

ANÁLISE DE MODELOS DE FUNÇÃO DE PRODUÇÃO IDENTIFICADOS PELA METODOLOGIA DPFT: aplicação para bacias do alto São Francisco, em Minas Gerais

Marcus Felipe Matos Cruz¹; Bruno Teixeira de Alvarenga Cunha² & Bruno Rabelo Versiani³

RESUMO --- A escassez de informações hidrológicas face a realidade das redes hidroluviométricas brasileiras, faz com que se procure entender o comportamento das bacias hidrográficas através de modelos empíricos globais mais simples, com poucos parâmetros calibráveis. No método DPFT (Diferenças Primeiras da Função de Transferência) utiliza-se de um conjunto multi-eventos precipitação-vazão e um algoritmo iterativo para a identificação simultânea do Hidrograma Unitário (Função de Transferência) médio da bacia hidrográfica e de uma série de precipitações efetivas associadas a cada evento. Esta última particularidade, permite a calibração e comparação, à posteriori, de diferentes modelos de Função de Produção, relacionando as precipitações observadas às precipitações efetivas calculadas pela metodologia. Apresentam-se aqui resultados da aplicação do método em bacias de tamanhos diferentes, utilizando-se dados horários ou diários, compatíveis com os tempos de resposta dos hidrogramas, relacionados aos diversos tamanhos das respectivas bacias. Às três bacias selecionadas, calibraram-se três modelos simples de Função de Produção frequentemente usados pelos hidrólogos: o modelo do Soil Conservation Service e modelo de índice- ϕ (com um parâmetro), e um modelo de reservatório (com três parâmetros). Os resultados dos ajustes dos modelos foram analisados e comparados face aos diferentes tamanhos das bacias hidrográficas.

ABSTRACT --- The scarcity of hydrologic information related to the reality of the Brazilian hydropluviometric networks, leads one to study the behavior of the basins by means of simpler global empirical models, with few parameters to calibrate. In DPFT method (First Differences of the Transfer Function) one uses a multi-events rainfall-runoff set and an iterative algorithm for the simultaneous identification of the average Unit Hydrograph (Transfer Function) of the basin and of a series of effective precipitations associates to each event. This last particularity allows to the calibration and comparison, a posteriori, of different Loss Function models, relating observed precipitations to calculated effective precipitations identified by the methodology. Results of the application of the method are presented here, concerning basins of different sizes, using itself hourly or daily data, compatible with the times of the response of the hydrographs. For the three selected basins, three frequently used simple Loss Function models were calibrated: Soil Conservation Service and ϕ -index models (with one parameter), and a reservoir model (with three parameters). The results were analyzed and compared considering the different sizes of the basins.

Palavras-chave: Modelo precipitação-vazão, hidrograma unitário, função de produção.

1) Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG. E-mail marcus.felipe@terra.com.br

2) Bolsista de Iniciação Científica do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG. E-mail brunotac@ufmg.br

3) Professor adjunto do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos – Escola de Engenharia da UFMG, Av. do Contorno, 842 – 8º andar – CEP 30110-066, Belo Horizonte – MG. E-mail versiani@ehr.ufmg.br

INTRODUÇÃO

Em geral as redes de estações hidropluviométricas brasileiras dispõem somente de dados de precipitação e de vazão, e, na maior parte dos casos, somente dados diários são disponíveis. A escassez de dados e a fraca densidade espacial de observações apresentam um contraste com a necessidade de dados, inerente aos modelos distribuídos. Devido a dificuldade de calibração do grande número de parâmetros que os modelos conceituais geralmente apresentam, a aplicação de modelos empíricos globais são hoje adotados em pesquisas e aplicações tecnológicas, tais como projetos de obras hidráulicas e sistemas de previsão e alerta de cheias. O uso da metodologia de identificação do Hidrograma Unitário e das precipitações efetivas denominada DPFT (Diferenças Primeiras da Função de Transferência), a partir de conjuntos de precipitação total e vazões observadas, nos possibilita obter o modelo de Função de Produção que melhor se ajusta às características da bacia hidrográfica em estudo.

Com o objetivo de complementar os trabalhos de Versiani *et al.* (2005) e Maia *et al.* (2006), que aplicaram a metodologia DPFT à seções fluviométricas de Ponte Raul Soares (bacia hidrográfica do rio das Velhas em Minas Gerais) com área de drenagem de 4996 km² e Juatuba (sub-bacia do ribeirão Serra Azul em Minas Gerais) com área de drenagem de 109 km², respectivamente, neste artigo foi aplicado o método em outra seção da bacia hidrográfica do rio das Velhas, Honório Bicalho, à montante de Ponte Raul Soares e com área de drenagem intermediária, com 1655 km². Foram estudados três modelos simples de função de produção nas três seções fluviométricas: modelo do Soil Conservation Service e modelo do índice- ϕ (com um parâmetro calibrável) e um modelo de reservatório (com três parâmetros calibráveis). Os resultados foram analisados e comparados face aos diferentes tamanhos das bacias hidrográficas.

MATERIAL E MÉTODOS

Esquemáticamente, o método do Hidrograma Unitário (HU) propõe que, para uma dada bacia hidrográfica, a vazão é resultado de uma Função de Produção (FP) e de uma função de transferência linear (H). A FP é fortemente não-linear, transforma a precipitação total medida, média aritmética ou ponderada, (P), em precipitação efetiva (Pe), a qual produz o escoamento superficial. Esta transformação depende do tipo e uso do solo e das suas condições de umidade, antes do evento chuvoso. A função de transferência linear (H) propaga ao longo do tempo a chuva efetiva Pe, para se obter a vazão superficial.

Classicamente, impõe-se um modelo de FP (suposto como o mais apropriado para a bacia) para se obter a chuva efetiva para cada evento. Desta forma, o hidrograma pode ser identificado

resolvendo-se a equação de convolução, que liga Pe (chuva efetiva), H_i (ordenadas discretizadas do HU) e Q_j (vazão no tempo j):

$$Q_j = \sum_{i=1}^k H_i \cdot Pe_{j-i+1} \quad (1)$$

Ao contrário desta abordagem clássica, o método DPFT, a partir de um conjunto de episódios chuva total – vazão, determina, a função de transferência (H) e as chuvas efetivas (Pe) para cada episódio e a relação P-Pe (Duband *et al.* (1993) e Maia *et al.* (2006)). Esta particularidade permite a comparação e escolha da melhor função de produção para uma dada bacia hidrográfica. A metodologia DPFT, usa um algoritmo iterativo que identifica a função de transferência média, H , de uma série de eventos chuva-vazão e a série correspondente de chuvas efetivas, Pe , para cada evento, sem assumir uma estrutura a priori para a FP.

Os cálculos são feitos utilizando-se a diferença primeira, ou seja, calculam-se as variações das vazões em um intervalo de tempo. Para isso, partindo-se da equação (1), obtém-se:

$$q_j = Q_j - Q_{j-1} = \sum_{i=1}^k (H_i - H_{i-1}) Pe_{j-i+1} \quad (2)$$

$$q_j = \sum_{i=1}^k h_i Pe_{j-i+1} \quad (3)$$

em que q_j representa a variação da vazão no instante j :

$$q_j = Q_j - Q_{j-1} \quad (4)$$

e h_i são os coeficientes da DPFT:

$$h_i = H_i - H_{i-1} \quad (5)$$

Este algoritmo iterativo consiste em se fazer uma primeira aproximação dos valores de h_i (coeficientes da DPFT) utilizando-se a diferença entre as vazões observadas q_j em um intervalo de tempo e a chuva total P , como uma primeira estimativa da chuva efetiva, como dados de entrada (Duband *et al.* (1993)).

Após a identificação do Hidrograma Unitário, procede-se a calibração da Função de Produção que relaciona a série de chuvas totais, P , às chuvas efetivas, Pe , calculadas na última iteração.

Funções de produção utilizadas

Neste trabalho, serão analisados 3 modelos simples de Função de Produção.

O modelo do Soil Conservation Service (S.C.S.)

