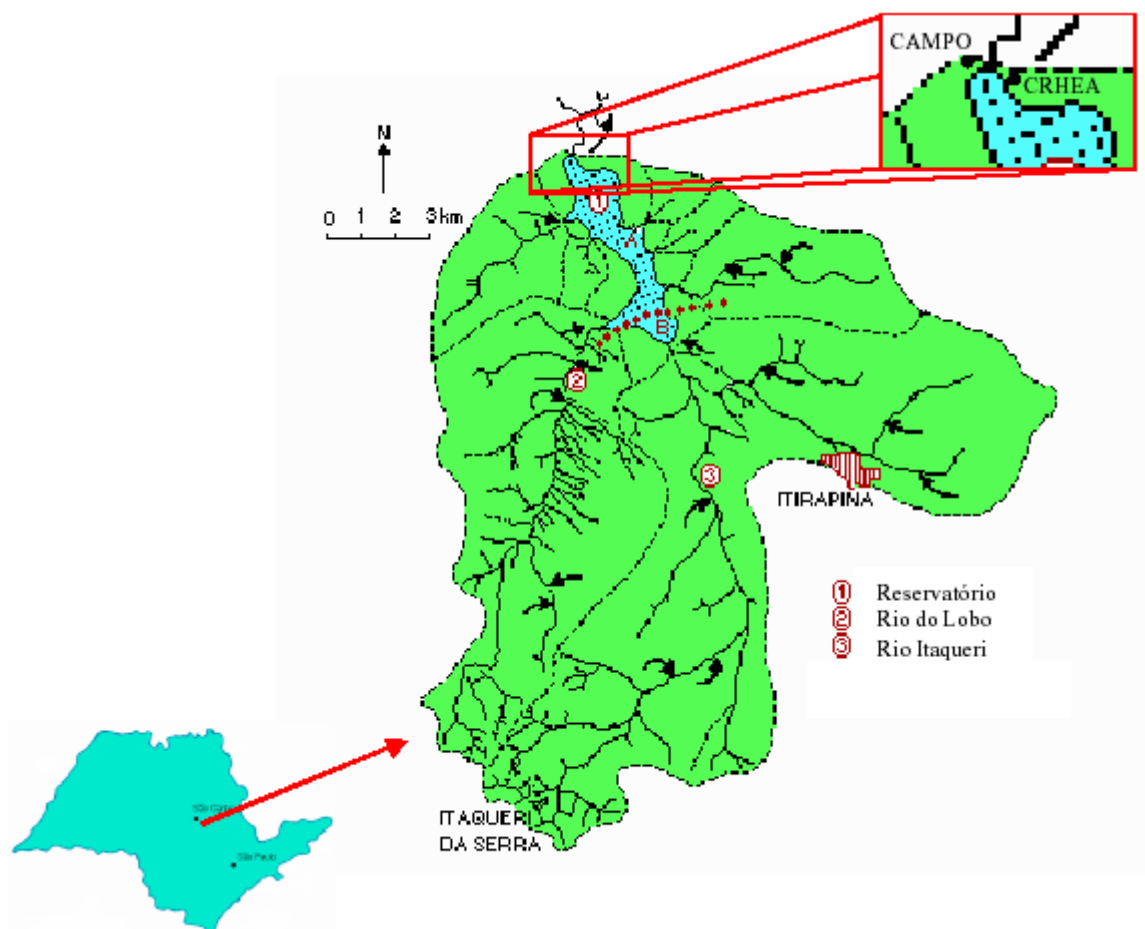


Figura 2 – Bacia da Represa do Broa (Fonte: Cunha, 2003)

As unidades taxonômicas identificadas e caracterizadas através de análises morfológicas, físicas e químicas, foram classificadas segundo o Sistema Brasileiro e a Soil Taxonomy. A área de cada unidade foi calculada em ha e em porcentagem da área total da bacia, como visto na Tabela 2.

Os valores dos albedos foram adotados de acordo com o tipo e cobertura do solo com o auxílio de tabelas encontradas em Tucci (1993) e Righetto (1998).

Tabela 2 – Distribuição das unidades Taxonômicas e respectivo valor de albedo na área da Bacia da Represa do Broa.

