

MODELO PARAMÉTRICO PARA EXTENSÃO DE DEFLÚVIOS MENSAIS

JOSÉ MARCELO DE ALMEIDA LIMA

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA (M.Sc.)

Aprovada por:

Rui Carlos Vieira de Azevedo

Presidente

Osvaldo Tapstetter

Pedro Guerra

Amando Ribeiro de Araújo

RIO DE JANEIRO
ESTADO DA GUANABARA - BRASIL
JUNHO DE 1974

À Vera Nice
Marcelo e André

A G R A D E C I M E N T O S

À COPPE nas pessoas do seu Diretor Prof. Sydney M. G. dos Santos; do Prof. Luiz Lobo B. Carneiro, Coordenador do Programa de Engenharia Civil; do Prof. Rui Carlos Vieira da Silva, responsável pelo Setor de Hidráulica.

Ao Prof. Pedro Guerrero pelas contribuições dadas no desenvolvimento teórico e exame crítico a que submeteu o manuscrito.

Ao Engenheiro Otto Pfafstetter pela segura e eficiente orientação dada no desenvolvimento da tese.

À ELETROBRÁS na pessoa do Engenheiro Armando Ribeiro de Araujo, Chefe do Departamento de Coordenação de Sistemas pelo apoio e estímulo prestado, assim como ao pessoal do Setor Administrativo pela colaboração na execução deste trabalho.

Finalmente, um destaque especial a meus pais Antônio e Nilma pelo carinho com que sempre acompanharam meus estudos.

R E S U M O

É apresentado um modelo paramétrico para extensão de séries curtas de vazões mensais utilizando dados mensais de precipitação de um conjunto de postos dentro da bacia com séries longas de registros.

Um programa em computador é desenvolvido consistindo basicamente de duas etapas: a primeira para auto-otimização dos parâmetros do modelo e a segunda para extensão de dados.

Testes de sensibilidades dos parâmetros foram realizados para análise do comportamento destes quando mal avaliados para início do processo de auto-otimização.

O modelo foi aplicado para a Bacia do Alto Tietê em Pirapora no estado de São Paulo, com 5815 km² de área de drenagem.

A B S T R A C T

A parametric model for extension of short-term monthly streamflow data using monthly precipitation data of a set of stations inside the basin with longer record is presented.

The model oriented to digital computation consists of two parts: one for self-optimization of the parameters, and another for extension of the records.

Parameter sensitivity tests were carried on in order to check their final variation when poorly evaluated in the start of the self-optimization process.

The model was applied to the Alto Tietê basin in Pirapora, São Paulo state, with a drainage area of 5815 km².

Í N D I C E

CAPÍTULO I	- INTRODUÇÃO	
1.1	- Generalidades	1.
1.2	- Revisão Bibliográfica	1.
1.3	- Objetivos	6.
CAPÍTULO II	- ANÁLISE HIDROLÓGICA DO MODELO	
2.1	- Introdução ao Modelo	8.
2.2	- Balanço Hídrico da Camada Superior do <u>S</u> o <u>l</u> o	8.
2.3	- Balanço Hídrico da Camada Inferior do <u>S</u> o <u>l</u> o	14.
2.4	- Contribuição do Lençol Subterrâneo	19.
2.5	- Descarga Total	22.
CAPÍTULO III	- ANÁLISE DO PROGRAMA	
3.1	- Introdução	24.
3.2	- Dados de Entrada	24.
3.3	- Valores Iniciais para os Parâmetros C(J)	28.
3.4	- Critério de Otimização dos Parâmetros ..	37.
3.5	- Atribuições de Cada Trecho do Programa .	38.
3.6	- Dados de Saída e Verificações	41.
CAPÍTULO IV	- APLICAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	
4.1	- Local Escolhido para Aplicação e suas <u>ca</u> <u>r</u> acterísticas	47.
4.2	- Escolha dos Parâmetros Iniciais	51.
4.3	- Análise de Sensibilidade dos Parâmetros.	53.

4.4 - Análise dos Resultados de Extensão	66.
4.5 - Análise Comparativa com o Modelo Original	75.
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	82.
BIBLIOGRAFIA	84.
ANEXO COM LISTAGEM DO PROGRAMA	86.

I - INTRODUÇÃO

1.1 - GENERALIDADES

Em estudos de regularização de cursos d'água por meio de reservatórios de acumulação, geralmente é suficiente o conhecimento de vazões mensais. Entretanto, muitas vezes os dados disponíveis são em períodos relativamente curtos para permitir conclusões satisfatórias destes estudos. Convém então extendê-los para períodos maiores, através de correlações com postos vizinhos cujo período de observações seja maior ou procurar desenvolver um modelo matemático de correlação chuva-vazão, de vez que normalmente os dados de chuva são disponíveis para períodos mais extensos do que os dados de vazões.

Os modelos matemáticos de extensão de dados, apresentam a vantagem de poderem ser utilizados com outras finalidades. Assim, se considerarmos a aleatoriedade e independência da componente estocástica das chuvas mensais, é possível gerar séries sintéticas de vazões a partir da aplicação do modelo para séries sintéticas de chuvas ou fazer previsão de vazões através da previsão de chuvas com determinados graus de probabilidades de ocorrência, sempre e quando as outras grandezas hidrológicas sejam menos importantes.

1.2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o objetivo de extensão de séries históricas de vazões, os trabalhos que se apresentam na literatura podem ser classificados em dois grupos: os modelos que utilizam equações de regressão, e os modelos paramétricos que de certa forma procuram a-

companhar a evolução do ciclo hidrológico.

No primeiro grupo estão caracterizados os modelos que estabelecem relações entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes. Assim por exemplo, poderíamos estabelecer uma equação de regressão entre a vazão num mês i com a chuva no mês i e a vazão no mês i menos 1. Assim teríamos neste caso: $Q_i = A P_i + B Q_{i-1}$.

Os modelos que utilizam equações de regressão têm sido exaustivamente utilizados em hidrologia, não só como ferramenta para extensão de dados como também para previsão de vazões. Uma das aplicações deste tipo de modelo foi o estabelecimento de relações entre precipitações e vazões anuais, sazonais ou mesmo mensais.

O uso da equação de regressão linear relacionando volumes de chuvas e vazões têm sido apresentados em vários artigos técnicos e inclusive em alguns livros de hidrologia tais como : Johnstone e Cross [7], Linsley et al. [8] e Wilson [9].

Langbein [4] apresenta três métodos para extensão de dados: extensão de vazões utilizando correlação com postos vizinhos, extensão por correlação de vazões com chuvas em sua bacia de drenagem e extensão de dados de vazão em uma bacia A pelo uso combinado de precipitação e vazão nas bacias A e B vizinhas. No primeiro método Langbein conclui que apesar dos resultados obtidos através de simples correlações serem satisfatórios, é proveitoso e frequentemente essencial para melhorar a correlação, a introdução de outras variáveis, tais como as vazões de um terceiro rio, prefe

riavelmente do lado oposto ao que possui série longa de registro de vazões, ainda que a série de vazões a serem correlacionadas seja por um período curto, ou a utilização de dados de precipitação nas duas bacias de forma a utilizar-se esta informação na curva de correlação entre as vazões nos dois postos, pela determinação de uma família de curvas para cada razão entre as precipitações nas duas bacias.

No segundo método Langbein considera que a vazão em um dado período de tempo como por exemplo um mês ou um ano é função da precipitação, neste período e no antecedente. No caso da correlação ser com chuvas mensais, um ajustamento nos dados se faz necessário, tendo em vista que a chuva caída nos últimos dias do mês contribui muito pouco para a vazão neste mês.

No terceiro método Langbein considera que onde os dados são disponíveis, a correlação entre a vazão de um curso d'água e a de um outro pode ser melhorada se as precipitações verificadas em cada bacia são empregadas como variáveis independentes em uma correlação múltipla.

Diskin [5] desenvolve um modelo conceitual utilizando a regressão linear e composto de três elementos, que recebe precipitação como entrada e fornece escoamento superficial e perdas como saída. O modelo não é aplicado onde os efeitos de retardo entre chuva e escoamento superficial são apreciáveis, assim como nos casos onde grande parte da vazão é devido à alimentação do lençol subterrâneo de bacias adjacentes.

A melhor aplicação do modelo de regressão linear de

Diskin se considera para relações anuais entre chuvas e vazões em bacias onde se caracterizam duas ou mais estações bem definidas. . Nestas bacias as condições de armazenamento no início da estação chuvosa são bastante semelhantes em cada ano.

Matalas e Jacobs [3] desenvolvem um modelo estatístico para extensão de dados hidrológicos. Uma regressão linear para duas sequências uma curta e outra longa de eventos hidrológicos é então utilizada para extensão da sequência curta. A série exten da será portanto constituída dos valores observados, dos valores obtidos através da reta de regressão acrescidos de um efeito aleatório o qual é considerado no modelo como uma variável aleatória com média zero e variância proporcional à variância da sequência curta em torno da reta de regressão. Ainda neste trabalho os auto res mostram que os estimadores da média e variância são não tenden ciosos.

Bonné [2] desenvolve um modelo para simulação de va zões mensais por múltipla regressão incluindo precipitações e va zões, utilizando-se de um modelo markoviano de regressão. As variá veis na função de regressão representam a vazão do mês antecedente, precipitação no mês atual e antecedente e precipitação acumuladas.

Três bacias com características fisiográficas diferentes foram testadas por Bonné. Vazões foram simuladas para cada bacia e os resultados comparados com a série histórica em têr mos de parâmetros estatísticos e distribuição de frequência. Os resul tados foram também comparados com aqueles obtidos por um modelo de regressão simples utilizando somente dados de vazões. De uma for ma geral os resultados mostraram-se bons quando comparados com a

série histórica, especialmente em termos da média, desvio padrão e distribuição de frequência. Resultados piores entretanto, foram obtidos para o coeficiente de assimetria e correlação da série, todavia na maioria dos casos, melhorias sensíveis foram observadas em relação a um modelo de regressão simples.

O segundo grupo de modelos apresentados na literatura se caracteriza pelo tratamento hidrológico dado ao problema. São portanto os modelos que procuram acompanhar a evolução do ciclo hidrológico, definindo para cada etapa do mesmo, equações representativas do processo e procurando interligar as grandezas intervenientes em cada uma destas etapas.

Neste grupo incluímos o trabalho de Diskin, Buras e Zamir [6], que desenvolveram um modelo de simulação para determinação da melhor política de operação de um pequeno reservatório no planalto de Dalton em Israel, baseado em um modelo hidrológico simples desenvolvido para relações chuva-vazão. O modelo é representado por um único elemento, descrito por um parâmetro e tendo somente uma variável de estado. O modelo embora simples deu uma representação adequada da bacia para o problema particular para o qual ele foi usado.

Basicamente o modelo faz um balanço hidrológico na bacia entre chuva, evaporação e umidade do solo no início do período, obtendo a umidade do solo ao final do mesmo a qual é comparada com o seu valor máximo. Se houver excesso de umidade, este valor se transforma em escoamento superficial e a umidade do solo se mantém em seu valor máximo, caso contrário não há escoamento superficial e a umidade do solo sofre variação correspondente ao balanço hídrico.

No Brasil, Pfafstetter [1] desenvolveu um modelo paramétrico para extensão de dados de vazões. O modelo procura reproduzir do modo mais fiel possível as vazões mensais de um rio, partindo de dados mensais de precipitações ocorridos em sua bacia de drenagem e dos dados de evaporação média da região. Assim, utilizando-se de dez parâmetros, o autor estabelece relações empíricas para caracterização de cada fase de ciclo hidrológico.