A equação básica para o cálculo da precipitação efetiva pelo método do Soil Conservation Service é, (Tucci, (1993); Chow *et al.*, (1994)):

$$Pe = \frac{(P - 0,2.S)^2}{P + 0,8.S} \quad (6)$$

onde:

Pe = precipitação efetiva (mm);

P = precipitação total (mm);

S = retenção potencial máxima (mm).

S, a retenção potencial máxima, está relacionada a um parâmetro de ajuste, CN (número de curva), por:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (7)$$

Neste modelo, CN caracteriza simultaneamente as condições de umidade anterior ao evento chuva-vazão, o tipo geológico e o uso do solo da bacia hidrográfica. Neste trabalho, o parâmetro calibrável no modelo é CN, que varia teoricamente de 0 a 100, estando seus valores mais elevados associados às maiores capacidades de produção de escoamento superficial.

Modelo do índice- ϕ

As variabilidades espacial e temporal dos parâmetros presentes nas fórmulas de infiltração as tornam de difícil aplicação em grandes superfícies heterogêneas, sujeitas a intensidades de precipitação não uniforme. Tal fato conduz à utilização de “índices de infiltração”, que representam modelos aproximados do processo de infiltração. O emprego desta metodologia é um procedimento que admite, para uma dada chuva e em determinadas condições iniciais da bacia hidrográfica, que a capacidade de infiltração seja constante durante toda a duração do evento.

Esta capacidade de infiltração constante é o índice- ϕ (mm/h, mm/dia), que produziria um hietograma de precipitação efetiva, referente ao deflúvio superficial (altura de chuva efetiva total) Pe, sobre a bacia hidrográfica. O valor de ϕ calcula-se selecionando um intervalo de tempo Δt e um número de intervalos “M” de precipitação que contribuem para o escoamento superficial, conforme a equação 8 (Chow *et al*, 1994). O parâmetro calibrável é ϕ .

$$Pe = \sum_{m=1}^M (P_m - \phi \Delta t) \quad (8)$$

Modelo de Reservatório

Este modelo concebido por Lorent (1975), relaciona os fenômenos que ocorrem em uma bacia hidrográfica aos que ocorreriam em um reservatório, e calcula Pe por meio de:

$$Pe(t) = P(t) - W(t); \quad [0 < Pe(t) < P(t)] \quad (9)$$

em que a taxa de perdas, $W(t)$, é obtida usando-se uma equação exponencial que depende do déficit do reservatório, $D(t) = S_{MAX} - S(t)$, que representa a evolução hidrológica da bacia durante o evento (Figura 1), ou seja:

$$W(t) = [S_{MAX} - S(t-1)] [1 - \exp\{-\beta P(t)/(S_{MAX} - S(t-1))\}] \quad (10)$$

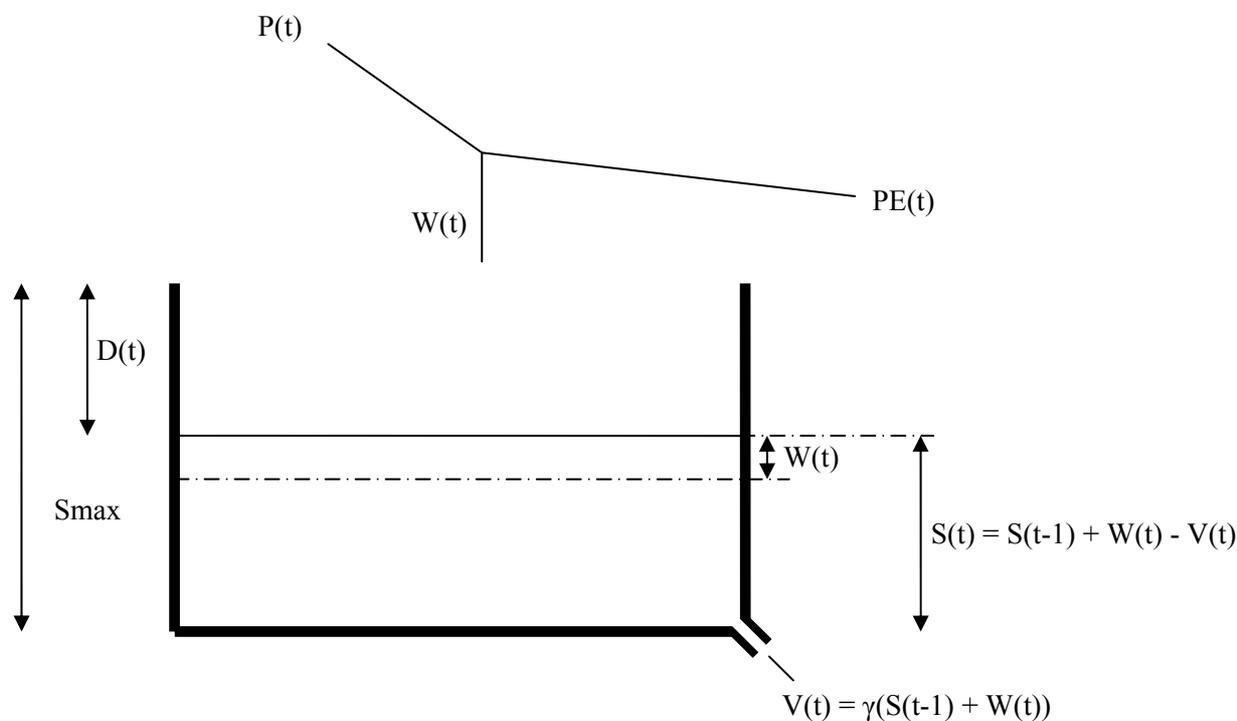


Figura 1 – Modelo de Reservatório

Na Figura 1,

$P(t)$ = precipitação observada no pluviômetro (media aritmética ou ponderada), no tempo t ;

$W(t)$ = retenção ou perda do reservatório em t ;

$S(t)$ = armazenagem do reservatório em t ;

$D(t)$ = deficit do reservatório em t ;

$Pe(t)$ = chuva efetiva em t ;

$V(t)$ = saída do reservatório em t ;

S_{MAX} = armazenagem máxima do reservatório.

O comportamento do déficit do reservatório é controlado por,

$$D(t) = D(t-1) - W(t) + V(t) = (1 - \alpha)D(0) + \alpha[D(t-1) - W(t-1)] \quad (11)$$

Onde:

$$\alpha = (1 - \gamma) \quad (12)$$

em que α e β são dois parâmetros caracterizando a bacia e devem ser calibrados respeitando-se a condição $0 < (\alpha, \beta) < 1$. $D(0)$ é um parâmetro que caracteriza as condições iniciais para cada evento,

levando-se em conta o estado hidrológico prévio (condições de umidade antes do início do episódio).

Áreas de estudo e base de dados

Neste trabalho serão utilizados dados de 2 bacias do alto rio São Francisco: bacia do rio das Velhas e bacia de Juatuba, afluente do rio Paraopeba (figura 2). No rio das Velhas, foram selecionadas 2 estações fluviométricas, seção de Honório Bicalho (com 1655 km² de área de drenagem) e seção de Ponte Raul Soares (com 4996 km² de área de drenagem). Na bacia de Juatuba foi selecionada a estação fluviométrica de Jardim (com 109 km² de área de drenagem).