Tipo do solo	Vegetação	Área (ha)	Área (%)	Albedo
Terra roxa estruturada latosólica distrófica, A moderado, textura média	Pastagem	171,250	0,810	0,20
Terra roxa estruturada latosólica eutrófica, A moderado, textura argilosa	Pastagem e grama	557,500	2,636	0,20
Podzólico Vermelho-Amarelo distrófico, A moderado, textura média	Pastagem e árvores esparsas	345,625	1,634	0,20
Podzólico Vermelho-Amarelo distrófico, álico, A moderado, textura média	Pastagem e árvores esparsas	1118,750	5,290	0,20
Latosol Vermelho-Amarelo distrófico, álico, A fraco, textura arenosa	Campo cerrado	3468,125	16,398	0,20
Latosol Vermelho-Amarelo distrófico, álico, A fraco, textura média	Reflorestamento e pastagem	183,125	0,866	0,20
Latosol Vermelho Escuro distrófico, álico, A fraco, textura arenosa	Cerrado e árvores típicas	275,000	1,300	0,20
Latosol Vermelho Escuro distrófico, álico, A moderado, textura média	Reflorestamento com pinheiros	3035,000	14,350	0,20
Litosol substrato basaltito	pastagem	55,000	0,260	0,20
Areia quartzosa vermelho-amarela distrófica, álica, A fraco	Reflorestamento e cerrado	2624,375	12,409	0,25
Areia quartzosa vermelho-amarela câmbica, distrófica, álica, A fraco	Reflorestamento e cerrado	5123,125	24,223	0,25
Areia quartzosa hidromórfica distrófica, álica	Gramíneas (excesso de água)	335,000	1,584	0,20
Solos hidromórficos	Matas ciliares e capim de banhado	58,750	0,278	0,15
Solos turfosos distrófico, álicos, indiscriminados	Arbustos e gramíneas em solos encharcados	2215,000	10,473	0,15
Complexo constituído por areia quartzosa vermelho-amarela distrófica, álica, A fraco e solos hidromórficos		402,500	1,903	0,20
Complexo constituído por terra roxa latosólica eutrófica e litosol substrato basaltito		603,750	2,855	0,20
Itirapina (área urbana)		117,500	0,556	0,20
Represa do Broa		460,000	2,175	0,05
TOTAL		21149,375	100,000	

Fonte: Adaptado de Freire et al. (1978)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na formulação apresentada e nos dados disponíveis, foram calculadas as taxas diárias de evaporação e evapotranspiração potencial pelo método combinado, e acumuladas mensal

e anualmente. Além disso, os dados de precipitação também foram acumulados mensal e anualmente.

Na Figura 3, apresentamos os dados mensais de precipitação coletados durante o período de janeiro de 1972 a dezembro de 2002.