Bons resultados foram obtidos por Pfafstetter com a aplicação do modelo nas bacias contribuintes da Lagoa Mirim na República do Uruguai. Segundo o autor, é possível que, com pequenos ajustamentos das expressões empíricas usadas se possa aplicar o modelo para outras regiões com condições climáticas, topográficas, geológicas e de cobertura vegetal diferentes.

1.3 - OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é o aprimoramento do modelo paramétrico de Pfafstetter [1], reformulando não só as expressões empíricas que nele aparecem, como também alguns conceitos fixados pelo autor no desenvolvimento do modelo.

Assim, no Capítulo II será feita uma análise do modelo reformulado sob o ponto de vista hidrológico, mostrando em cada fase do ciclo hidrológico a correspondente expressão utilizada no modelo. No Capítulo III serão discutidos aspectos computacionais, fazendo desta feita uma análise do programa, dando-se ênfase aos dados de entrada e saída, assim como à avaliação dos parâmetros a serem fornecidos ao programa. No Capítulo IV será apresentado um caso de aplicação do modelo aproveitando-se para a realiza

ção de testes de sensibilidade dos parâmetros. A análise dos resultados de extensão e a comparação do modelo modificado com o original serão ainda pontos de destaque neste capítulo. Finalmente no Capítulo V serão apresentadas as conclusões dos estudos e as recomendações julgadas necessárias à continuidade do trabalho.

II - ANÁLISE HIDROLÓGICA DO MODELO

2.1 - INTRODUÇÃO AO MODELO

Como todo modelo paramétrico utilizado em hidrologia para simulação de vazões, o aqui apresentado também procura acompanhar a cada etapa a evolução do ciclo hidrológico. Sendo um modelo que utiliza dados mensais, evidentemente algumas simplificações tiveram que ser assumidas de forma a compatibilizar a complexidade do modelo com o tipo de dados de entrada e saída, isto é, a conceituação hidrológica do modelo foi estruturada levando-se em consideração a utilização de dados mensais.

Desta forma procuraremos a seguir descrever o ciclo hidrológico, dando a cada passo a correspondente operação realizada pelo modelo.

2.2 - BALANÇO HÍDRICO DA CAMADA SUPERIOR DO SOLO

Da chuva mensal caída sobre uma bacia, o modelo considera que uma parte cai sobre camada permeável, escoando superficialmente indo alimentar diretamente os cursos d'água, lagos, etc, uma outra parte infiltra e finalmente uma terceira parte cai diretamente sobre camada impermeável ou cursos d'água, lagos, etc, sendo portanto integralmente aproveitada.

A parte da chuva mensal que infiltra, alimenta uma camada superior do solo cujo volume de armazenamento ou umidade, como será tratado neste trabalho, no final do mês é função de seu valor no início do mês, de uma parte perdida por evaporação da camada superior do solo, de uma parte que infiltra para uma camada infe

rior do solo e finalmente da diferença entre a chuva total caída sobre a bacia no mês em questão e a parte desta transformada em escoamento superficial direto.

A obtenção da umidade da camada superior do solo no modelo é feita através de um simples balanço hídrico das parcelas anteriormente enumeradas.

Assim:

$$HSB = HSA + (P - S) - ES - FS \quad (1)$$

onde:

HSB - umidade da camada superior do solo no final do mês, expressa em mm .

HSA - umidade da camada superior do solo no início do mês, expressa em mm .

P - chuva média mensal na bacia expressa em mm/mês.

S - escoamento superficial direto expresso em mm/mês.

ES - perdas por evapotranspiração na camada superior do solo, expressa em mm/mês.

FS - perdas por infiltração da camada superior para a camada inferior do solo, expressa em mm/mês.

Neste trabalho usaremos indistintamente as palavras infiltração e percolação.

Esquemáticamente teríamos:

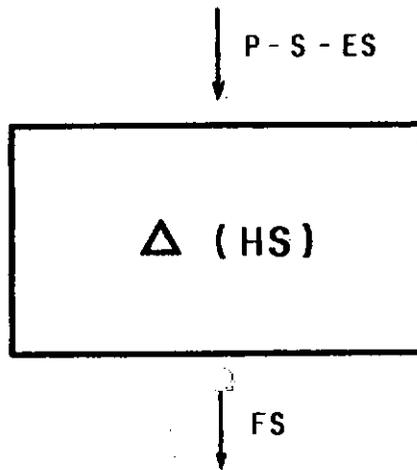


FIGURA 1

2.2.1 - Escoamento Superficial Direto

A expressão correspondente do modelo, que determina a parte da chuva que contribui diretamente para a formação de vazão, ou seja que determina o escoamento superficial direto, é uma função do percentual de área impermeável da bacia, da chuva caída no mês e da umidade da camada superior do solo [10].

$$S = C(1) \cdot P + (1 - C(1)) \frac{P^{C(2)}}{P^{(C(2)-1)} + \left[\frac{C(3)}{HS} \right]^{C(4)}} \quad (2)$$

onde:

S - escoamento superficial direto expresso em mm/mês

P - chuva média mensal na bacia expressa em mm/mês

HS - Umidade média mensal da camada superior do solo expressa em mm .

C(1), C(2), C(3) e C(4) - parâmetros da expressão:

Observa-se na prática que valores elevados de umidade da camada superior do solo tendem a reduzir o processo de infiltração e conseqüentemente aumentar a parcela de escoamento superficial direto. Esta afirmação pode ser verificada no modelo fazendo-se HS crescer indefinidamente, o que corresponderá na expressão (2) a S assumir praticamente o valor de P .

Se por outro lado a umidade da camada superior do solo apresentar valores baixos, observa-se na prática uma tendência de absorção de água pelo solo através do aumento da infiltração e conseqüentemente redução da parcela de escoamento superficial direto. Isso pode ser constatado também no modelo fazendo-se HS assumir valores cada vez menores na expressão (2) e observando-se que neste caso o escoamento superficial direto calculado pelo modelo se tornará cada vez mais próximo de C(1) . P .

2.2.2 - Perdas por Evapotranspiração

Sabe-se que as perdas de água por evapotranspiração na camada superior do solo é uma função das condições atmosféricas tais como insolação, vento, umidade absoluta do ar, etc, do tipo de cobertura vegetal do solo e da quantidade d'água disponível, ou em outras palavras da umidade da camada superior do solo.

Desta forma a determinação das perdas por evapotranspiração da camada superior do solo é obtida no modelo em fun-

ção da evapotranspiração potencial e da umidade do solo superior. Assim, se a umidade do solo possuir valores elevados as perdas por evapotranspiração assumirão valores constantes proporcionais em cada mês à evapotranspiração potencial média daquele mês, se por outro lado a umidade do solo possuir valores reduzidos, as perdas por evapotranspiração assumirão valores admitidos no modelo como proporcionais à umidade do solo neste mês.

A expressão utilizada pelo modelo para cálculo da evapotranspiração quando a umidade da camada superior do solo apresenta valores reduzidos é:

$$ES = C(5) \cdot HS \quad (3)$$

E para valores elevados de HS é :

$$ES = C(6) \cdot EP(k) \quad (4)$$

onde C(5) e C(6) são parâmetros das expressões
A representação gráfica das expressões acima é:

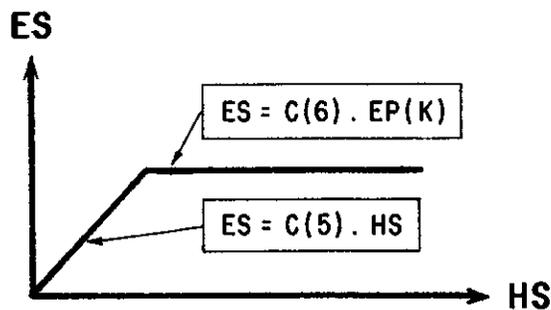


FIGURA 2

2.2.3 - Perdas por Infiltração

Para completar o balanço hídrico da camada superior do solo resta a análise do comportamento da parcela de água que in filtra da camada superior do solo para a inferior. Admite-se que esta parcela seja função da umidade e do tipo de material de que é constituído o solo.

Se a umidade possui valor elevado, a parcela que in filtra de uma camada para outra fica limitada pela natureza do material de que é constituído o solo. Se por outro lado a umidade possui valor reduzido, então neste caso não existe limitação do solo e portanto a parcela de infiltração é função apenas da umidade da camada superior do solo.

A expressão do modelo que traduz esta etapa do ciclo hidrológico é a seguinte:

$$FS = \frac{C(9) \cdot HS^2}{C(10)^2 + HS^2} \quad (5)$$

Se fizermos nesta expressão HS crescer indefinidamente, observa-se que FS tende para o valor C(9) que representa portanto o valor máximo que pode assumir a parcela FS de infiltração. Se substituirmos agora nesta expressão FS por C(9)/2 verificamos que C(10) será igual a HS, o que equivale a dizer que C(10) é o valor da umidade HS quando FS assume a metade de seu valor máximo.

A representação gráfica da expressão (5) é a seguinte:

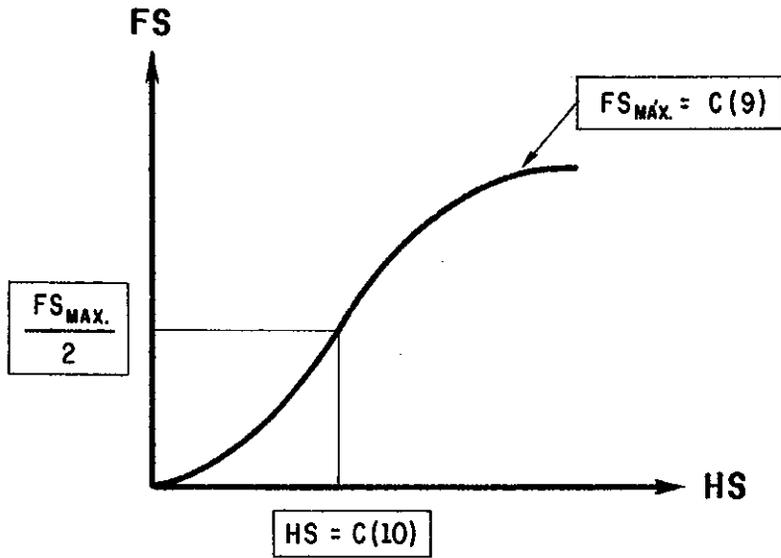


FIGURA 3

2.3 - BALANÇO HÍDRICO DA CAMADA INFERIOR DO SOLO

A parcela de água que deixa a camada superior do solo através da infiltração de uma camada para outra alimenta uma parte mais profunda do solo a qual reabastece o lençol subterrâneo e fornece água necessária ao desenvolvimento dos vegetais de raízes profundas. Desta forma a umidade do solo inferior é função da umidade no início do mês, da parcela que infiltrou da camada superior para a inferior, da que infiltrou da camada inferior para o lençol freático e da parcela consumida pelos vegetais de raízes profundas.

Analogamente à obtenção da umidade do solo superior, aqui também se procura fazer um balanço hídrico das parcelas acima enumeradas.

Teremos então:

$$HIB = HIA + (FS - EI) - FI \quad (6)$$

onde:

HIB - umidade da camada inferior do solo no final do mês, expressa em mm .

HIA - umidade da camada inferior do solo no início do mês, expressa em mm .

FS - perdas por infiltração da camada superior para a camada inferior do solo, expressa em mm/mês .

EI - perdas por evapotranspiração na camada inferior do solo, expressa em mm/mês..