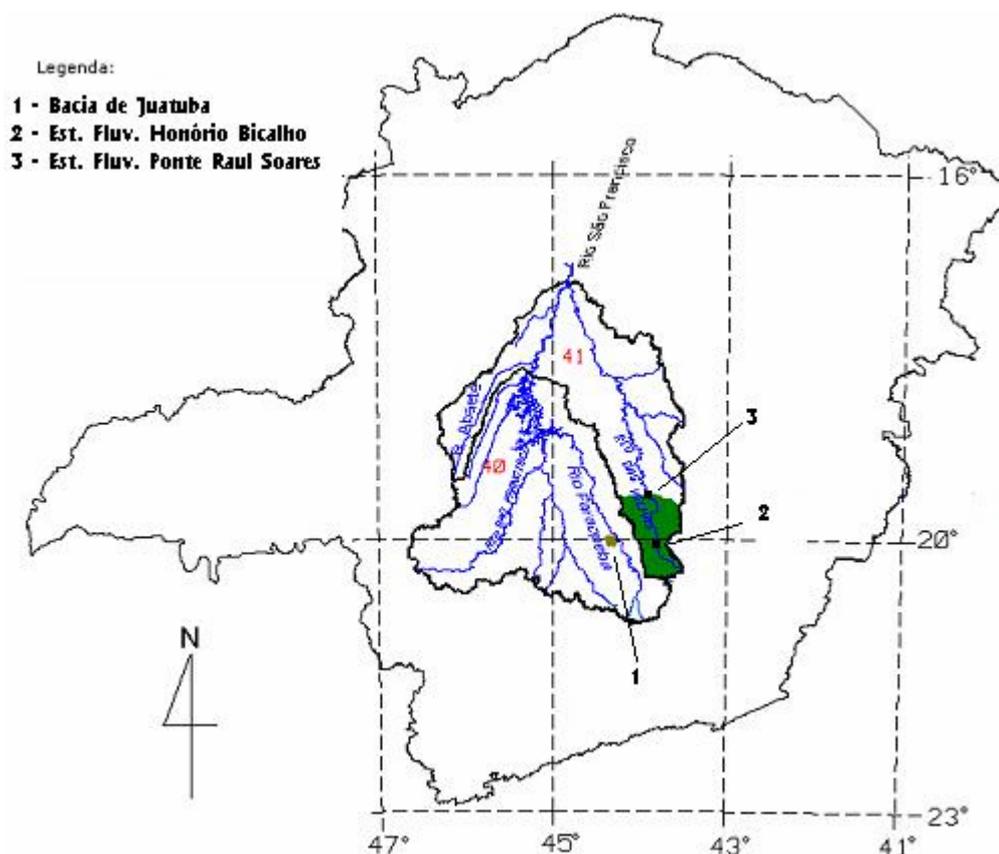


Figura 2 – Localização da bacia de Juatuba e bacia do rio das Velhas (Estações fluviométricas de Honório Bicalho e Ponte Raul Soares)

A bacia do rio das Velhas, um dos principais afluentes do alto rio São Francisco, localiza-se inteiramente no Estado de Minas Gerais, fazendo parte da sub-bacia 41. O rio se estende do município de Ouro Preto até o município de Pirapora desaguando no rio São Francisco.

Para calibração dos Hidrogramas Unitários e das chuvas efetivas relativas às duas estações fluviométricas da bacia do rio das Velhas, foram utilizados dados de vazões médias diárias nas duas seções e precipitações diárias. As precipitações médias nas duas sub-bacias foram calculadas pelos polígonos de Thiessen. Para a estação fluviométrica de Honório Bicalho, foram usados dados de 4

estações pluviométricas. Na seção de Ponte Raul Soares foram usados dados de 6 estações pluviométricas. Esta seção engloba grande parte da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

Os dados de vazão e de precipitação foram obtidos da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), e gentilmente cedidos pela CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais).

Foram selecionados eventos significativos, que ocorreram principalmente nos períodos de cheias acentuadas na região, entre os meses de outubro a março. Para a estação de montante, foram usados 19 eventos chuva-vazão, entre 1978 e 1996. Para a estação de jusante, foram usados 26 eventos, entre 1971 e 2000 (Versiani *et al.* (2005)).

Já a bacia hidrográfica de Juatuba (sub-bacia do ribeirão Serra Azul) está localizada a 50 Km a oeste de Belo Horizonte (Município de Mateus Leme) e é drenada principalmente pelos ribeirões Serra Azul e Mateus Leme. Estudaram-se os dados pluviométricos de 4 estações, sendo as precipitações obtidas pelo método de Thiessen (Maia *et al.* (2006)). Os dados fluviográficos usados foram referentes à estação fluviométrica de Jardim, localizada no ribeirão Serra Azul. Selecionaram-se 26 episódios precipitação-vazão do período compreendido entre os anos hidrológicos de 1991 a 1999. Neste estudo, o intervalo de tempo unitário adotado foi o horário.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Hidrogramas Unitários

As Funções de Transferência (Hidrogramas Unitários), para as estações, em valores adimensionais, foram obtidas pelo método DPFT (figuras 3 e 4).

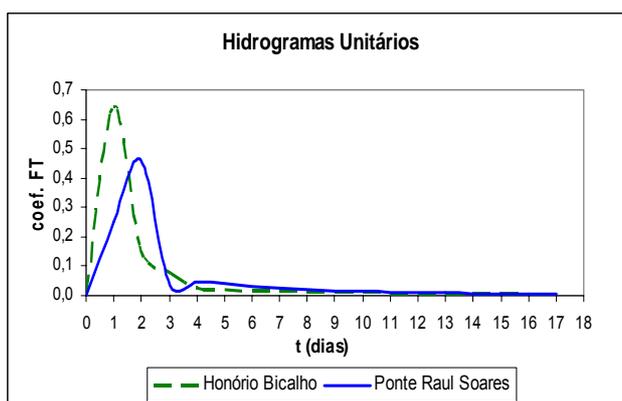


Figura 3 – Funções de Transferência – método DPFT (Versiani *et al.* (2005))

Como na calibração foram usadas unidades de milímetro para precipitações e vazões, os Hidrogramas Unitários (equação 1) são adimensionais. Pela figura 3 observa-se que o HU em Honório Bicalho (seção de montante, bacia de 1655 km²) apresenta o valor máximo no primeiro dia, enquanto o HU em Ponte Raul Soares (seção de jusante, bacia de 4996 km²) o valor máximo

está no segundo dia. O pico do HU a montante é mais acentuado, pois a duração do escoamento de base na bacia de montante é menor (3 dias, contra 5 dias para a seção de jusante). Isto é coerente com o fato do HU ser adimensional, ou seja $\sum H_i = 1$.

O intervalo de tempo unitário adotado (igual ao dia) mostrou-se compatível com o tamanho das bacias, no que se refere ao tempo de resposta dos hidrogramas. O método pode, portanto, ser adotado em bacias deste porte, como nos casos em questão, nos quais o horizonte de tempo de previsão de vazões é superior ao dia, pois a inércia da bacia é superior ao dia. O problema consiste em se ter uma boa estimativa da precipitação média na bacia. Sabe-se que, quanto maior a área, maior a variabilidade espacial das precipitações. Portanto, quanto maior a área, maior o risco de erro na sua estimativa. Nos casos estudados, a estimativa de Thiessen foi a melhor possível, tendo-se em vista a disponibilidade regional de dados.

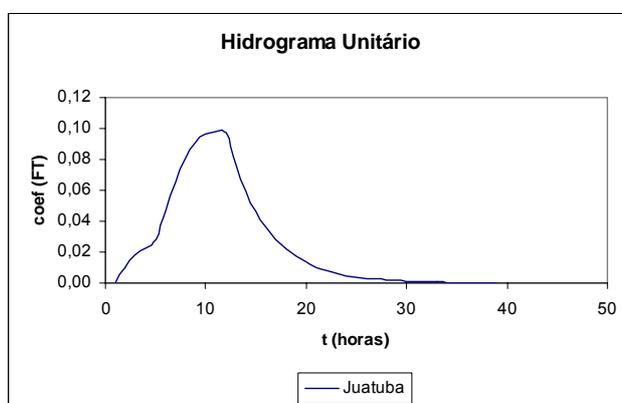


Figura 4 – Função de Transferência – método DPFT

A figura 4 apresenta o HU para a bacia de Juatuba (seção fluviométrica de Jardim). O intervalo de tempo unitário adotado foi o horário e também mostrou-se compatível com o tamanho da bacia (109 km^2) no que se refere ao tempo de resposta do hidrograma.

Precipitações efetivas

Obtidas as precipitações efetivas pelo método DPFT (P_e) e as ordenadas do Hidrograma Unitário (H_i), por meio da equação de convolução (equação 1), podem-se calcular as vazões na seção considerada. Dos 26 episódios selecionados para o estudo em Juatuba, apresentam-se dois (figura 5) para efeito de comparação (episódios números 20 e 26). Da mesma maneira, para a seção fluviométrica de Honório Bicalho, dos 19 episódios utilizados para calibração apresentam-se dois (figura 6, episódios números 10 e 14). Na figura 7, apresentam-se outros dois episódios dos 26 utilizados para calibração do modelo para a seção de Ponte Raul Soares, (episódios números 13 e 17) Versiani *et al.* (2005). Notam-se as precipitações observadas, as precipitações efetivas obtidas pelo método DPFT, e as vazões observadas e calculadas.