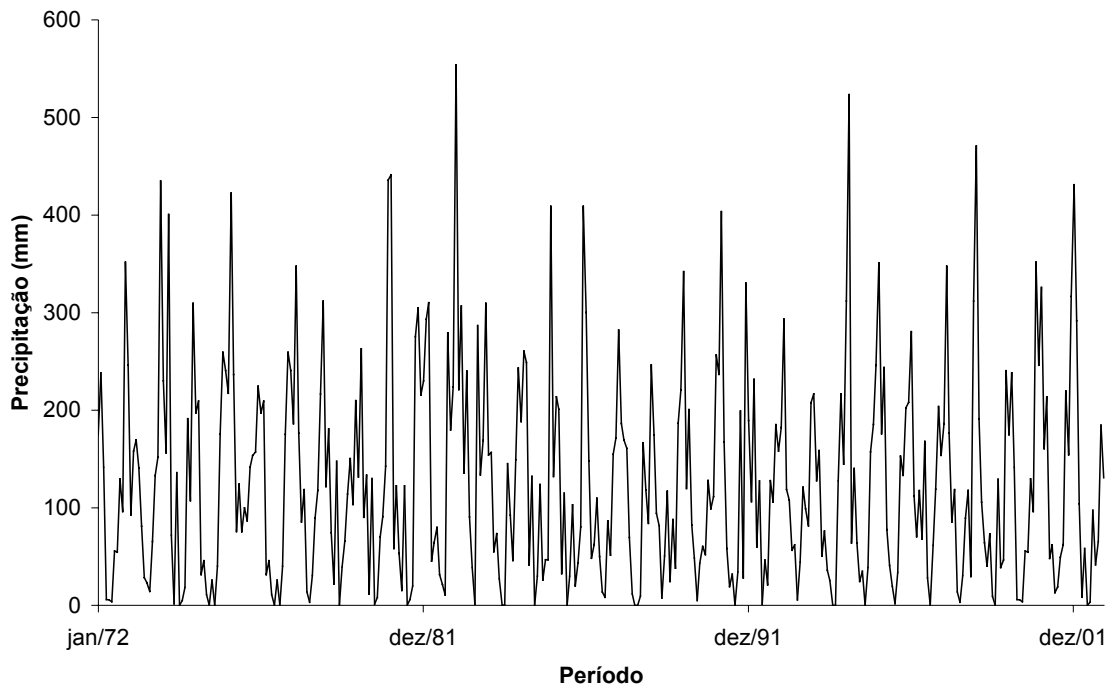


Figura 3 – Precipitação para a bacia da represa do Broa entre 1972 e 2002.

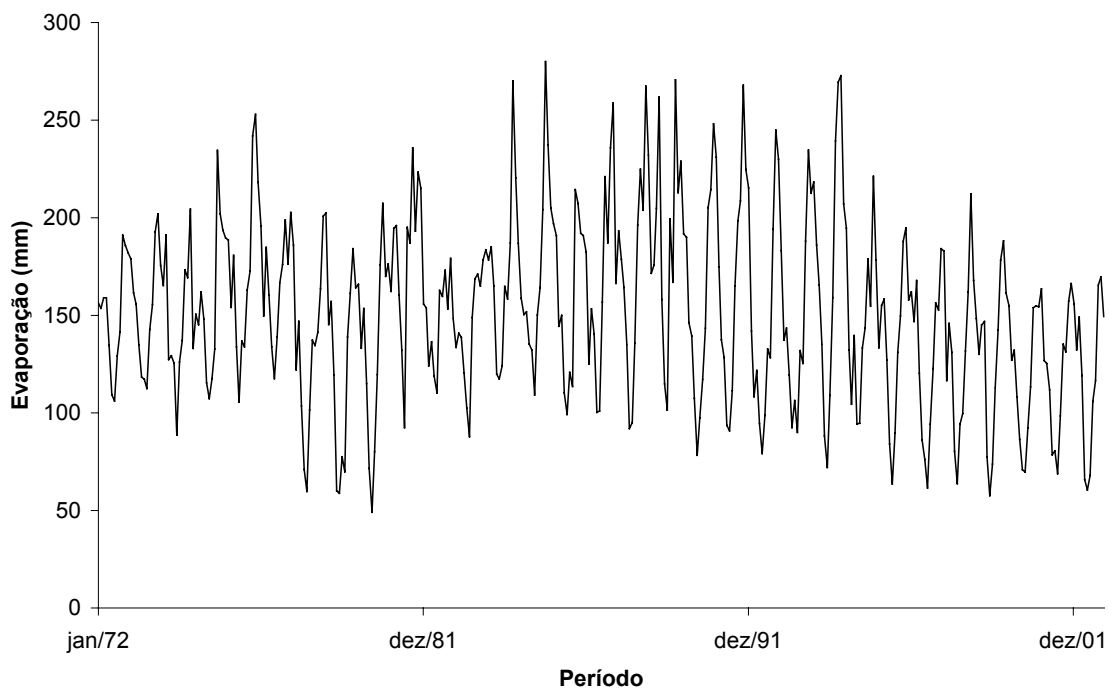


Figura 4 – Taxa de evaporação líquida estimada pelo método combinado para bacia da represa do Broa entre 1972 e 2002.

Os valores calculados de evaporação líquida pelo método combinado para a série 1972 – 2002 são mostrados na Figura 4.

Uma comparação entre os valores estimados de evaporação pelo método combinado e os valores coletados nos tanques Classe A e Padrão na estação climatológica é realizada para o ano de 2002, na forma da Figura 5.