FI - perdas por infiltração da camada inferior do solo para o lençol subterrâneo, expressa em mm/mês

Esquemáticamente teríamos:

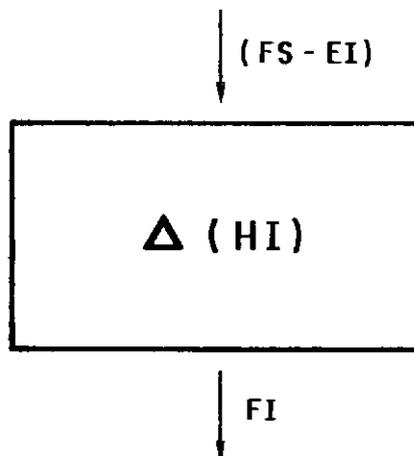


FIGURA 4

2.3.1 - Perdas por Evapotranspiração

A perda de água do solo por evapotranspiração dos vegetais de raízes profundas é função apenas do tipo de cobertura vegetal da bacia. Desta forma, assim como fizemos para a camada superior, podemos admitir que se a umidade do solo inferior for suficientemente alta em um determinado mês, então a perda de água por evapotranspiração será considerada pelo modelo como proporcional à evapotranspiração potencial do mês considerado. Se por outro lado a umidade do solo inferior possuir valores baixos então as perdas de água por evapotranspiração das raízes profundas serão consideradas pelo modelo como proporcionais ao valor da umidade do solo no mês considerado.

A expressão utilizada pelo modelo para cálculo da evapotranspiração quando a umidade da camada inferior do solo apresenta valores baixos é:

$$EI = C(7) \cdot HI \quad (7)$$

E para valores elevados de HI é:

$$EI = C(8) \cdot EP(k) \quad (8)$$

onde C(7) e C(8) são parâmetros das expressões

A representação gráfica das expressões acima é:

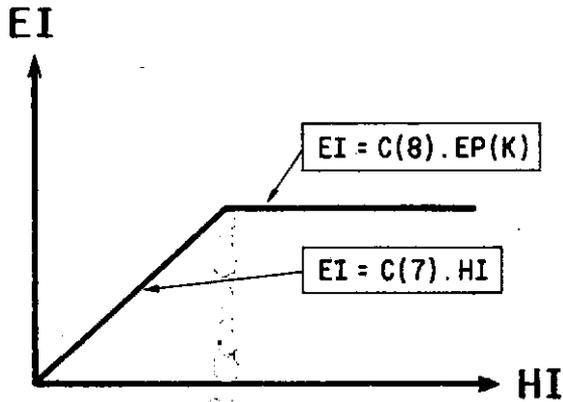


FIGURA 5

2.3.2 - Perdas por Infiltração

Analogamente ao processo de infiltração da camada superior do solo descrito no item 2.2.3, a parcela de infiltração da camada inferior do solo para o lençol subterrâneo é função da umidade desta camada e do material de que é constituído o solo.

Se a umidade possui valor elevado, a parcela que flui da camada inferior do solo para o lençol fica limitada pela natureza do material de que é constituído o solo. Se por outro lado a umidade possui valor reduzido então neste caso não existe limitação do solo e portanto a parcela de infiltração é função apenas da quantidade de água disponível ou seja da umidade da camada inferior do solo.

A expressão do modelo que traduz esta etapa do ciclo hidrológico é a seguinte:

$$FI = \frac{C(11) \cdot HI^2}{C(12)^2 + HI^2} \quad (9)$$

Nesta expressão $C(11)$ representa o valor máximo que pode assumir FI , isto é, o valor de FI quando na expressão (9) a umidade da camada inferior do solo cresce indefinidamente. Se na mesma expressão substituirmos FI por $C(11)/2$ verificamos que $C(12)$ será igual a HI , o que equivale a dizer, que $C(12)$ é o valor da umidade HI quando FI assume a metade de seu valor máximo.

A representação gráfica da expressão (9) é a seguinte:

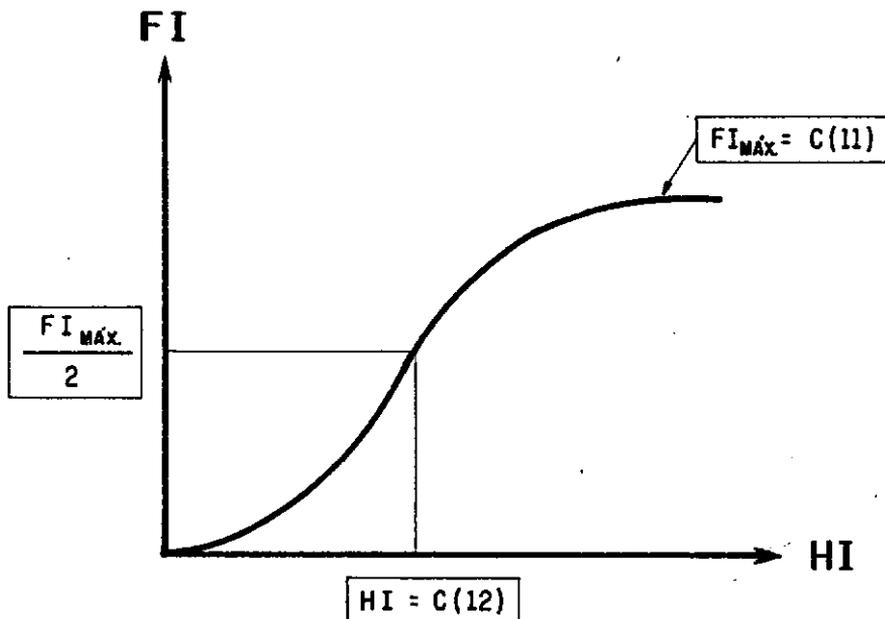


FIGURA 6

O objetivo principal da separação do solo em duas camadas distintas foi o de poder se considerar a evapotranspiração total dividida em duas partes: uma retirada da camada superior do solo englobando a evaporação direta do solo, rios, lagos, etc, e a evapotranspiração dos vegetais de raízes pouco profundas e uma segunda parte retirada da camada inferior do solo proveniente da evapotranspiração dos vegetais de raízes profundas.

2.4 - CONTRIBUIÇÃO DO LENÇOL SUBTERRÂNEO

A contribuição do lençol subterrâneo que adicionada ao escoamento superficial direto irá compor a descarga média do mês em questão, será obtida no modelo através da soma de duas parcelas. A primeira determina a descarga base no fim do mês supondo a não ocorrência de recarga no lençol durante o mês, e a segunda parcela considera o acréscimo de descarga base em função da recarga FI efetivamente realizada durante o mês.

Suponhamos que a descarga base no início de um determinado mês seja GA e suponhamos ainda que não haja recarga do lençol neste mês. Neste caso, a descarga base no final do mês será:

$$GB = C(13) \cdot GA \quad (10)$$

onde $C(13)$ representa o coeficiente de depleção do lençol.

Se admitirmos agora a não ocorrência de recarga nos próximos meses o valor da descarga base no final de cada mês será consecutivamente:

$$C(13)^2 \cdot GA, C(13)^3 \cdot GA, \dots, C(13)^n \cdot GA \quad (11)$$

O volume total liberado pelo lençol a partir do final do mês em questão será a integral dos valores de descargas base ao longo do tempo, então:

$$V_{sr} = \int GA(t) \cdot dt \quad (12)$$

onde: V_{sr} - Volume sem recarga - representa o volume de água total liberado pelo lençol a partir do final do mês, supondo a não ocorrência de recarga neste mês nem nos meses subsequentes.

A discretização da expressão (12) para valores mensais, conduz a

$$V_{sr} = GA \cdot C(13) [1 + C(13) + C(13)^2 + \dots + C(13)^n] \Delta t \quad (13)$$

Seja agora GB a descarga base no final do mês e suponhamos que durante este mês houve uma recarga no lençol de valor FI , adicionando portanto a este um volume igual a $FI \cdot \Delta t$. O valor da descarga base no final de cada mês subsequente se não houver mais recarga no lençol, será sucessivamente:

$$C(13) \cdot GB, C(13)^2 \cdot GB, \dots, C(13)^n \cdot GB \quad (14)$$

Analogamente o volume total liberado pelo lençol a partir do mês em que houve a recarga, supondo a inexistência de novas recargas nos meses subsequentes, será:

$$V_{cr} = GB [1 + C(13) + C(13)^2 + \dots + C(13)^n] \cdot \Delta t \quad (15)$$

onde: V_{cr} - Volume com recarga - representa o volume de água total liberado pelo lençol a partir do final do mês, supondo a ocorrência de recarga apenas durante este mês.

É claro que a diferença ($V_{cr} - V_{sr}$) será igual ao volume d'água recebido pelo lençol durante o mês, então:

$$V_{cr} - V_{sr} = FI \cdot \Delta t \quad (16)$$

Substituindo em (16) os valores dados por (15) e (13), vem:

$$GB [1 + C(13) + C(13)^2 + \dots + C(13)^n] - GA \cdot C(13) \cdot [1 + C(13) + C(13)^2 + \dots + C(13)^n] = FI \quad (17)$$

Ora, $C(13)$ é o coeficiente de depleção do lençol e portanto varia entre zero e um.

$$0 < C(13) < 1 \quad (18)$$

Então:

$$1 + C(13) + C(13)^2 + \dots + C(13)^n = \frac{1}{1 - C(13)} \quad (19)$$

Substituindo (19) em (17) e desenvolvendo, vem:

$$GB = GA \cdot C(13) + (1 - C(13)) \cdot FI \quad (20)$$

Esta é finalmente a expressão utilizada pelo modelo para o cálculo da descarga base no fim do mês (GB) em função de seu valor no início do mês (GA) e da parcela que infiltrou da camada inferior do solo para o lençol subterrâneo (FI). Nesta expressão GA, GB e FI são expressos em mm/mês.

2.5 - DESCARGA TOTAL

A descarga média mensal será obtida no modelo através da soma do escoamento superficial direto (S) definido no item 2.2.1, com a contribuição do lençol subterrâneo durante o mês.

Ora, a contribuição do lençol é calculada no modelo sempre para valores de fim de mês conforme mostrado no item 2.4 e seu valor ao longo do mês é admitido como a média aritmética entre os valores de início e fim de mês. Esta consideração implica em uma simplificação no modelo considerando-se variação linear da descarga base ao longo do mês.

$$D = S + \frac{GA + GB}{2} \quad (21)$$

onde D representa a descarga média mensal calculada pelo modelo.

O modelo não considera no cálculo de D a parcela correspondente ao escoamento subsuperficial, porque esta representa em geral uma parte pequena e que pode ser desdobrada como partes do escoamento superficial direto e da descarga base, sem grandes

influências nos resultados.

Com a obtenção da descarga média mensal, termina-se o balanço hídrico do mês considerado, passando-se ao mês seguinte iniciando-se todo o processo anteriormente descrito.

Os valores de S, ES, FS, EI e FI serão calculados sempre com valores médios da umidade do solo, entendendo-se como tal, os valores obtidos pela média aritmética das umidades calculadas para o início e fim de cada mês.

III - ANÁLISE DO PROGRAMA

3.1 - INTRODUÇÃO

O programa de computador foi desenvolvido em linguagem FORTRAN e testado em um computador IBM/370 modelo 145 com 256k bytes de memória física.

Dentro das possibilidades, procurou-se no seu desenvolvimento a automatização de todas as operações de forma a simplificar ao máximo a sua utilização. O objetivo de tal automatização era o de permitir a utilização do modelo pelo maior número possível de usuários. Tal objetivo entretanto não foi plenamente alcançado de vez que um conhecimento dos processos hidrológicos envolvidos no modelo se faz necessário particularmente na avaliação inicial dos parâmetros $C(J)$ para a fase de aferição do modelo.