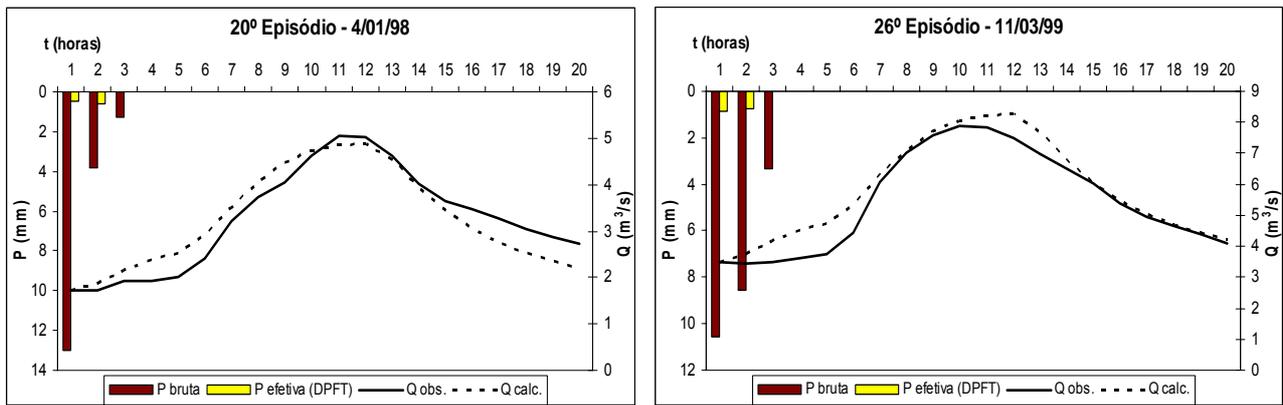


Figura 5 – Precipitações totais e efetivas calculadas pelo método DPFT; vazões observadas e calculadas - (Juatuba)

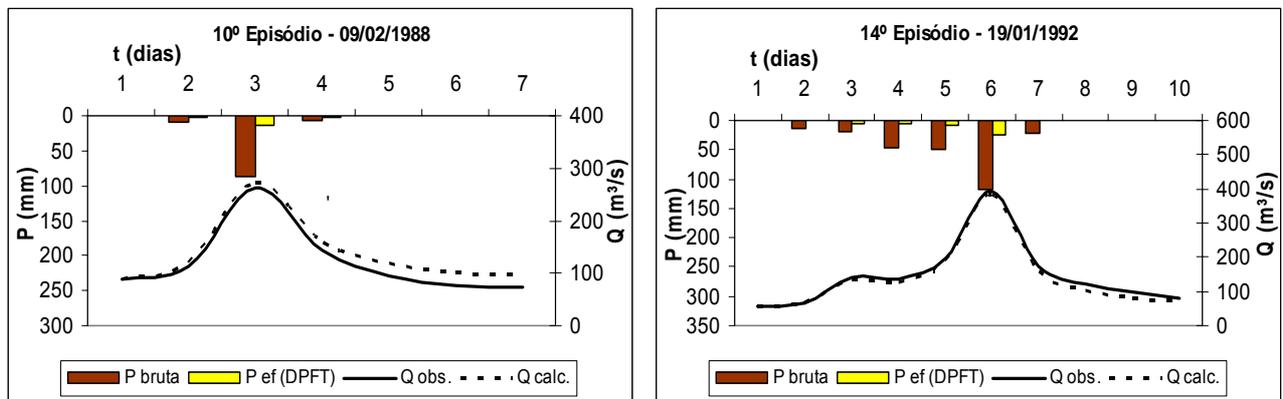


Figura 6 – Precipitações totais e efetivas calculadas pelo método DPFT; vazões observadas e calculadas - (Honório Bicalho)

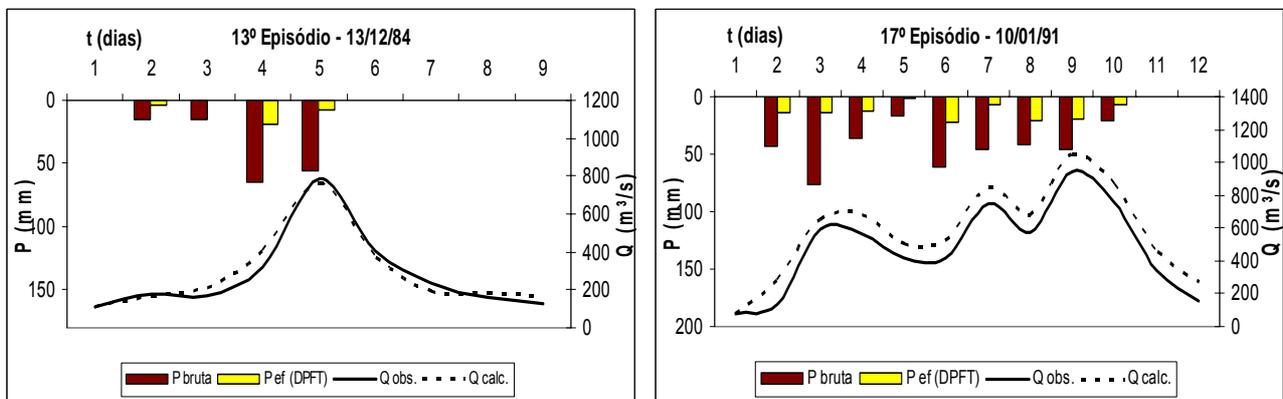


Figura 7 – Precipitações totais e efetivas calculadas pelo método DPFT; vazões observadas e calculadas - (Ponte Raul Soares) (Versiani *et al.* (2005))

Observa-se que as chuvas efetivas calculadas pelo método reconstituem bem as vazões observadas para bacias de diferentes dimensões. Usando como critério de validação o coeficiente de determinação R^2 , considerou-se o modelo satisfatório se R^2 fosse maior que 0,7. Dos 26 episódios de Juatuba, 18 tiveram as vazões reconstituídas com um coeficiente de determinação superior a 0,7. Para Honório Bicalho, 15 dos 19 episódios se encontraram nessa situação e em Ponte Raul Soares, 24 episódios dos 26 selecionados tiveram uma boa reconstituição da vazão observada.

Funções de Produção

Para os episódios chuva-vazão selecionados, foram calibrados os parâmetros das 3 funções de produção usadas neste trabalho. Nesta calibração foram empregados programas de minimização do erro quadrático médio entre precipitações efetivas calculadas pelo método DPFT e precipitações efetivas calculadas, respectivamente, pelos modelos do S.C.S. (equações 6 e 7), do modelo do índice- ϕ (equação 8) e do modelo de reservatório (equações 9 e 10), implementando-se códigos FORTRAN e MATLAB.

Ribeirão Serra Azul em Jardim (bacia hidrográfica de Juatuba)

Em Juatuba, para o modelo S.C.S. foi encontrado um valor médio do parâmetro CN igual a 69. Para o modelo do índice- ϕ , encontrou-se um valor de infiltração média " ϕ " igual a 12 mm/h. Para o modelo de reservatório foram encontrados os valores para os parâmetros: $\alpha = 0,44$, $\beta = 0,96$ e $D(0) = 617$ mm (valor médio). A figura 8 mostra, para os episódios números 20 (CN = 84) e 26 (CN = 78), as precipitações totais e efetivas calculadas pelo modelo S.C.S. e as respectivas vazões observadas e calculadas (pela equação 1). A figura 9 mostra, para estes mesmos episódios, as precipitações totais e efetivas calculadas pelo modelo do índice- ϕ (episódio 20, $\phi = 11,93$ mm e episódio 26, $\phi = 8,98$ mm) e as respectivas vazões observadas e calculadas (pela equação 1). A figura 10 mostra, também para os mesmos episódios, as precipitações totais e efetivas calculadas pelo modelo de reservatório (episódio 20: $\alpha = 0,44$, $\beta = 0,96$ e $D(0) = 711$ mm.; episódio 26: $\alpha = 0,44$, $\beta = 0,96$ e $D(0) = 106$ mm) e as respectivas vazões observadas e calculadas (pela equação 1).