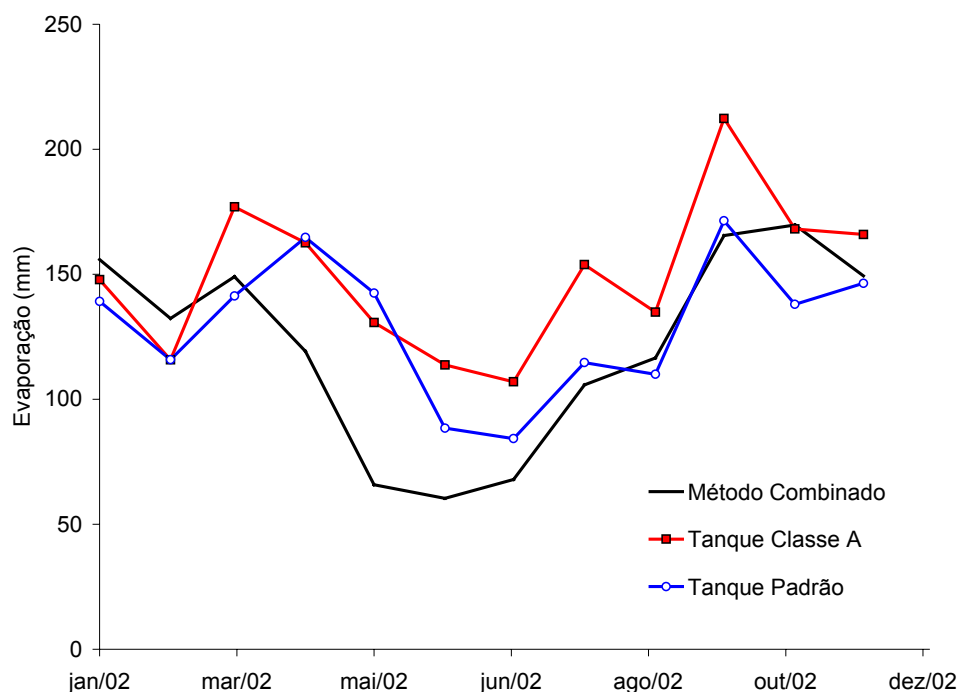


Figura 5 – Evaporação entre JAN/02 e DEZ/02.

As taxas estimadas de evaporação líquida se aproximaram mais das taxas coletadas no tanque Padrão, e um dos motivos seria as dimensões do tanque. Uma análise de toda a série poderia indicar coeficientes de ajuste para os valores dos tanques.

Tabela 3 – Balanço hídrico para a bacia da represa do Broa no ano de 2002.

Período	Precipitação (mm)	Evaporação (mm)	Evapotranspiração (mm)			ETP (mm)	P - ETP (mm)	Armazenamento (mm)	Varição do Armaz. (mm)	ETR (mm)	Deficiência (mm)	Excesso (mm)
			a = 0,15	a = 0,20	a = 0,25							
jan/02	431,2	155,9	137,5	131,5	125,5	130,5	300,7	100,0	0,0	130,5	0,0	300,7
fev/02	291,6	132,3	117,0	111,6	106,2	110,7	180,9	100,0	0,0	110,7	0,0	180,9
mar/02	104	149,1	141,4	134,8	128,2	133,5	-29,5	70,5	-29,5	133,5	0,0	0,0
abr/02	8,6	119,2	123,3	117,8	112,3	116,4	-107,8	0,0	-70,5	79,1	37,3	0,0
mai/02	58,3	65,8	63,9	61,4	59,0	60,9	-2,6	0,0	0,0	58,3	2,6	0,0
jun/02	0	60,4	72,7	69,0	65,3	67,8	-67,8	0,0	0,0	0,0	67,8	0,0
jul/02	3,3	68,0	82,2	78,9	75,6	77,9	-74,6	0,0	0,0	3,3	74,6	0,0
ago/02	97,5	105,8	119,4	115,2	111,0	113,9	-16,4	0,0	0,0	97,5	16,4	0,0
set/02	41,5	116,5	115,6	111,5	107,4	110,5	-69,0	0,0	0,0	41,5	69,0	0,0
out/02	65,4	165,5	168,4	162,9	157,3	161,5	-96,1	0,0	0,0	65,4	96,1	0,0
nov/02	184,8	169,7	145,0	139,6	134,2	138,9	45,9	45,9	45,9	138,9	0,0	0,0
dez/02	130,7	149,4	114,1	107,9	101,8	107,3	23,4	69,3	23,4	107,3	0,0	0,0
TOTAL	1416,9									966,0	363,9	481,6

O balanço hídrico foi realizado com as componentes precipitação e evapotranspiração potencial estimada a partir das taxas de evaporação líquida e evapotranspiração potencial calculadas

pelo método combinado. Uma ponderação em relação às áreas para cada tipo de solo e vegetação foi feita para a estimativa final da evapotranspiração potencial. Na Tabela 3, é demonstrado como o cálculo foi realizado para a série, exemplificando para o ano de 2002.