Neste trabalho e particularmente neste capítulo procuramos esclarecer detalhes operativos do programa analisando especialmente dados de entrada e saída, critérios de inicialização e otimização dos parâmetros $C(J)$, assim como atribuições de cada trecho do programa.

3.2 - DADOS DE ENTRADA

No Quadro I apresentado a seguir são mostrados os dados de entrada necessários à execução do programa. Neste quadro a primeira coluna contém o tipo de cartão, a segunda o nome da variável, a terceira o significado desta dentro do programa e finalmente a quarta, o formato de leitura.

Q U A D R O 1

CARTÃO	VARIÁVEL	S I G N I F I C A D O	FORMATO
1	M	Número de meses utilizados para ajustamento dos parâmetros ou para extensão de dados. Máximo de 480 meses.	I5
1	NP	Número de postos pluviométricos que se dispõem sobre a bacia num máximo de 16 postos.	I5
1	MI	Número de ordem do mês inicial da série de dados pluviométricos de 1 para janeiro a 12 para dezembro	I5
1	JA e JB	Número de ordem respectivamente do primeiro e último parâmetro C(J), para os quais o modelo fará a pesquisa de otimização.	2I5
1	JC	Número de iterações para ajustamento dos parâmetros C(J), isto é, o número de vezes que o processo de otimização passa por todos os parâmetros de ordem JA e JB para ajustamento destes.	I5
1	JD	Número de vezes que o processo de otimização passa por todos os parâmetros de ordem JA a JB para se efetuar, a substituição dos fatores FC(J) pelas suas raízes quadradas a fim de se ter uma pesquisa mais detalhada dos parâmetros C(J).	I5
1	LC	Representa um código de operação do programa. Se LC = 1 o programa será utilizado para extensão de dados e se LC = 0 o programa irá em primeiro lugar otimizar os parâmetros C(J) e a seguir simular o mesmo período utilizado na otimização não usando desta feita os dados de variações	I5

CARTÃO	VARIÁVEL	S I G N I F I C A D O	FORMATO
1	CONV	Parâmetro de conversão de unidades	F15.6
2	C(J)	Valores dos parâmetros C(J)	16F5.0
3	FC(J)	Valores para alteração dos parâmetros C(J) entre duas iterações consecutivas	16F5.0
4	EP(K)	Valores da evapotranspiração potencial média mensal	12F5.0
5	R(I)	Precipitação média mensal em cada posto sendo lida a série total de um posto de cada vez. Serão utilizados um cartão para cada ano e admitidos no máximo 40 anos de dados	12F5.1
6	Q(I)	Vazão natural média mensal na seção em análise. Serão utilizados um cartão para cada ano e admitidos no máximo 40 anos de dados. Estes valores serão lidos apenas quando LC = 0	12F5.0

No cartão tipo 1 a variável CONV representa um parâmetro de conversão de unidades de vazão. Assim, todas as grandezas intervenientes no ciclo hidrológico são tratadas no modelo em mm/mês, e como geralmente as vazões médias mensais são apresentadas em m^3/s , então CONV será um parâmetro que multiplicado pela vazão na unidade em que ela se encontra a transforma em mm/mês.

Nos cartões tipo 2 são perfurados 16 valores dos parâmetros C(J) por cartão. Os parâmetros C(1) a C(13) representam coeficientes ou expoentes das expressões referidas no Capítulo 2, os parâmetros C(14) a C(16) representam condições iniciais e finalmente os parâmetros C(17) a C(32) representam os

pesos dos postos pluviométricos para a obtenção da chuva média sobre a bacia.

Geralmente interessa pesquisar os valores ótimos dos parâmetros C(1) a C(13) o que corresponde no cartão tipo 1 a fazer JA = 1 e JB = 13 .

No processo de otimização cada parâmetro é analisado separadamente mantendo-se os demais constantes. Assim entre duas iterações consecutivas FC(J) representa o número pelo qual deve ser multiplicado o parâmetro C(J) a fim de pesquisar o valor deste que conduz ao mínimo de desvio entre as vazões calculadas e observadas. Uma interpretação para os valores de FC(J) poderia ser dada como representando o percentual de variação dos parâmetros C(J) desejado entre duas iterações. No cartão tipo 3 são lidos valores de FC(J) sendo 16 valores por cartão.

Os dados de entrada relativos aos cartões tipo 1 , 2 e 3 podem ser considerados como de características operativas do programa, restando portanto a introdução de dados hidrológicos necessários à execução do mesmo e que são lidos nos cartões do tipo 4 , 5 e 6.

Os valores da evapotranspiração potencial média de cada mês lidos no cartão tipo 4 são normalmente obtidos de evaporímetros de piche ou de tanque, como por exemplo o classe A do Weather Bureau.

Os valores de precipitação contidos nos cartões tipo 5 são introduzidos no programa na mesma ordem em que foram fornecidos os pesos da estação (parâmetros C(17) a C(32)). Para ca

da posto é então fornecida a série histórica de dados em um número de cartões iguais ao número de anos civis envolvidos.

No caso de haver falhas nos dados de precipitação, em seus lugares deverão constar valores negativos, os quais o programa interpreta corretamente desprezando este posto no mês em questão.

Com os dados de precipitação introduzidos o programa determina a precipitação média na bacia utilizando o método de Thiessen, armazenando em seguida estes valores em um vetor $P(I)$ que possui um máximo de 480 posições, ou seja capacidade para 40 anos de dados.

Finalmente, através dos cartões tipo 6, os dados da série de vazões são introduzidos caso o modelo seja utilizado para ajustamento dos parâmetros, sendo necessários tantos cartões quantos forem os anos civis envolvidos e que é igual ao número de anos da série de precipitações. Imediatamente os dados de vazões são transformados para a unidade do modelo ou seja em mm/mês através da variável CONV, e armazenados em um vetor $Q(I)$ também com 480 posições, isto é, capacidade máxima para 40 anos de dados.

3.3 - VALORES INICIAIS PARA OS PARÂMETROS C(J)

É sem dúvida alguma um dos pontos mais importantes para o êxito na aplicação do modelo a avaliação inicial dos parâmetros $C(J)$, especialmente os de ordem $C(1)$ a $C(13)$. A grande dificuldade na avaliação de alguns destes parâmetros resulta do fato de que nem sempre é possível se dar uma interpretação física a estes, entretanto a aplicação do modelo a bacias de característi-

cas fisiográficas diferentes demonstrou ser relativamente pequena a influência das características da bacia no valor numérico destes parâmetros.

A melhor forma de avaliação dos valores iniciais dos parâmetros $C(J)$, consiste na análise de uma saída anterior do programa uma vez que esta fornece mês a mês a listagem dos valores de todas as grandezas intervenientes no ciclo hidrológico, sendo portanto possível a verificação de qual a grandeza cujo cálculo apresenta-se deficiente, atuando-se neste caso diretamente nos parâmetros envolvidos no cálculo.

A seguir procuraremos dar alguns critérios a serem seguidos na avaliação dos valores iniciais de $C(J)$.

3.3.1 - Escoamento Superficial Direto

O parâmetro $C(1)$ fisicamente representa o percentual da área total da bacia cujo revestimento é impermeável incluindo como tal as superfícies livres dos rios, lagos, etc. Se a bacia em estudo incluir cidades grandes, como por exemplo a do rio Tietê em Pirapora que contém a cidade de São Paulo, então o revestimento impermeável tende a aumentar em relação a uma bacia de cobertura predominantemente vegetal ou solo nu.

Uma forma gráfica de se obter o parâmetro $C(1)$, consiste no traçado da curva $S = f(P, HS)$.

Para o período de calibragem do modelo traça-se o hidrograma e por um processo qualquer, separa-se o escoamento base do superficial. Para cada mês marca-se em um gráfico o par ordenado (S, P) . O coeficiente angular da reta envoltória inferior

destes pontos é o valor inicial de $C(1)$, como mostra a figura 7.

Os valores iniciais para os parâmetros $C(2)$, $C(3)$ e $C(4)$, podem ser avaliados utilizando-se ainda a figura 7.

A reta cujo coeficiente angular mede numericamente o valor de $C(1)$ representa um limite inferior, abaixo do qual não é possível haver pontos. Ora, esta situação corresponde fisicamente às condições de ressecamento máximo do solo, ou o que equivale a dizer $HS = 0$, que pode ser constatado também através da expressão 2.

Por outro lado, podemos determinar a envoltória superior do gráfico apresentado na Figura 7, como sendo definido pela relação $S = P$, que é o valor máximo possível que S pode assumir, e que corresponde fisicamente às condições de umidade máxima do solo, que equivale na expressão 2 a HS assumir valores suficientemente grandes.

É possível interpolar entre as duas retas acima definidas uma família de curvas, cada qual para um valor fixo e inicialmente arbitrário de HS . Se tomarmos agora vários pontos sobre uma mesma curva, teremos então conhecidos para cada ponto os valores de S , P e HS , que com $C(1)$ anteriormente determinado permitirá através da expressão 2 a determinação do valor do parâmetro $C(2)$ e da constante K assim definida:

$$K = \left(\frac{C(3)}{HS} \right)^{C(4)} \quad (22)$$

Se os diversos valores de K conduzirem a um mesmo

VARIAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL DIRETO
COM A UMIDADE DO SOLO E A PRECIPITAÇÃO

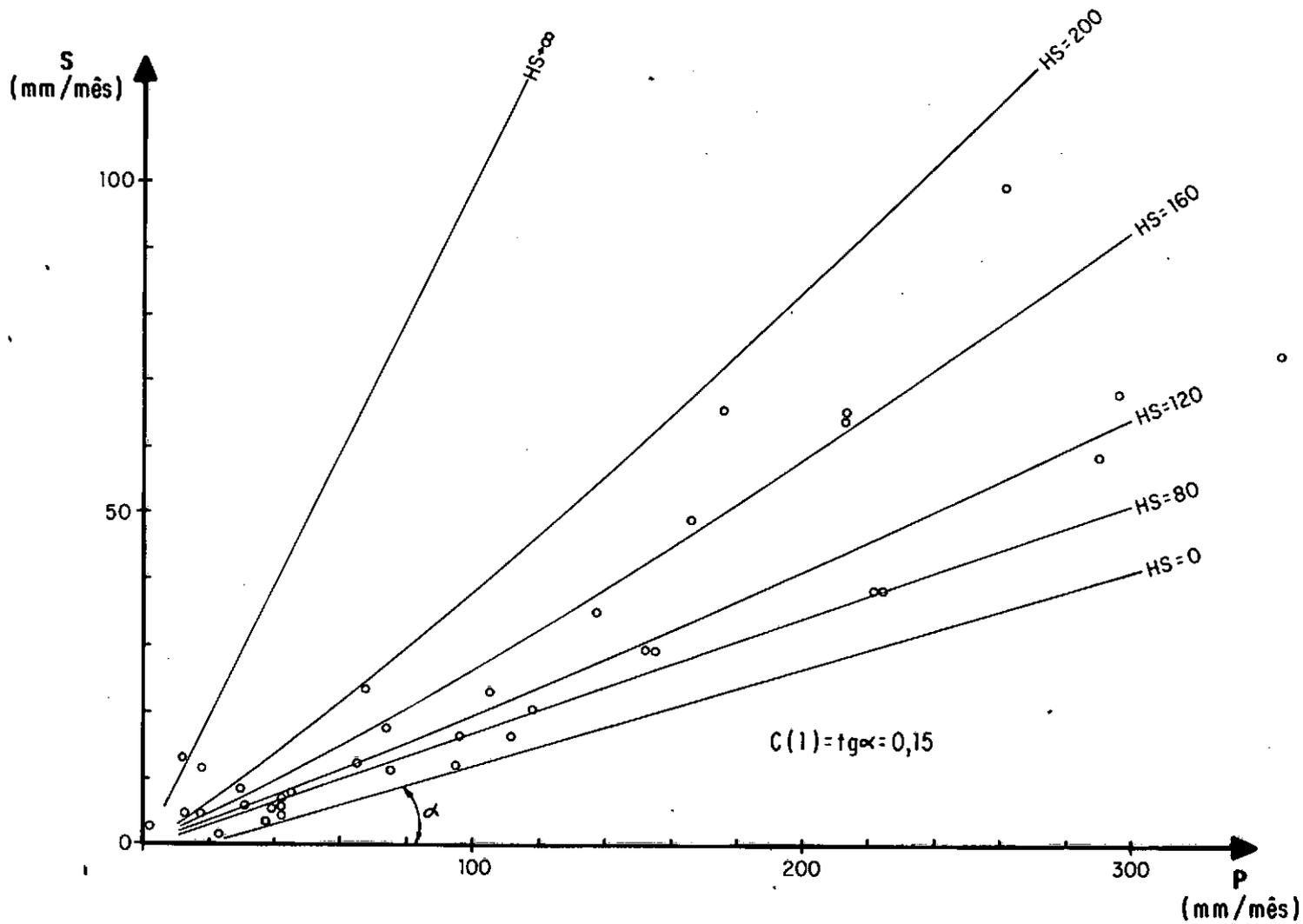


FIGURA 7



valor, isto demonstrará que realmente estamos trabalhando sobre uma única curva, ou seja uma curva de mesmo valor para HS, caso contrário, a não constância dos valores de K demonstrará que a família de curvas está mal interpolada, devendo portanto ser feito um novo traçado.

Uma vez ajustada da melhor forma possível a família de curvas cada qual para um valor de HS, tomamos agora os diversos pares de valores de K e HS característicos de cada curva. De posse desses elementos é possível então a determinação dos parâmetros C(3) e C(4) através da utilização de uma anamorfose na expressão (22).

$$\text{Assim} \quad : \quad \log K = C(4) \log C(3) - C(4) \log HS \quad (23)$$

$$\text{Fazendo} \quad : \quad Y = \log K \quad (24)$$

$$A = C(4) \log C(3) \quad (25)$$

$$B = - C(4) \quad (26)$$

$$X = \log HS \quad (27)$$

vem: $Y = A + BX$, que é a equação de uma reta na qual X e Y são conhecidos. O ajustamento desta reta permite a obtenção dos parâmetros C(3) e C(4) através da utilização das expressões (25) e (26).

3.3.2 - Perdas por Evapotranspiração

Os parâmetros C(5) e C(6) atuam no cálculo das perdas por evapotranspiração do solo superior, enquanto que C(7)

e $C(8)$ no cálculo das perdas por evapotranspiração do solo inferior.

Tais perdas, conforme já descrito no Capítulo II ítem 2.2.2, são obtidas no modelo comparando-se a umidade calculada do solo com o valor da umidade máxima possível de ser perdida por evapotranspiração. Se a umidade calculada do solo for maior que este valor, então as perdas por evapotranspiração serão proporcionais à evapotranspiração potencial $EP(K)$ do mês em questão, caso contrário serão proporcionais ao valor calculado da umidade do solo.

Na Figura 2 é apresentado um gráfico representativo desta passagem do ciclo hidrológico.

Se a camada superior do solo perde água por transpiração dos vegetais de raízes pouco profundas ou diretamente por evaporação da camada superficial do solo, é razoável que o parâmetro $C(6)$ deve oscilar em torno de 1.

Se a camada inferior do solo perde água pela ação fisiológica dos vegetais de raízes profundas, é razoável que quando houver água em quantidade suficiente, as perdas por evapotranspiração sejam uma função de $EP(K)$ e do tipo de cobertura vegetal com raízes profundas. Neste caso o parâmetro $C(8)$ representa a fração de $EP(K)$ consumida pelos vegetais de raízes profundas. Uma avaliação inicial mais precisa para este parâmetro pode ser obtida através da estimativa do volume de água necessário para o consumo dos vegetais de raízes profundas em toda a bacia o qual é dividido pela área da bacia e verificado qual o percentual de $EP(K)$ que representa este valor. O parâmetro $C(8)$ pode ser estimado ainda

através do percentual da área coberta por vegetais de raízes profundas e a área total da bacia.

A figura 5 contém o gráfico representativo do cálculo da evapotranspiração relativa à camada inferior do solo.

A avaliação inicial dos parâmetros C(5) e C(7) está diretamente ligada ao conhecimento do valor da umidade a partir da qual as perdas por evapotranspiração passa a ser função da evapotranspiração potencial EP(K) tanto para a camada superior do solo como para a inferior. Como este valor é geralmente desconhecido uma aproximação razoável seria considerarmos tanto C(5) como C(7) iguais a 1 que seria o mesmo que adotarmos uma inclinação de 45° para as retas $ES = f(HS)$ e $EI = f(HI)$.

3.3.3 - Parâmetros de Infiltração

Os parâmetros C(9) e C(10) atuam no cálculo da infiltração da camada superior do solo (FS), enquanto que C(11) e C(12) atuam no cálculo da infiltração da camada inferior do solo (FI). Embora estes parâmetros possuam interpretação física conforme descrito no Capítulo II itens 2.2.3 e 2.3.2, a avaliação de seus valores iniciais é dificultada geralmente pelo desconhecimento das características hidro-geológicas das camadas inferiores do solo, especialmente a granulometria, porosidade e permeabilidade.

Uma análise comparativa da aplicação do modelo em diferentes bacias poderá fornecer subsídios à avaliação inicial destes parâmetros. Assim, quanto mais permeável forem as camadas do solo, maiores serão os valores das infiltrações máximas, que são

representadas pelos valores de $C(9)$ e $C(11)$ respectivamente para as camadas superiores e inferiores do solo. Da mesma forma $C(10)$ e $C(12)$ crescerão quanto mais permeáveis forem as camadas do solo, ou ainda, para um mesmo valor de infiltração, necessitamos de maiores umidades quanto menos permeáveis forem os solos conforme pode ser observado na figura 8. Os valores de $C(9)$ e $C(11)$ podem ser avaliados pela máxima inclinação da curva de descarga base em fase de ascensão.

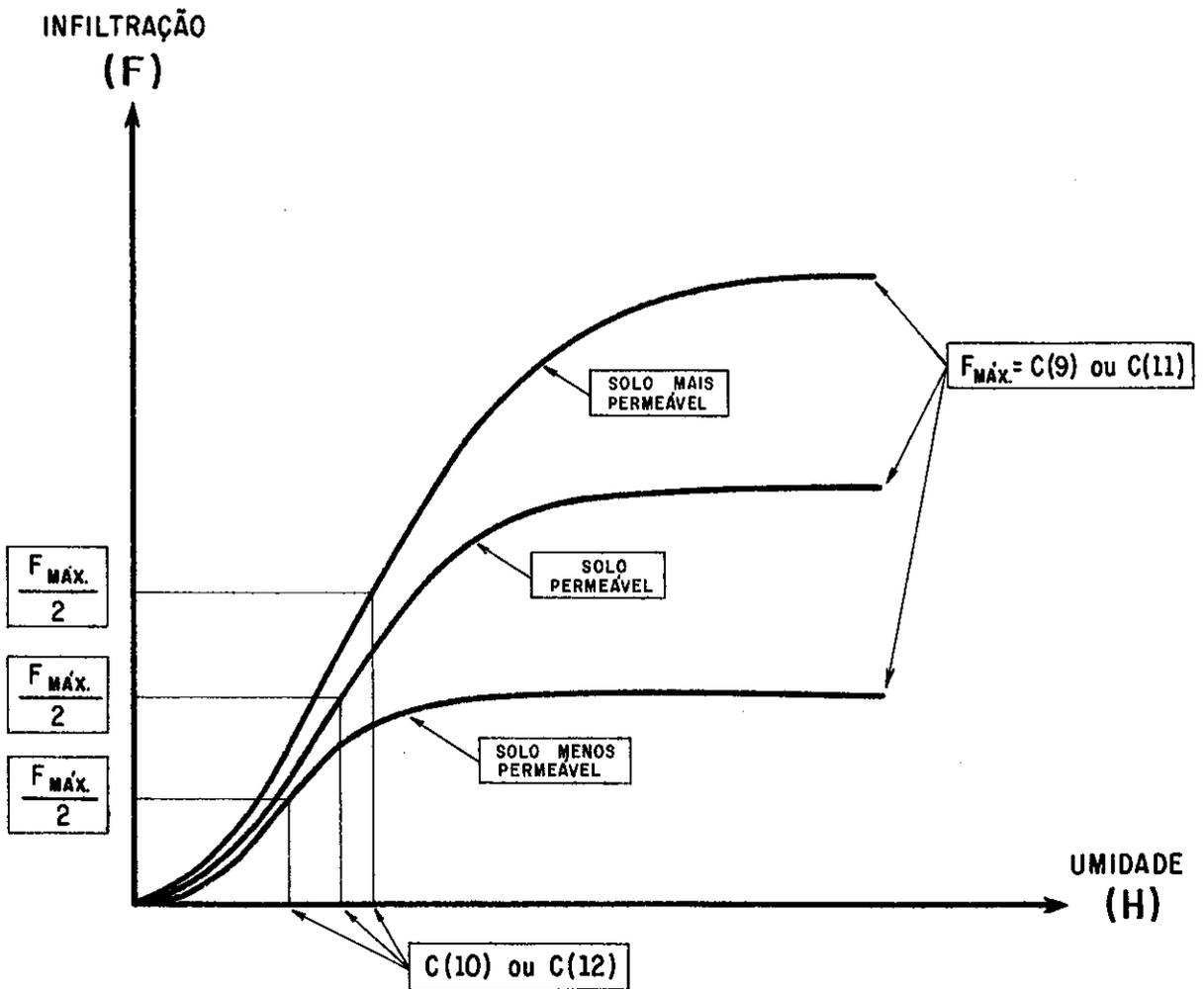


FIGURA 8

Apesar das dificuldades na avaliação destes parâmetros, o critério de auto-otimização utilizado no modelo poderá conduzir a valores finais bastante próximos da realidade.

3.3.4 - Descarga Base

Conforme visto no Capítulo II ítem 2.4, o parâmetro atuante no cálculo da descarga base é o $C(13)$ e que representa ao final do mês o percentual de decréscimo desta descarga em relação ao seu valor no início do mês, supondo a não ocorrência de recarga do lençol durante este período. Claro está, que o campo de variação de $C(13)$ estará compreendido entre zero e um.

Uma forma bastante simples e eficiente para a avaliação de seu valor inicial, seria a separação dos escoamentos base e superficial no hidrograma de vazões observadas no local para onde está se aferindo o modelo. Tomando-se agora as descargas base no início e fim de cada mês nos períodos de estiagem, poderemos pesquisar o valor mínimo da relação entre estas grandezas que será aproximadamente o valor de $C(13)$. Assim, se tomarmos a expressão (10), que pressupõe a não ocorrência de recarga do lençol durante o mês, vem:

$$C(13) = \frac{GB}{GA}$$

O processo de auto-otimização dos parâmetros se encarregará da aproximação de $C(13)$ para um valor mais próximo do ótimo.