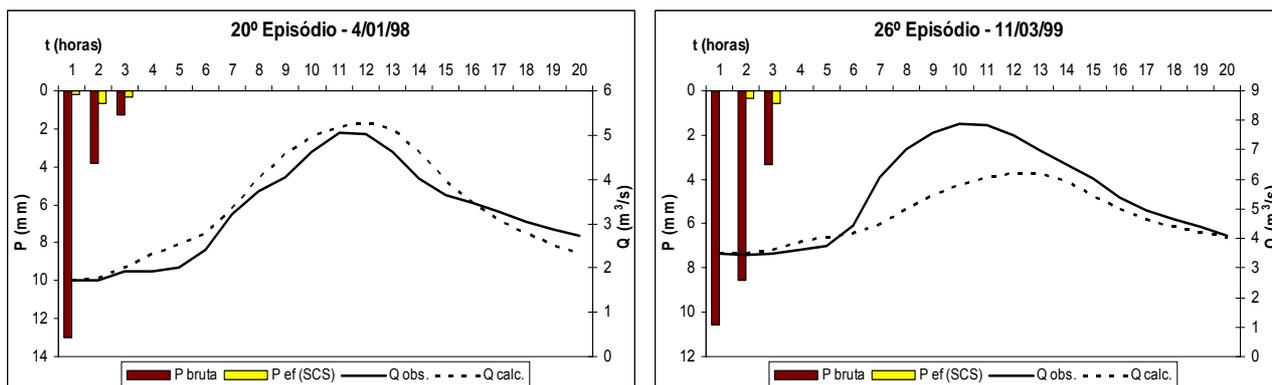


Figura 8 – Precipitações totais e efetivas calculadas pelo modelo S.C.S.; vazões observadas e calculadas - (Juatuba)

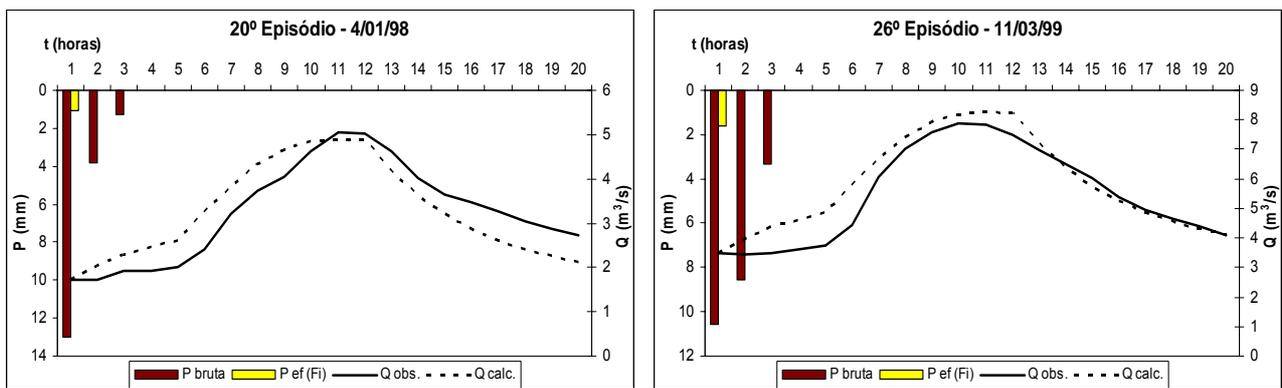


Figura 9 – Precipitações totais e efetivas calculadas pelo modelo do índice- ϕ ; vazões observadas e calculadas - (Juatuba)

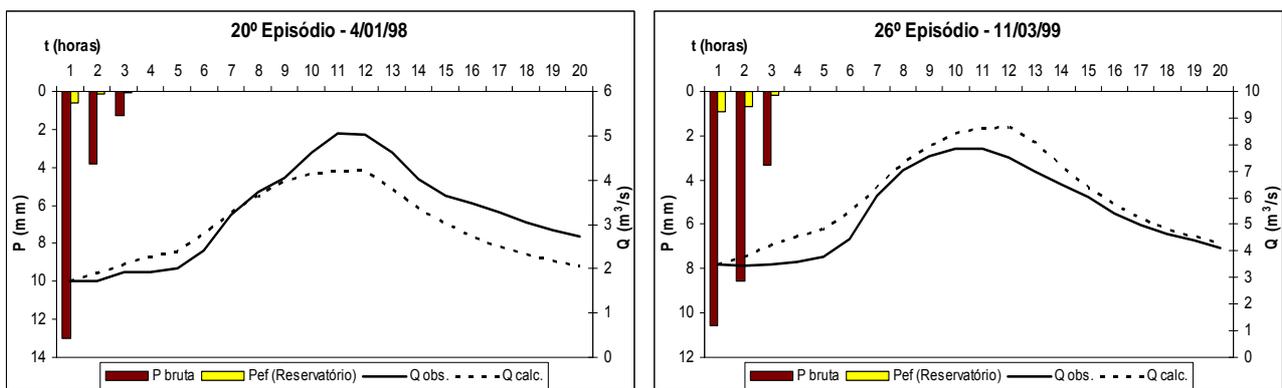


Figura 10 – Precipitações totais e efetivas calculadas pelo modelo de reservatório; vazões observadas e calculadas - (Juatuba)

Em Juatuba as vazões foram melhores reconstituídas pelo método do índice- ϕ . Usando o coeficiente de determinação R^2 como parâmetro de análise, 8 dos 26 episódios tiveram valores superiores a 0,7, ao passo que o modelo do S.C.S. apresentou 4 episódios que reconstituíram a vazão observada com valores superiores a 0,7 e o modelo de reservatório, 5. Nota-se o fato da área de drenagem ser bem menor do que as de Honório Bicalho e Ponte Raul Soares, possibilitando uma menor variação das características do solo e conseqüentemente um comportamento melhor face a utilização de um modelo de infiltração a taxa constante (índice- ϕ).

Rio das Velhas em Honório Bicalho (bacia hidrográfica do rio das Velhas)

Em Honório Bicalho, para o modelo S.C.S. foi encontrado um valor médio do parâmetro CN igual a 42. Para o modelo do índice- ϕ , encontrou-se um valor de infiltração média “ ϕ ” igual a 54 mm/dia. Para o modelo de reservatório foram encontrados os valores para os parâmetros: $\alpha = 0,91$, $\beta = 0,93$ e $D(0) = 444$ mm (valor médio). A figura 11 mostra, para os episódios números 10 (CN = 59) e 14 (CN = 30), as precipitações totais e efetivas calculadas pelo modelo S.C.S. e as respectivas vazões observadas e calculadas (pela equação 1). A figura 12 mostra, para estes mesmos episódios,

as precipitações totais e efetivas calculadas pelo modelo do índice- ϕ (episódio 10, $\phi = 67,80$ mm e episódio 14, $\phi = 73,46$ mm) e as respectivas vazões observadas e calculadas (pela equação 1). A figura 13 mostra, também para os mesmos episódios, as precipitações totais e efetivas calculadas pelo modelo de reservatório (episódio 10: $\alpha = 0,91$, $\beta = 0,93$ e $D(0) = 372$ mm.; episódio 14: $\alpha = 0,91$, $\beta = 0,93$ e $D(0) = 418$ mm) e as respectivas vazões observadas e calculadas (pela equação 1).