Observa-se, que em 2002, houve um excedente de água nos dois primeiros meses do ano. A partir daí, houve déficit de água para o restante do ano, permanecendo o armazenamento igual a zero em boa parte do período.

A evapotranspiração real estimada com um armazenamento de 100 mm é mostrada na Figura 6 para todos os anos da série.

Para os cálculos realizados, a evapotranspiração real representou cerca de 75% do total precipitado, sendo as outras componentes do ciclo hidrológico (infiltração, percolação, escoamento superficial e demanda), neste caso, responsáveis pelos 25% restantes.

Uma importante questão a ser analisada é a deficiência ou excesso de água apresentados pelos cálculos do balanço hídrico. Nas Figuras 7 e 8, são apresentadas as estimativas de deficiência e excesso de água, respectivamente. Médias móveis de 12 meses são mostradas em vermelho para uma análise do comportamento das curvas.

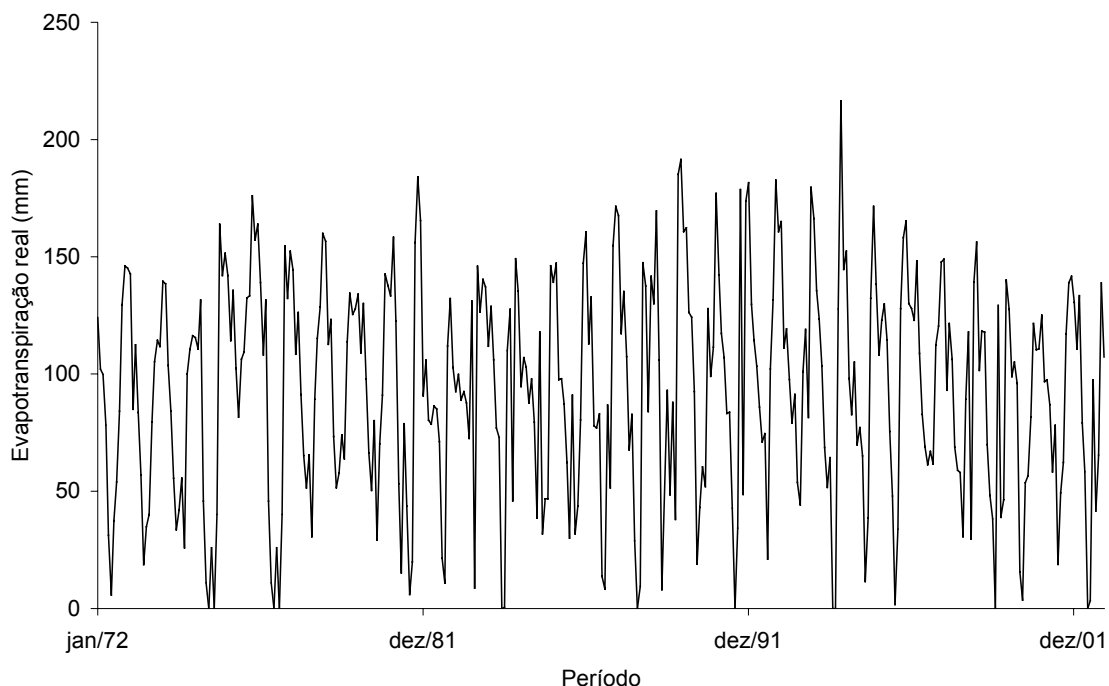


Figura 6 – Taxa de evapotranspiração real estimada pelo método combinado para bacia da represa do Broa entre 1972 e 2002.