3.4 - CRITÉRIO DE OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS

Basicamente o critério utilizado na otimização de $C(J)$ consiste na análise individual de cada parâmetro mantendo-se, os demais constantes, e na pesquisa do valor deste que conduz a um mínimo do somatório dos valores absolutos dos desvios entre as vazões calculadas e observadas.

Desta forma em cada iteração é feita a multiplicação do parâmetro $C(J)$ em análise pelo seu correspondente fator $FC(J)$, simulando-se todo o período de aferição do modelo com o novo valor de $C(J)$.

A comparação entre a soma dos desvios nesta iteração com a anterior, mostrará se houve melhora no ajustamento. Em caso afirmativo o novo valor da soma dos desvios será guardado e o anterior desprezado, passando-se então à pesquisa do parâmetro $C(J+1)$. Em caso contrário, $C(J)$ será dividido por $FC(J)$ de forma a voltar ao seu valor anterior e $FC(J)$ será substituído pelo seu inverso, de forma que ao passar novamente por este parâmetro, o produto $C(J)$ por $FC(J)$ conduza a uma variação em sentido contrário.

Para evitar que cada parâmetro oscile em torno de seu valor ótimo sem entretanto chegar a ele, a cada JD iterações em um mesmo parâmetro é efetuada a substituição de $FC(J)$ pela sua raiz quadrada, reduzindo portanto o campo de variação da $C(J)$. Tal procedimento operativo do modelo entretanto, poderá conduzir a valores de convergência diferentes dos ótimos, se os valores iniciais dos parâmetros $C(J)$ forem mal avaliados e o valor de JD for baixo, ou ainda se os valores de $FC(J)$ forem muito próximos

de 1. Neste caso é possível que $C(J)$ não atinja o valor ótimo embora tenda para este valor durante o processo iterativo.

O critério de minimização da soma dos valores absolutos dos desvios adotados por Pfafstetter [1] e mantido nesta versão do modelo, foi considerado tendo-se em vista dar igual importância aos erros cometidos pelo modelo tanto para vazões altas como baixas.

3.5 - ATRIBUIÇÕES DE CADA TRECHO DO PROGRAMA

Neste ítem será dado um enfoque especial à função de cada trecho do programa, sem procurar descer a detalhes de programação, de forma a permitir um acompanhamento mais detalhado do programa.

Na listagem em anexo procuramos individualizar cada trecho do programa utilizando-se de cartões comentários com os quais damos uma idéia da etapa seguinte a ser executada. A seguir apresentamos também na figura 9 um diagrama em blocos que ilustra de forma simplificada cada fase do programa.

A primeira etapa a ser executada consiste basicamente na leitura e impressão dos dados de entrada de maneira a caracterizar os valores utilizados em cada rodada do programa. A seguir o programa calcula para cada mês a chuva média na bacia utilizando-se do método de Thiessen para os NP postos pluviométricos e quando for o caso inicializa alguns valores já objetivando o ajustamento dos parâmetros $C(J)$.

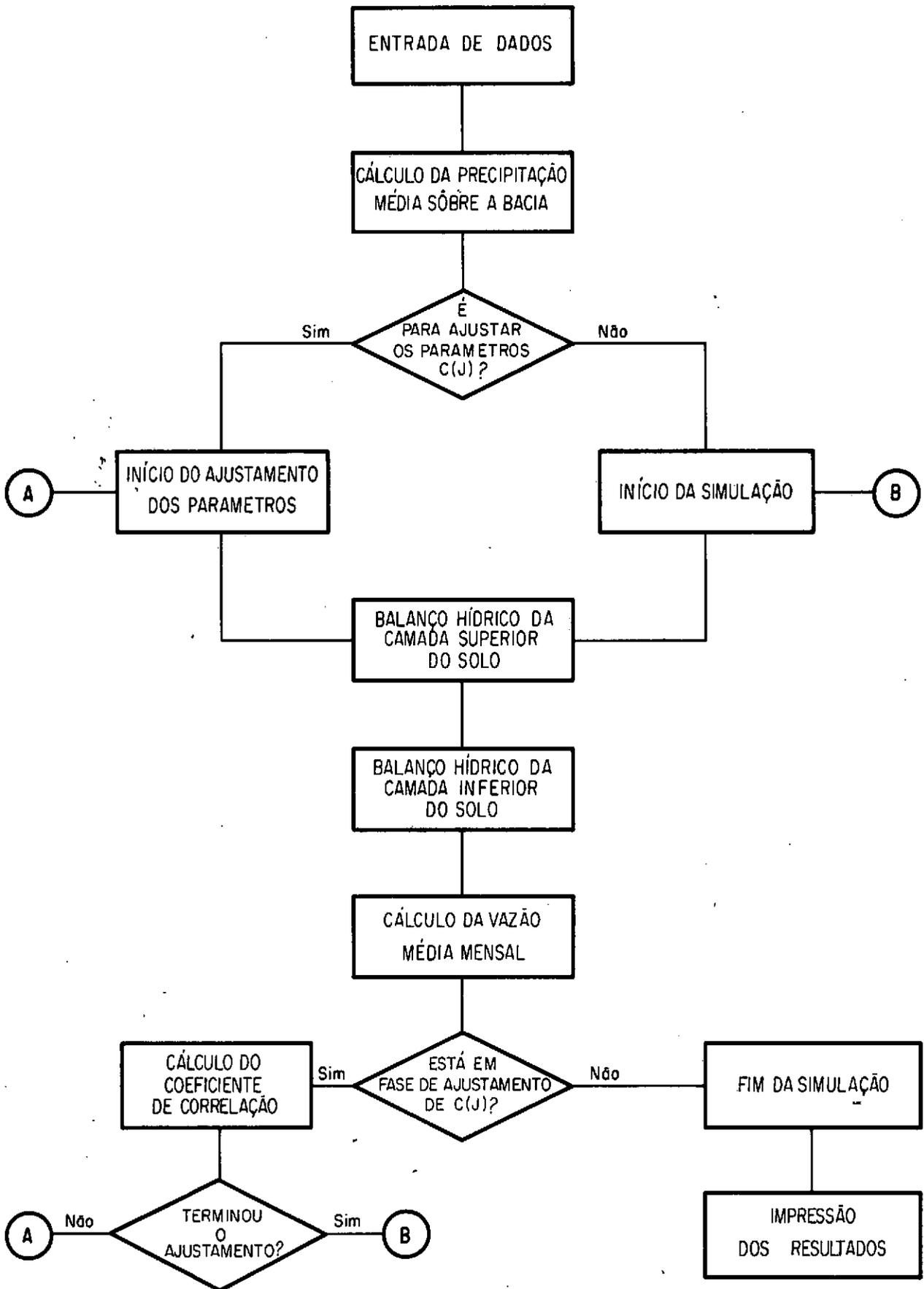


FIGURA 9

Se LC for igual a zero, o programa irá proceder ao ajustamento dos parâmetros $C(J)$, simulando a seguir o período de aferição do modelo, utilizando para tal os valores finais de $C(J)$. Se LC for diferente de zero o programa entrará direto na simulação do período para o qual foi fornecido os dados de chuva.

Tanto durante o ajustamento dos parâmetros $C(J)$ como durante a simulação, o programa passa por fases distintas características do ciclo hidrológico. Assim a primeira destas fases corresponde ao que foi chamado de Balanço Hídrico da Camada Superior do Solo. Nesta fase o programa determina para cada mês o escoamento superficial direto (S), a evapotranspiração (ES), a infiltração da camada superior do solo (FS), assim como a umidade desta camada do solo (HS).

Finda esta etapa o programa passa ao Balanço Hídrico da Camada Inferior do Solo, determinando desta feita a evapotranspiração (EI), a infiltração (FI) assim como a umidade da camada inferior do solo (HI).

A seguir na etapa denominada Cálculo da Vazão Mensal, o programa determina a descarga base que adicionada ao escoamento superficial direto produz a descarga média no mês considerado.

Se o programa estiver sendo utilizado para extensão de dados a fase seguinte será a impressão dos resultados finais seguindo-se o traçado de gráficos elucidativos dos resultados obtidos. Se por outro lado, a utilização for para ajustamento dos parâmetros $C(J)$ a fase seguinte será de obtenção do coeficiente de correlação entre a

série de vazões calculada e observada, seguindo-se a impressão dos resultados finais e traçado de gráficos para melhor visualização do nível de ajustamento conseguido.

3.6 - DADOS DE SAÍDA E VERIFICAÇÕES

Quando o programa é utilizado para ajustamento dos parâmetros $C(J)$, torna-se necessário o conhecimento de alguns valores parciais de forma a serter idéia do comportamento do modelo ao final de cada iteração. Assim sendo uma tabela é impressa onde cada linha representa uma iteração e na qual a primeira coluna (SQ) representa a soma dos valores absolutos dos desvios entre as vazões calculadas e observadas.

A segunda coluna (SD) contém os mínimos valores de SQ até então obtidos e sempre que em uma iteração SQ for menor que SD, na iteração subsequente SD assumirá este valor de SQ até que novamente ocorra esta situação, como pode ser observado na Tabela 1 a seguir.

A terceira coluna contém os valores da soma dos quadrados dos desvios entre as vazões calculadas e observadas (SQ2), enquanto que a quarta contém os coeficientes de correlações correspondentes.

Nas colunas seguintes são apresentados respectivamente os valores dos parâmetros em análise, os valores de $FC(J)$ considerado para alteração dos parâmetros e finalmente o número de ordem do parâmetro em questão.

T A B E L A 1

SQ	SD	SQ2	COR	CC(J)	FC(J)	JJ
90.19	***	558.4	0.986	0.16	1.100	1
140.83	90.19	2038.6	0.949	1.49	1.100	2
90.48	90.19	578.8	0.986	434.50	1.100	3
89.63	90.19	508.6	0.988	4.31	1.100	4
88.92	89.63	502.1	0.988	1.10	1.100	5
115.24	88.92	1032.0	0.974	1.21	1.100	6
91.75	88.92	527.3	0.987	0.77	1.100	7
90.91	88.92	502.0	0.988	0.15	1.100	8
98.55	88.92	563.8	0.986	55.00	1.100	9
84.40	88.92	493.7	0.988	66.00	1.100	10
86.22	84.40	459.6	0.989	99.00	1.100	11
96.60	84.40	612.4	0.985	33.00	1.100	12
96.70	84.40	712.9	0.982	0.81	1.100	13
64.57	64.26	371.7	0.991	0.18	1.012	1
66.98	64.26	375.4	0.991	1.33	1.012	2
68.36	64.26	399.5	0.990	390.32	1.012	3
68.02	64.26	393.9	0.990	4.36	1.012	4
65.03	64.26	363.5	0.991	1.10	0.988	5
70.52	64.26	396.8	0.990	1.09	0.988	6
64.26	64.26	372.7	0.991	0.72	0.988	7
64.46	64.26	378.1	0.991	0.13	1.012	8
65.16	64.26	365.7	0.991	46.00	1.012	9
65.61	64.26	372.0	0.991	71.74	0.988	10
64.45	64.26	373.8	0.991	82.80	1.012	11
64.73	64.26	374.2	0.991	27.60	1.012	12
64.28	64.26	381.4	0.991	0.70	1.012	13

Objetivando-se dar saída apenas aos dados necessários à análise do ajustamento dos parâmetros, limitou-se a tabela acima referida à impressão dos valores correspondentes à primeira e última iteração para o conjunto de parâmetros $C(J)$ em análise.