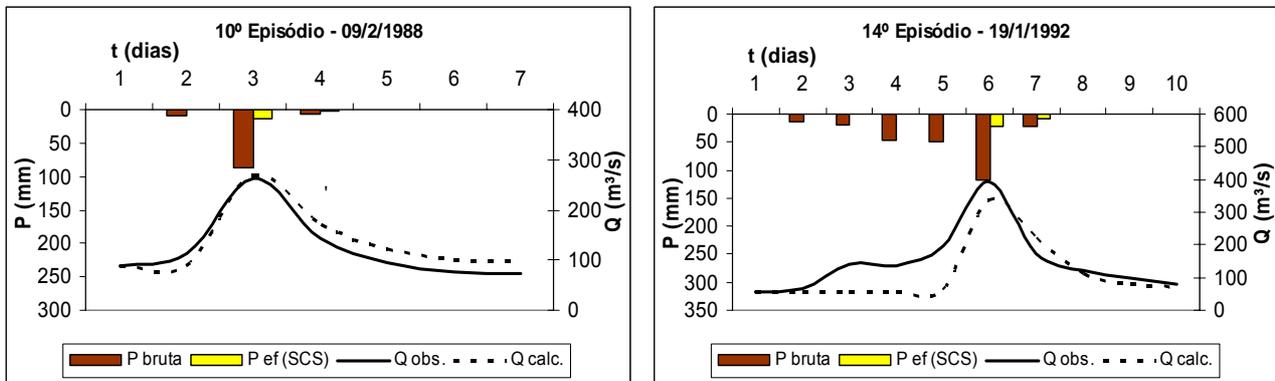


Figura 11 – Precipitações totais e efetivas calculadas pelo modelo S.C.S.; vazões observadas e calculadas - (Honório Bicalho)

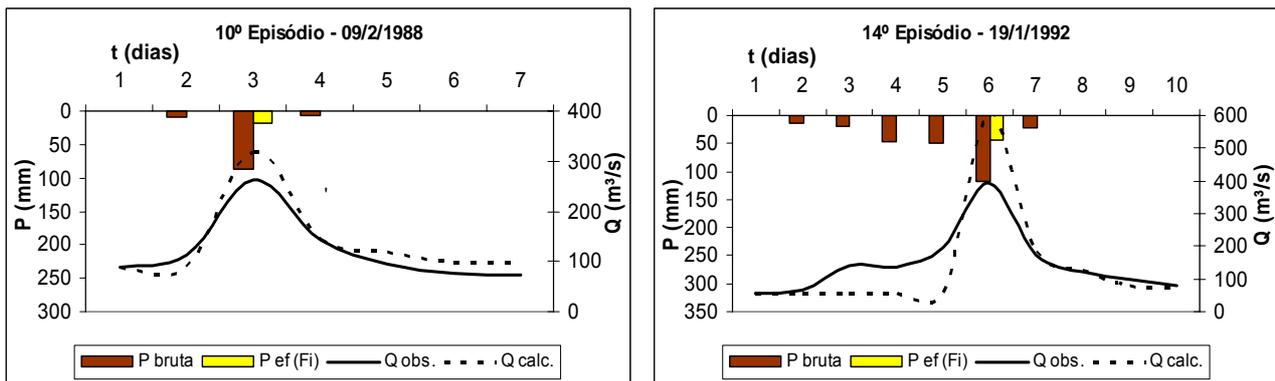


Figura 12 – Precipitações totais e efetivas calculadas pelo modelo do índice- ϕ ; vazões observadas e calculadas - (Honório Bicalho)

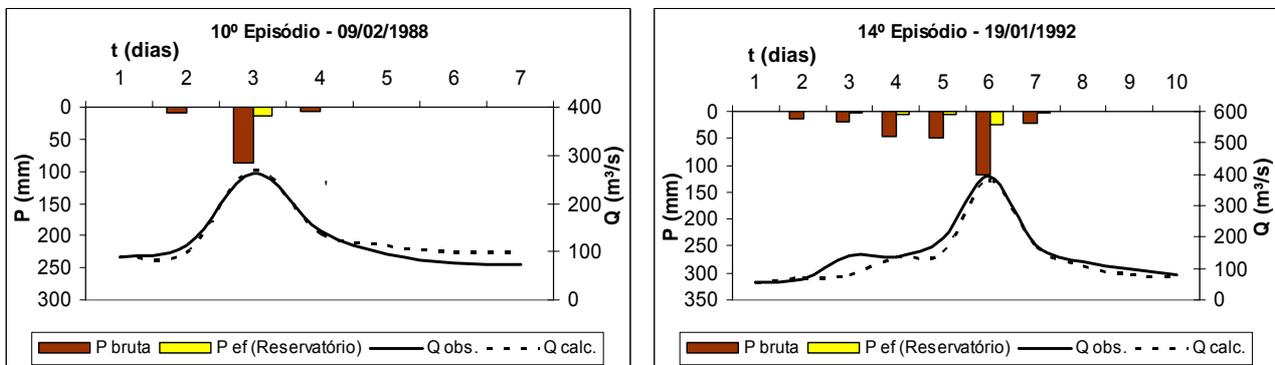


Figura 13 – Precipitações totais e efetivas calculadas pelo modelo de reservatório; vazões observadas e calculadas - (Honório Bicalho)

Por uma análise visual e utilizando o coeficiente de determinação R^2 (entre vazões calculadas e observadas), conclui-se que o modelo de reservatório é o que melhor reconstitui as vazões entre os modelos estudados para Honório Bicalho. No entanto, apenas 7 dos 19 episódios tiveram o valor maior que 0,7. O modelo do índice- ϕ apresentou 6 episódios com valor de R^2 maiores que 0,7 e o modelo do S.C.S. apresentou 5 dos 19 episódios com valores de R^2 maiores que 0,7.

Rio das Velhas em Ponte Raul Soares (bacia hidrográfica do rio das Velhas)

Em Ponte Raul Soares, para o modelo S.C.S. foi encontrado um valor médio do parâmetro CN igual a 50. Para o modelo do índice- ϕ , encontrou-se um valor de infiltração média “ ϕ ” igual a 34 mm/dia. Para o modelo de reservatório foram encontrados os valores para os parâmetros: $\alpha = 0,87$, $\beta = 0,92$ e $D(0) = 270$ mm (valor médio). A figura 14 mostra, para os episódios números 13 (CN = 46) e 17 (CN = 32), as precipitações totais e efetivas calculadas pelo modelo S.C.S. e as respectivas vazões observadas e calculadas (pela equação 1). A figura 15 mostra, para estes mesmos episódios, as precipitações totais e efetivas calculadas pelo modelo do índice- ϕ (episódio 13, $\phi = 44,68$ mm e episódio 17, $\phi = 33,24$ mm) e as respectivas vazões observadas e calculadas (pela equação 1). A figura 16 mostra, também para os mesmos episódios, as precipitações totais e efetivas calculadas pelo modelo de reservatório (episódio 13: $\alpha = 0,87$, $\beta = 0,92$ e $D(0) = 173$ mm.; episódio 17: $\alpha = 0,87$, $\beta = 0,92$ e $D(0) = 183$ mm) e as respectivas vazões observadas e calculadas (pela equação 1).

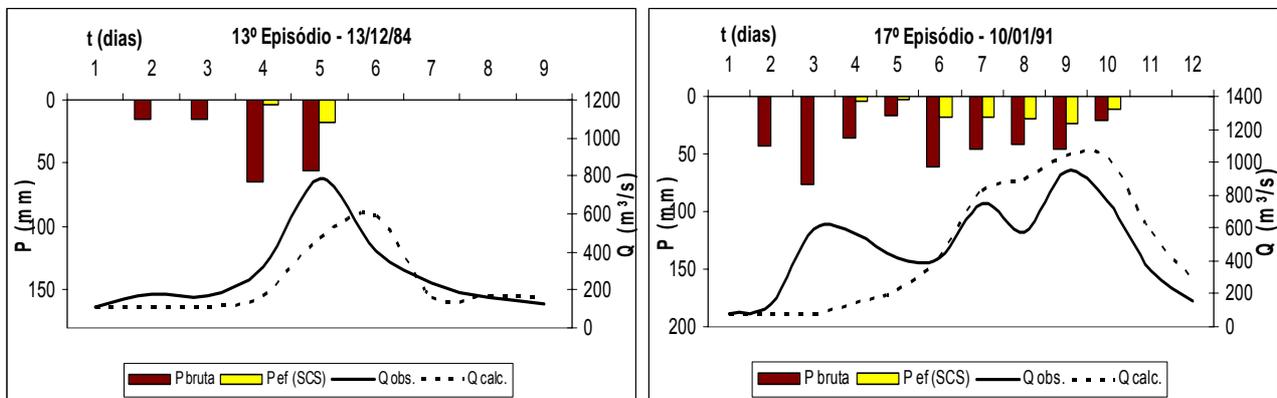


Figura 14 – Precipitações totais e efetivas calculadas pelo modelo S.C.S.; vazões observadas e calculadas, (Ponte Raul Soares) (Versiani *et al.* (2005))