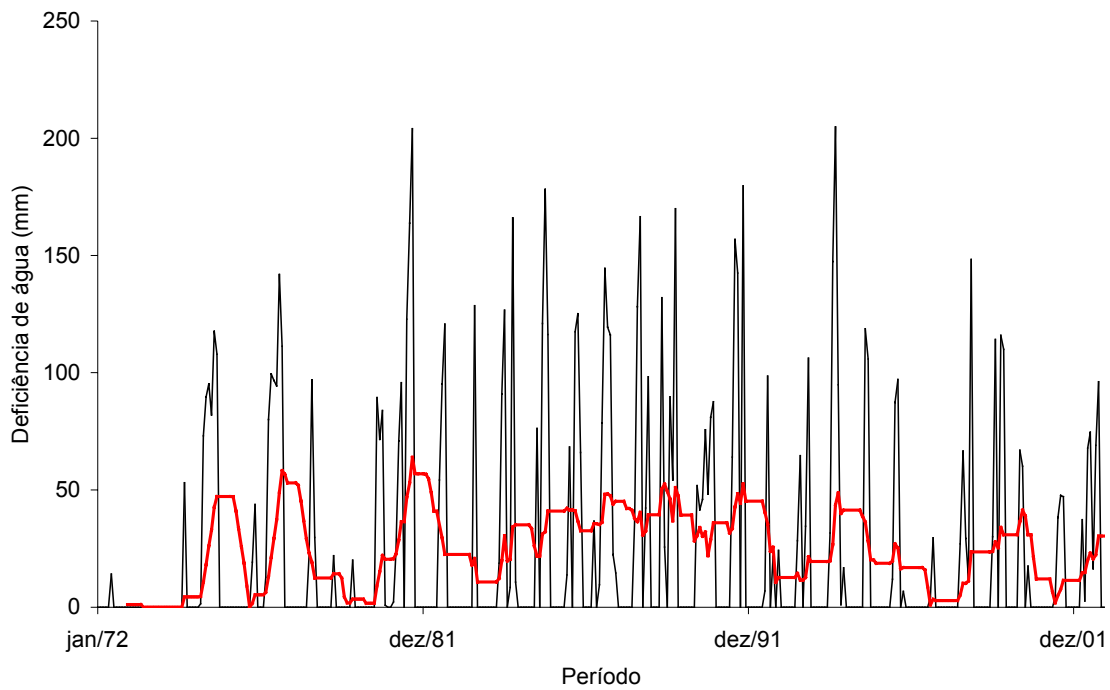


Figura 7 – Deficiência de água estimada no balanço hídrico para bacia da represa do Broa entre 1972 e 2002.