Terminada a fase de ajustamento uma tabela é impressa contendo desta feita os valores finais dos parâmetros $C(J)$ os quais poderão ser comparados com seus valores iniciais impressos anteriormente.

Os dados de saída até então descritos referem-se apenas ao caso da utilização do modelo para ajustamento dos parâmetros $C(J)$.

Uma tabela contendo mês a mês valores de todas as grandezas hidrológicas envolvidas na composição da vazão mensal, é impressa a seguir desta feita tanto para utilização do modelo em extensão de dados como para ajustamento dos parâmetros $C(J)$. A título de ilustração apresentamos a seguir uma reprodução desta utilizando-se como exemplo apenas dois anos de dados na Bacia do Alto Tietê em Pirapora.

Esta pode ser considerada a saída mais importante do programa uma vez que através dela temos uma visão global do comportamento de cada uma das grandezas hidrológicas analisadas podendo-se comparar mês a mês os deflúvios calculados e observados, assim como apreciar a variação dos diversos componentes que entram em jogo no ciclo hidrológico.

1	P(1)	S	E SUP	F SUP	H SUP	E INF	F INF	H INF	60	Q CALC	Q USL
10	84.8	11.7	37.0	7.9	53.3	3.6	2.7	5.0	5.7	18.0	19.2
11	95.7	17.3	50.6	12.8	45.4	5.4	5.6	7.4	5.0	22.9	23.6
12	224.9	42.0	94.0	26.1	64.5	8.5	12.7	11.7	7.6	40.7	40.1
13	296.3	75.0	119.3	50.0	147.7	11.3	20.2	15.0	11.7	51.7	62.0
14	261.2	86.8	98.6	59.9	193.8	11.4	26.9	19.1	16.4	116.9	117.7
15	175.9	61.4	105.7	59.6	192.6	12.2	26.0	19.7	20.0	74.6	67.6
16	166.3	47.3	95.7	58.4	169.3	11.1	28.0	19.7	22.5	52.6	75.5
17	11.8	2.2	52.1	59.8	165.1	10.7	23.4	17.3	22.8	24.9	37.9
18	31.4	5.7	40.4	9.1	36.3	7.8	11.0	15.6	19.1	26.6	27.2
19	21.6	5.9	22.7	5.3	20.4	3.2	2.1	4.4	13.8	20.4	22.3
20	2.7	0.5	12.0	1.0	10.8	2.2	1.0	3.0	9.8	12.3	15.2
21	39.6	7.1	14.2	1.4	12.7	1.3	0.4	1.9	6.9	15.5	15.2
22	221.7	40.5	73.0	20.4	65.6	4.5	4.0	6.2	6.0	46.9	47.2
23	104.7	19.5	90.6	27.2	88.5	9.8	15.1	13.5	9.1	27.1	39.2
24	191.6	27.9	85.4	26.0	76.7	9.8	16.1	13.5	11.3	39.1	44.1
25	245.1	81.7	119.3	59.5	137.0	11.2	19.8	15.4	15.9	34.3	7.4
26	212.9	75.0	98.6	59.7	190.9	11.4	25.6	16.4	17.6	30.7	54.7
27	130.7	38.3	105.7	38.7	169.6	12.2	27.1	15.2	20.5	57.3	59.9
28	742.2	14.5	95.7	52.1	112.5	11.1	23.6	17.5	21.6	35.6	41.3
29	37.3	6.7	61.1	10.5	54.9	8.9	13.7	12.3	19.1	27.1	25.7
30	32.6	4.1	27.6	4.8	24.8	5.2	5.2	7.1	16.8	21.0	15.2
31	41.5	7.5	23.8	3.0	21.3	2.9	1.7	4.0	10.7	27.3	27.9
32	45.1	8.1	20.3	5.0	25.4	2.9	1.7	4.0	7.9	17.5	16.7
33	13.3	2.4	22.5	3.3	20.2	2.5	1.3	3.5	5.9	9.3	12.8

SOMATORIO PARA VERIFICACAO

2798.9	697.1	1621.0	497.9	2039.4	191.1	316.3	276.0	321.0	118.5	107.2
--------	-------	--------	-------	--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------



A seguir é impresso uma tabela contendo o somatório de cada grandeza hidrológica para todos os meses utilizados e que serve também como verificação da validade dos resultados obtidos. Assim, algumas expressões podem ser instituídas como as que se seguem:

$$\Sigma Q_{\text{CALC}} \approx \Sigma Q_{\text{OBS}} \quad (28)$$

$$\Sigma P \approx \Sigma S + \Sigma ES + \Sigma FS \quad (29)$$

$$\Sigma FS \approx \Sigma FI + \Sigma EI \quad (30)$$

$$\Sigma FI \approx \Sigma GB \quad (31)$$

$$\Sigma P \approx \Sigma S + \Sigma GB + \Sigma ES + \Sigma EI \quad (32)$$

A aplicação destas expressões ao exemplo apresenta do conduz aos valores mostrados na Tabela 2 a seguir:

T A B E L A 2

EXPRESSÕES	1º MEMBRO	2º MEMBRO
28	1018.5	1070.2
29	2798.9	2816.3
30	497.4	499.4
31	318.3	320.8
32	2798.9	2820.8

Para se ter uma melhor visualização dos resultados obtidos, a seguir é impresso um gráfico mostrando os dados de chu-

va em forma de hietógrafa, o escoamento base calculado pelo modelo, assim como os hidrogramas de vazões calculada e observada. Quando o programa está sendo utilizado para extensão de dados, o hidrograma de vazões observadas é suprimido deste gráfico devido ao desconhecimento destes valores.

Ao ser utilizado o programa para ajustamento dos parâmetros um novo gráfico é traçado, desta vez marcando em eixos cartesianos os valores das vazões calculadas versos observadas. Este gráfico dará uma idéia visual da dispersão dos pontos em torno da reta teórica o que pode ser analisado também através do coeficiente de correlação.

IV - APLICAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 - LOCAL ESCOLHIDO PARA APLICAÇÃO E SUAS CARACTERÍSTICAS

A Bacia do Alto Tietê a montante da localidade de Pirapora, localizada na Região Sudeste do Brasil foi escolhida para teste do modelo neste trabalho.

Abrangendo uma área de cerca de 5815 km², a Bacia do Alto Tietê possui características bastante particulares devido a utilização de suas águas pela Light Serviços de Eletricidade, que através de bombeamentos sucessivos transpõe a vertente da Serra do Mar ganhando com isto cerca de 700 m em queda líquida.

Após sucessivos bombeamentos com a inversão do curso do Tietê em determinados trechos, atinge-se o Reservatório de Billings, de onde a água é lançada ao Reservatório do Rio das Pedras e daí serra abaixo, até a Usina de Henry Borden que após utilizar a água para geração de energia elétrica, lança-a no Rio Cubatão, conforme pode ser observado na planta mostrada na figura 10..

Embora os complexos esquemas de bombeamento da Light criem condições hidrológicas artificiais na bacia, as vazões consideradas em Pirapora são as naturais, ou seja, as vazões que chegariam a este posto caso não houvesse represamentos nem bombeamentos. A série histórica de vazões considerada neste trabalho foi obtida no relatório do Grupo Meco-Caeab [12] e [13].

Além dos aspectos artificiais produzidos na bacia e anteriormente citados, acresce-se a inclusão na mesma de grandes áreas urbanizadas como a Cidade de São Paulo, assim como inúmeros

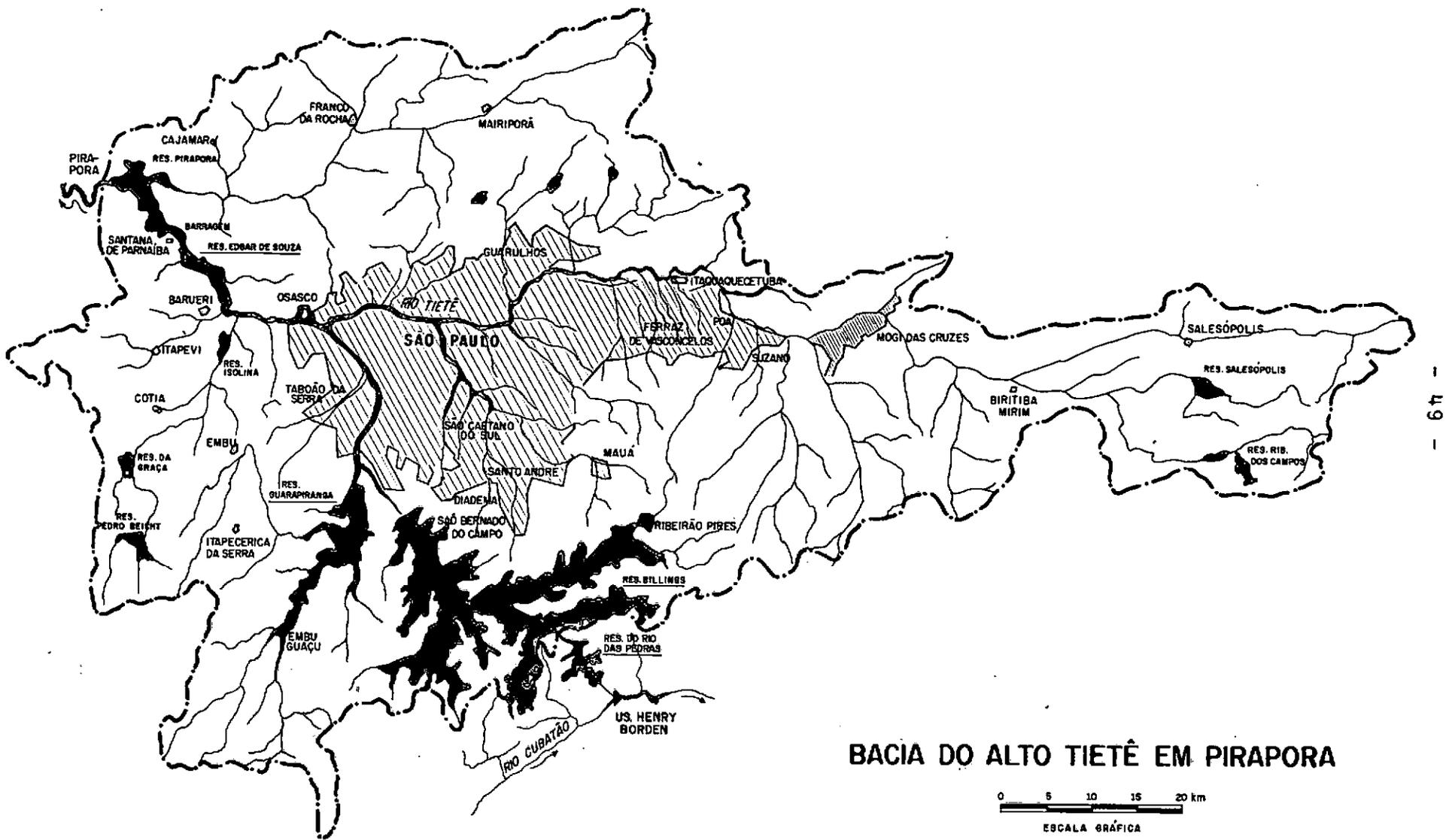
municípios paulistas, os quais aumentam suas respectivas áreas de ano para ano de forma bastante intensa.