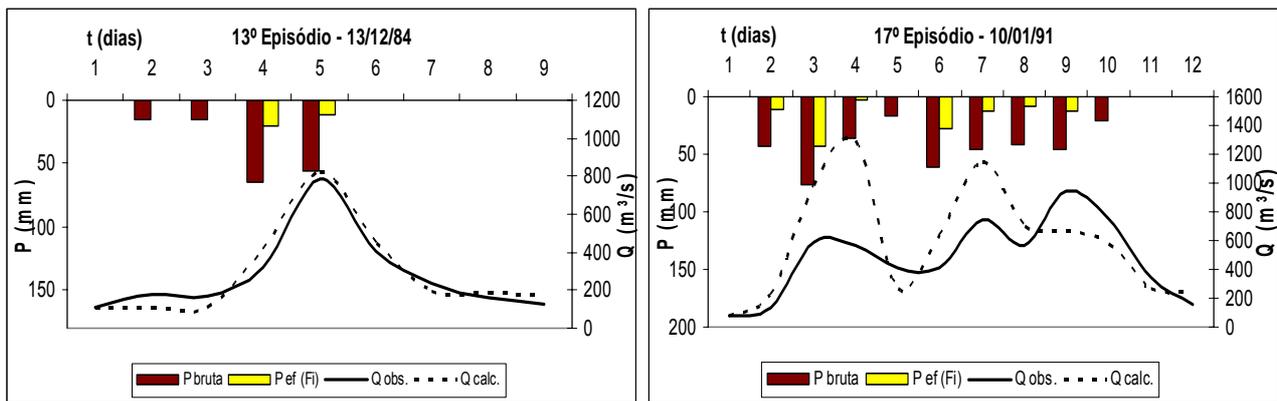


Figura 15 – Precipitações totais e efetivas calculadas pelo modelo do índice- ϕ ; vazões observadas e calculadas

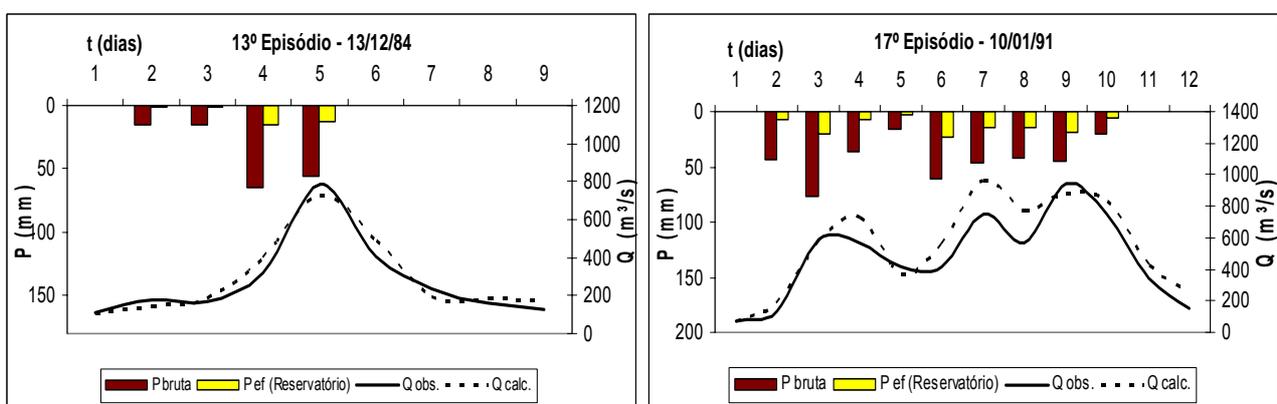


Figura 16 – Precipitações totais e efetivas calculadas pelo modelo de reservatório; vazões observadas e calculadas, (Ponte Raul Soares) (Versiani *et al.* (2005))

Comparando-se as figuras 14, 15 e 16, pode-se concluir que o modelo de reservatório, apesar de superestimar ligeiramente as vazões, é mais adequado que os modelos do S.C.S. e de índice- ϕ para Ponte Raul Soares. A análise utilizando-se o coeficiente de determinação confirma a inspeção visual, sendo o modelo de reservatório, o que melhor reconstituiu as vazões observadas. No entanto, mesmo sendo o melhor modelo, 13 dos 26 episódios tiveram o valor de R^2 menor que 0,7. Em relação aos outros dois modelos, há de se notar que, além da dificuldade de determinação das reais condições iniciais de saturação, evidentemente, torna-se muito difícil determinar-se, para uma bacia deste porte (aproximadamente 5000 km²) um valor de CN médio e também de um índice- ϕ médio, que servissem de comparação para os valores aqui encontrados, tendo-se em vista a alta diversidade de constituição e uso dos solos. A mesma consideração pode ser realizada para Honório Bicalho, (1655 km²).

Apresenta-se na tabela 1, o resumo dos resultados dos três modelos de função de produção estudados para as seções fluviométricas de Juatuba, Honório Bicalho e Ponte Raul Soares.

Tabela 1 – Resultado dos modelos de Função de Produção

JUATUBA		
	CN	Ø (mm/h)
E1	59,76	13,08
E2	65,46	21,15
E3	73,20	22,23
E4	71,95	8,35
E5	60,77	10,43
E6	61,35	19,68
E7	71,75	14,01
E8	89,12	8,34
E9	59,48	18,18
E10	90,39	5,15
E11	76,74	5,87
E12	81,15	5,13
E13	76,28	14,81
E14	47,48	10,89
E15	49,42	25,42
E16	83,28	5,25
E17	65,13	8,90
E18	74,05	14,20
E19	71,35	18,14
E20	83,83	11,93
E21	84,95	5,21
E22	71,95	17,46
E23	50,70	9,95
E24	50,00	8,96
E25	52,70	11,52
E26	78,40	8,98

HONÓRIO BICALHO		
	CN	Ø (mm/dia)
E1	33,25	70,09
E2	41,37	39,43
E3	47,57	25,71
E4	57,21	43,72
E5	24,10	47,64
E6	73,84	8,98
E7	42,05	22,38
E8	55,95	60,80
E9	36,08	52,80
E10	58,53	67,80
E11	25,05	47,62
E12	58,53	70,15
E13	33,69	66,03
E14	30,09	73,46
E15	43,49	30,70
E16	25,55	134,01
E17	40,71	123,76
E18	26,35	24,52
E19	52,48	25,36

PONTE RAUL SOARES		
	CN	Ø (mm/dia)
E1	62,87	13,81
E2	71,75	34,90
E3	40,06	52,61
E4	43,49	34,22
E5	41,37	21,35
E6	55,95	15,54
E7	28,73	31,37
E8	37,69	20,20
E9	49,42	29,13
E10	59,91	31,18
E11	54,74	21,94
E12	45,85	20,42
E13	45,85	44,68
E14	58,53	34,94
E15	44,25	33,44
E16	71,75	23,23
E17	32,40	33,24
E18	23,22	30,24
E19	66,15	38,87
E20	58,53	63,29
E21	41,37	53,59
E22	67,91	63,35
E23	48,47	49,22
E24	61,35	25,36
E25	55,95	15,25
E26	36,08	38,01

Reservatório	
Alfa =	0,44
Beta =	0,96
d0 médio (mm)=	617,00

Reservatório	
Alfa =	0,91
Beta =	0,93
d0 médio (mm)=	444,00

Reservatório	
Alfa =	0,87
Beta =	0,92
d0 médio (mm)=	270,00

Com relação a estação de Honório Bicalho, estudou-se a relação existente entre os parâmetros CN e D(0) com o somatório de 5 dias das chuvas anteriores aos episódios. A relação entre CN e Pb (somatório dos 5 dias das chuvas anteriores) está na figura 17. Apenas foram selecionados os episódios relativos aos “CN’s” que tiveram uma boa reconstituição de vazões (valor de R^2 superior a 0,7). A figura 18 mostra a relação entre CN e o déficit do reservatório D(0). Foram selecionados os episódios relativos aos “D(0)’s” que tiveram uma boa reconstituição de vazões. A figura 19 mostra a relação entre o déficit do reservatório D(0) com o somatório das chuvas anteriores de 5 dias ao início dos episódios, $P_{5\text{dias}}$ (valor indicativo do estado inicial de umidade da bacia). Foram usados todos os valores de D(0) para esta análise.