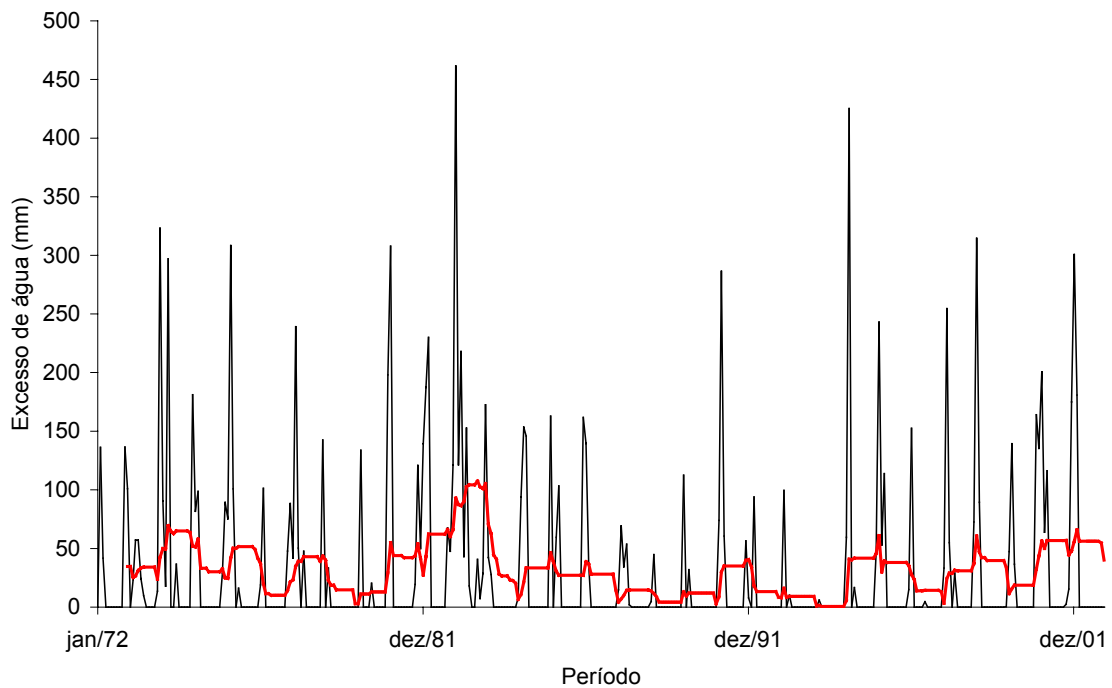


Figura 8 – Excesso de água estimada no balanço hídrico para bacia da represa do Broa entre 1972 e 2002.

Pode ser visto na Figura 7 que a deficiência de água na bacia foi maior durante a década de 80, caracterizada por temperaturas mais altas. A década de 90 apresentou uma umidade maior e, portanto, a deficiência foi menor.

Como consequência, o excesso de água foi maior na década de 90 e menor na década de 80.

Vale comentar que o armazenamento adotado em 100 mm deve ser alvo ainda de estudos, verificando para os diferentes tipos de solo as condições de escoamento subsuperficial.

A análise de balanço hídrico serial está sujeita a incertezas nas variáveis monitoradas e as estimadas. A síntese do balanço hídrico serial (1972-2002) aparece na Tabela 4. Os resultados obtidos foram verificados conforme:

$$Déficit_{Acum} = ETP_{Acum} - ETR_{Acum} \quad (22)$$

$$P_{Acum} - ETR_{Acum} + S_{inicial} = Excesso_{Acum} + S_{final} \quad (23)$$

sendo P a precipitação e S o armazenamento.

Há pouca sensibilidade dos déficits e excessos acumulados para as variações de $S_{máx}$. Isto pode ser explicado pelo fato de terem sido incluídos diferentes ciclos de anos secos e úmidos, que mostram pouca não-linearidade com relação ao conteúdo máximo de água, quando estudados em forma conjunta. Existe uma evidência preliminar de existir um comportamento não-linear a partir de $S_{máx} \cong 25$ mm. Para uma profundidade de 1,2 m e um conteúdo de umidade de saturação médio para perfil $\langle \theta_s \rangle \cong 0,25 \text{ m}^3/\text{m}^3$, temos uma lâmina de armazenamento máximo $S_{máx} = 1,2 \times 0,25 = 0,3$ m (300 mm) (Cunha, 2003). Esses valores correspondem ao ponto de maior curvatura das relações de Déficit Acumulado e de Excesso Acumulado com relação à $S_{máx}$ (Tabela 4), mostrando uma representatividade média das análises de campo obtidas na Estação Climatológica do CRHEA.

Tabela 4- Análise global das alturas acumuladas das componentes do balanço hídrico serial 1972-2002 na Bacia da Represa do Broa, SP (em % da precipitação acumulada), para diferentes armazenamentos máximos $S_{máx}$

$S_{máx}$ (mm)	Precipitação (%)	ETP (% Precip)	ETR (% Precip.)	Excesso (% Precip.)	Deficiência (% Precip.)
5	100	95	66	34	28
25	100	95	69	31	25
50	100	95	71	29	23
100	100	95	75	25	20
200	100	95	80	20	14
300	100	95	84	16	10
1000	100	95	91	8	3

(*): valores médios representativos das observações com lisímetros na Estação Climatológica do CRHEA (Cunha, 2003)

Em especial para o ano de 2002 a evapotranspiração real (ETr) obtida com o método combinado (966 mm), foi 67,4% maior do que a ETr verificada por Cunha (2003), com o auxílio de lisímetros.

Por outro lado, a evapotranspiração potencial (ETp) estimada com o método combinado (1330 mm) demonstrou ser 12% maior que a ETp estimada com o método Thornthwaite e, 25,5% menor do que a avaliada pelo método de Penman, ambos métodos empregados por Cunha (2003).

As incertezas devem ser avaliadas em um balanço hídrico serial de longo prazo, sobretudo pela não-estacionariedade das bacias sob influência antrópica. Nos dados deste trabalho, foi feita uma análise de sensibilidade a partir de diferentes valores de $S_{máx}$ (ver Tabela 4). Estudando os valores acumulados de ETR , dois cenários podem ser avaliados: 1) um cenário de alta variação de $S_{máx}$ ao longo do tempo, onde $41 \% < ETR < 109 \%$ da precipitação, 2) outro cenário, de baixa variação de $S_{máx}$ ao longo do tempo, onde $60 < ETR < 90 \%$ da precipitação. Esses resultados preliminares são de importância estratégica em se tratando de planos de bacia sob mudança do uso do solo e/ou de mudança do clima. No entanto, a sua análise deve ser contrastada com observações em diferentes escalas de trabalho e como estas escalas são influenciadas pelo grau de incerteza nas estimativas.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Um balanço hídrico serial para a Bacia da Represa do Broa foi realizado no presente trabalho. As componentes evapotranspiração e precipitação são avaliadas e discutidas para diferentes armazenamentos máximos. Um estudo mais detalhado da região deve ser realizado para considerar demais componentes como infiltração, percolação e demandas, e tentar relacionar as tendências de mudanças climáticas globais com as possíveis variações regionais, assim como a relação de algum efeito natural ou antrópico que ocorra. O método utilizado para as estimativas (método combinado – Penman, 1956) deve ser avaliado quanto à sua adequação para a região em estudo, além das adoções dos coeficientes de reflexão da radiação incidente (albedos) para os diferentes tipos de solos. As alterações no uso do solo no período avaliado e os diversos usos da água na bacia influenciam nas estimativas realizadas e devem ser alvos de estudos posteriores.

A consideração da recarga do aquífero Guarani é outro ponto de essencial avaliação, pois a área em estudo faz parte da região de afloramento do mesmo.

Enfim, o trabalho mostra a importância do monitoramento hidrometeorológico e a disponibilidade dos registros para os diversos estudos da área. A importância estratégica da continuidade das séries hidrológicas da Estação Climatológica junto a Represa do Broa no CRHEA (www.shs.eesc.sc.usp.br/crhea/infraestrutura/estrutura.htm) é de especial interesse na década 2003-2012 PUB “Prediction in Ungauged Basins” (previsão em bacias sem dados) da International Association of Hydrological Sciences (www.cig.ensmp.fr/~iahs/).

AGRADECIMENTOS

Aos técnicos do CRHEA, Roberto Maramarque e Rogério, ao Prof. Frederico Fábio Mauad, diretor do CRHEA, pela disponibilidade dos dados, e ao Prof. Edson C. Wendland, pela dissertação de mestrado cedida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bertoni, J. C.; Tucci, C. E. M. (1993). *Precipitação*, In: Tucci, C. E. M. (org.): *Hidrologia: Ciência e Aplicação*, 2ª ed., Editora da Universidade, p. 177-241.
- Convênio DNAEE-EESC (1980). *Bacia Experimental Rio Jacaré-Guaçu*, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 113p.
- Cunha, A. T. (2003). *Estimativa Experimental da Taxa de Recarga na Zona de Afloramento do Aquífero Guarani para a Região de São Carlos - SP*. São Carlos. 117 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.
- Freire, O.; Gimenes R., J.; Pessotti, J. E.; Carraro, E. (1978). *Solos da Bacia do Broa*, Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Ciências Biológicas, 139 p.
- Penman, H. L. (1956). Evaporation: an introductory survey. Netherlands. *Journal of Agricultural Science*, Cambridge, v. 4, p. 9-29.
- Righetto, A. M. (1998). *Hidrologia e Recursos Hídricos*, Edusp, São Carlos, 819 p.
- Silveira, A. L. L. (1993). *Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica*, In: Tucci, C. E. M. (org.): *Hidrologia: Ciência e Aplicação*, 2ª ed., Editora da Universidade, 35-51.
- Tucci, C. E. M.; Beltrame, L. F. S. (1993). *Evaporação e Evapotranspiração*, In: Tucci, C. E. M. (org.): *Hidrologia: Ciência e Aplicação*, 2ª ed., Editora da Universidade, 253-287.
- Tucci, C. E. M. (1993) (org.). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*, 2ª ed., Editora da Universidade, 943 p.