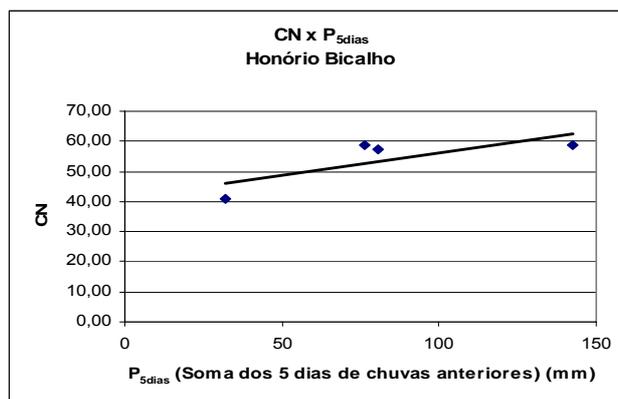


Figura 17 – Relação entre os parâmetros CN com $P_{5\text{dias}}$ (somatório das chuvas anteriores de 5 dias aos episódios)

Observou-se uma tendência entre os maiores valores de CN (característica de terrenos com maior capacidade de produzir escoamento superficial) com os maiores valores de umidade antecedente, o que confirma a hipótese de que terrenos mais úmidos, podem produzir maiores escoamentos superficiais.

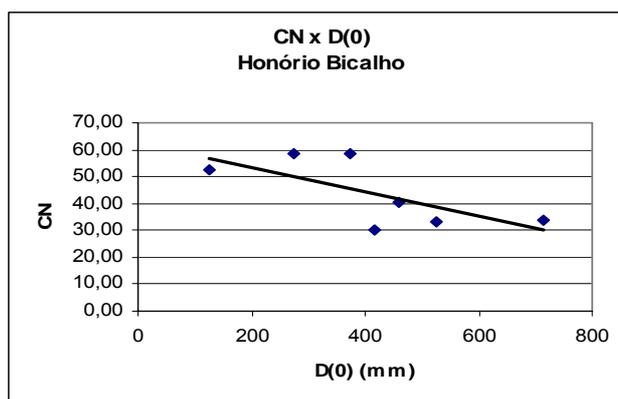


Figura 18 – Relação entre os parâmetros CN e o déficit do reservatório ($D(0)$)

Verificou-se (gráfico CN x $D(0)$, figura 18), que elevados valores de CN (maior capacidade de produzir escoamento superficial) tendem a se corresponder com baixos teores de déficit de umidade, o que comprova a hipótese de que terrenos mais úmidos (déficit de umidade baixo) produzem escoamento superficial com mais facilidade e terrenos mais secos (déficit de umidade alto) são característicos de solos que tendem a produzir escoamento superficial com maior facilidade.

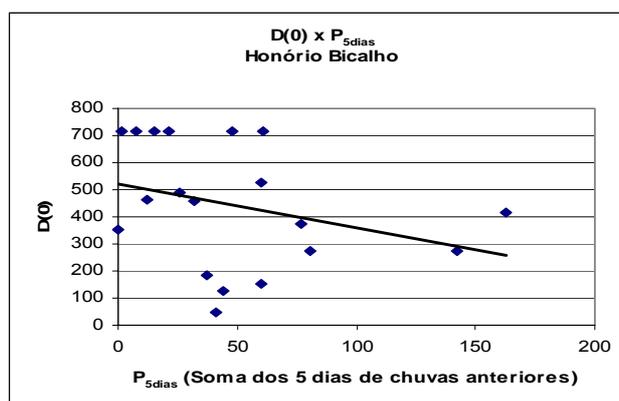


Figura 19 – Relação entre o déficit do reservatório ($D(0)$) com o somatório de 5 dias das chuvas anteriores aos episódios.

De acordo com a figura 19, observou-se uma ligeira tendência de decréscimo entre o déficit do reservatório $D(0)$ com o aumento de $P_{5\text{dias}}$ (somatório das chuvas de 5 dias anteriores), ou seja, um maior déficit de umidade corresponde à situação onde o solo apresenta pouca contribuição das chuvas nos 5 dias anteriores ao passo que quando a chuva dos 5 dias anteriores ao episódio torna-se mais significativa, o déficit do reservatório encontra-se menor, conforme esperado.

CONCLUSÃO

É importante salientar, que este trabalho mostra apenas alguns resultados preliminares, que devem ser melhorados e confirmados. Contudo, algumas observações marcantes devem ser realçadas. As Funções de Transferência (Hidrogramas Unitários) encontradas são, evidentemente, uma FT média para a bacia, referente a eventos de chuva-vazão mais significativos. Se alguns eventos de precipitação apresentarem distribuição espacial muito irregular, as precipitações efetivas estimadas podem não ser realistas e a calibração de modelos de Função de Produção não procedem. No entanto, observamos que os Hidrogramas Unitários identificados pela metodologia DPFT reconstituem muito bem as vazões produzidas pelas chuvas efetivas para as diferentes áreas de drenagem.

Fazendo-se a distinção entre tamanhos de áreas de drenagem para as estações fluviométricas estudadas, nota-se que para a área de drenagem menor (Juatuba, 109 km²), o modelo de transformação chuva-vazão conhecido como índice- ϕ , reconstitui melhor as vazões que os outros dois modelos (S.C.S. e reservatório). Em contrapartida, analisando uma área de drenagem média ou grande (Honório Bicalho, 1655 km² e Ponte Raul Soares, 4996 km²) o modelo de reservatório se mostrou como o melhor para reconstituir as vazões. No entanto, salienta-se que comparando-se as vazões observadas e calculadas pelo parâmetro R^2 , apenas parte dos episódios estudados apresentaram um bom ajuste (coeficiente de determinação R^2 maior que 0,7). Portanto, sugere-se a continuidade dos estudos com poucos parâmetros a calibrar, aprofundando-se na aplicação de

outros modelos de Função de Produção simples, que venham a melhor reconstituir as vazões observadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da CAPES e CNPq, referente à concessão de bolsas de pesquisa e de Iniciação Científica vinculadas a este projeto.

BIBLIOGRAFIA

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R. e MAYS, L.W. (1994). *Hidrologia Aplicada*. McGraw-Hill Interamericana. Santafé de Bogotá, Colômbia. 584p.

DUBAND, D.; OBLED, C. e RODRÍGUEZ, J.Y. (1993). “*Unit hydrograph revisited: an alternative approach to UH and effective precipitation identification*”. *Journal of Hydrology*, 150, 115-149.

LORENT, B. (1975). *Tests of different river flow predictors, in G.C. Vansteenkiste (ed.). Modeling and Simulation of Water Resources Systems*, North-Holland, Amsterdam.

MAIA, A.L.; AMARAL, I.R. e VERSIANI, B.R. (2006). “*Metodologia DPFT de identificação do Hidrograma Unitário e das Precipitações Efetivas: Estudo de caso para a bacia hidrográfica de Juatuba – MG*”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* (no prelo).

TUCCI, C.E.M. (1993). *Hidrologia, Ciência e Aplicação*. Coleção ABRH, v. IV, 943 p.

VERSIANI, B.R.; SOUZA, E.G; CUNHA, B.T.A e FURTADO, E.C. (2005). “*Identificação do Hidrograma Unitário e das Precipitações Efetivas: aplicação do método DPFT à região do alto rio das Velhas – MG*” in XVI simposio brasileiro de recursos hídricos, João Pessoa, Nov. 2005.