Para se ter uma idéia da utilização dos solos da bacia [11], podemos lançar mão de dados do Departamento de Estatística do Estado de São Paulo, que através de fotografias aéreas tiradas em 1962 distribuiu percentualmente a bacia da seguinte forma :

- áreas cultivadas	7,60% ;
- campos e pastagens	19,21% ;
- matos e capoeiras	39,60% ;
- áreas reflorestadas	6,80% ;
- reservatórios	2,59% ;
- áreas urbanizadas	24,20% .

Deve-se atentar aqui para as alterações produzidas na série histórica de vazões por efeitos de urbanização na bacia. Assim se fizermos um balanço hídrico da camada superior do solo, verificamos que para uma mesma chuva e umidade do solo, teremos maiores valores de escoamento superficial direto e menores parcelas de infiltração e evapotranspiração quanto mais urbanizada for a bacia. Isto conduz evidentemente a uma maior potencialidade na produção de picos de cheias mais elevados. Entretanto tal efeito é amortecido quando consideramos valores mensais, pois neste caso as parcelas infiltradas num mês contribuirão em grande parte para a vazão ainda neste mês.

A fim de dar uma idéia mais completa das características da bacia em apreço, focalizaremos agora aspectos climatológicos da mesma.



BACIA DO ALTO TIETÊ EM PIRAPORA

0 5 10 15 20 km
ESCALA GRÁFICA

FIGURA 10

Desta forma, localizada exatamente na faixa de latitude do trópico sul, o planalto paulistano incluído na Bacia do Alto Tietê apresenta condições climáticas muito favoráveis.

Observações meteorológicas realizadas no período de 1933 a 1966 no Instituto Astronômico e Geofísico da USP, indicam :

- temperatura média do ar 17,8°C ;
- média das temperaturas mínimas diárias 13,8°C ;
- média das temperaturas máximas diárias 24,3°C ;
- umidade relativa média 83% ;
- em 90% do tempo prevalecem ventos brandos.

Se tomarmos o sistema de classificação internacional de Koeppen, podemos distinguir dois tipos de clima predominantes sobre a Bacia do Alto Tietê e que são o Cwb e o Cfb .

A variedade Cwb é o clima de savanas dos altiplanos tropicais com verão ameno; a temperatura média do dia mais quente em geral não ultrapassa os 22°C. São os verões com noites frescas (grandes amplitudes térmicas diárias). Esse tipo de clima é o que predomina sobre a Capital e abrange uma larga faixa da Bacia do Alto Tietê.

O tipo Cfb representa um clima quente, temperado e úmido, com inverno menos seco que o tipo Cw . A precipitação média do mês menos úmido é maior do que 30 mm. A temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e a temperatura média do mês mais quente é inferior a 22°C. Esse tipo de clima diferencia-se do Cwb , anteriormente definido, por apresentar inverno menos

seco. Em geral esse tipo climático predomina na região do flanco continental da Serra do Mar..

O estudo da distribuição anual média das chuvas em vários pontos representativos da Bacia do Alto Tietê, permite tirar as seguintes conclusões:

- a - em toda a região distingue-se um período chuvoso bem caracterizado e que ocorre no verão. Em geral, o se mestre mais chuvoso é o de outubro a março, e o menos chuvoso de abril a setembro.
- b - nas áreas fora da influência da Serra do Mar, observa-se uma diminuição das chuvas de inverno, tornando se mais marcante o contraste entre as alturas pluviométricas médias dos meses de inverno e as de verão .

Finalmente devemos destacar que um dos fatores decisivos na escolha desta bacia para testes do modelo, foi principalmente a disponibilidade de dados de chuvas e vazões obtidos respectivamente através da Light-Serviços de Eletricidade e relatório do Grupo Meco-Caeeb, dados estes cuja qualidade se refletiu nos bons resultados obtidos.

4.2 - ESCOLHA DOS PARÂMETROS INICIAIS

Conforme descrito no Capítulo III, ítem 3.3, a avaliação inicial dos parâmetros C(J) seguiu o esquema apresentado neste ítem.

Entretanto cabe aqui enfatizar que o melhor critério para ajustamento dos parâmetros, consiste na análise de saídas anteriores do programa. Assim apresentamos na Tabela 3 a seguir,

os valores de C(J) considerados ótimos após várias corridas do programa e obtidos através da aplicação do modelo para um período de três anos, selecionados através da observação visual do comportamento chuva x vazões e que foi de outubro de 1948 a setembro de 1951.

T A B E L A 3

Valores iniciais dos parâmetros C(J) para testes de sensibilidade.

Período de aferição - out/1948 a set/1951

C(1)	0.16	C(5)	1.00	C(9)	50
C(2)	1.35	C(6)	1.10	C(10)	60
C(3)	3395	C(7)	0.70	C(11)	90
C(4)	3.92	C(8)	0.14	C(12)	30
-	-	-	-	C(13)	0.74

A fim de facilitar a avaliação das grandezas a serem fornecidas ao programa no primeiro mês da simulação, especialmente a descarga base, o período de aferição foi considerado iniciando-se, em outubro, mês admitido como início do ano hidrológico, de forma a se poder avaliar C(14) que é a descarga base no primeiro mês com relativa facilidade. Assim C(14) foi admitido igual a 10 mm/mês.

Os valores de C(15) e C(16) correspondendo respectivamente a umidade da camada superior e inferior do solo no pri

meiro mês de simulação, foram obtidos através de resultados do modelo quando da utilização para quarenta anos de dados (1931/1970), os quais incluíam os três anos de aferição. Assim C(15) foi considerado igual a 60 mm enquanto que C(16) igual a 10 mm .

Com relação aos valores de C(14) , C(15) e C(16), deve-se mencionar ainda, que em testes de sensibilidade verificou-se que quaisquer que sejam os valores adotados, estes somente terão influências nos cálculos até o segundo ou terceiro mês da simulação, não tendo portanto qualquer influência nos meses subsequentes.

Na bacia em estudo foram considerados oito postos pluviométricos e através do traçado dos polígonos de Thiessen foram determinados os pesos de cada posto e que são apresentados na Tabela 4 a seguir:

T A B E L A 4

Peso dos postos pluviométricos - Método de Thiessen

C(17)	0.180	C(21)	0.121
C(18)	0.183	C(22)	0.125
C(19)	0.120	C(23)	0.067
C(20)	0.103	C(24)	0.101

4.3 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS

Com o objetivo de analisar o comportamento do modelo ao se variar um determinado parâmetro, foram realizados alguns testes de sensibilidade os quais serão apresentados neste item e sempre utilizando os três anos de dados referidos no item 4.2 .

Assim foram programados dois tipos de testes. O primeiro consistiu em se dar uma variação brusca no valor inicial de cada parâmetro e pesquisar o comportamento deste ao final de 50 iterações (JC = 50) e tendo JD = 10 . O segundo tipo diferiu do primeiro apenas pelo fato de ao invés de pesquisar apenas o parâmetro alterado, pesquisou todos os 13 parâmetros.

Desta forma foram realizadas 26 corridas do programa para cada tipo de teste, correspondendo 13 delas a variações dos parâmetros por valores superiores e 13 para variações por valores inferiores em relação aos valores considerados ótimos e apresentados no ítem 4.2 .

4.3.1 - Análise Individual dos Parâmetros

Nas tabelas do tipo 5 e 6 apresentadas a seguir, são mostrados os resultados do primeiro tipo de teste, sendo que nas tabelas tipo 5 as variações foram por valores superiores enquanto que nas tabelas tipo 6 por valores inferiores, com relação aos valores considerados ótimos. Para facilitar a análise destas tabelas, em cada caso destacamos na própria tabela os valores em estudo.

As tabelas tanto do tipo 5, quanto do tipo 6, foram sub-divididas em três a saber: Tabelas 5-A, 5-B e 5-C e Tabelas 6-A, 6-B e 6-C. Nas tabelas com índices A são apresentados os resultados da análise dos parâmetros referentes ao cálculo do escoamento superficial direto. Nas tabelas com índices B são apresentados os resultados da análise dos parâmetros referentes ao cálculo da evapotranspiração e finalmente nas tabelas com índices C são

mostrados os resultados da análise dos parâmetros referentes ao cálculo da infiltração e escoamento base.

3 Diremos daqui por diante que um parâmetro é sensível, quando a alteração de seu valor inicial em relação ao valor ótimo conduzir, no final do processo de auto-otimização, a valores diferentes do ótimo e vice-versa.

Assim, se tomarmos as Tabelas 5-A e 6-A, verificamos que os parâmetros relativos ao cálculo do escoamento superficial direto não se mostraram sensíveis a este tipo de teste, uma vez que ao final do processo iterativo de auto-otimização, retornaram praticamente aos seus valores iniciais, demonstrando neste caso eficiência no processo de otimização utilizado.

Na Tabela 5-B verificamos que os parâmetros envolvidos mostraram-se sensíveis a este tipo de teste, pois nenhum deles retornou ao seu valor inicial, e pela análise do coeficiente de correlação e a soma dos valores absolutos dos desvios entre as vazões calculadas e observadas, concluímos que em nenhum caso foi atingido níveis de ajustamento iguais aos obtidos com os valores considerados ótimos.

Por outro lado na Tabela 6-B verificamos que todos os parâmetros analisados retornaram aos seus valores primitivos ao final de cada caso, demonstrando que pelo menos quando analisados isoladamente, os parâmetros envolvidos no cálculo da evapotranspiração devem ser avaliados inicialmente por valores inferiores aos reais, pois o modelo através da sua auto-otimização se encarrega de aproximá-los do valor real.

A análise das Tabelas 5-C e 6-C mostrou um comportamento de certa forma irregular dos parâmetros relativos ao cálculo da infiltração. Assim cada parâmetro mereceu uma análise particular.

O parâmetro C(9) não se mostrou sensível a variações nem por valores superiores nem por valores inferiores ao real, de vez que em ambos os casos o valor final de convergência foi praticamente o mesmo e igual ao valor ótimo.

O parâmetro C(10) mostrou-se insensível a variações por valores superiores uma vez que ao final do processo de auto-otimização assumiu praticamente o valor inicial considerado ótimo. Com relação à análise de variação de C(10) por valores inferiores, o mesmo não ocorreu de vez que o valor do parâmetro ao final do processo de otimização era bastante diferente do valor considerado ótimo, e a análise do coeficiente de correlação e a soma dos desvios não indicava resultados de ajustamento melhores que os obtidos com os valores considerados ótimos.

O parâmetro C(11) mostrou-se insensível a variações por valores inferiores pois assumiu o valor considerado ótimo ao final do processo de otimização. Entretanto a análise de variação por valores superiores demonstrou que o modelo se perdeu, não conseguindo chegar ao valor ótimo, o que se pode observar também pela análise do coeficiente de correlação e a soma dos desvios.

O parâmetro C(12) mostrou-se neste tipo de análise, insensível a variações por valores superiores, assumindo ao final do processo de otimização o valor ótimo, porém a análise de variação por valores inferiores mostrou-se deficiente de vez que

além de não se ter atingido o valor ótimo, o coeficiente de correlação e a soma dos desvios indicaram sensível abaixamento do nível de ajustamento.

O parâmetro relativo ao cálculo da contribuição do lençol freático C(13), mostrou-se insensível a variações por valores superiores, o mesmo não ocorrendo para variações por valores inferiores.

Para se ter uma idéia do tempo de computação gasto nesta análise que correspondeu a 26 corridas do programa, cada qual com três anos de dados, um computador IBM/370 modelo 145 gastou cerca de 7 minutos entre entrada do programa e impressão de todos os resultados.

4.3.2 - Análise dos Parâmetros em Conjunto

Analogamente ao apresentado no item 4.3.1, as Tabelas 8 e 9 mostram os resultados obtidos na análise de sensibilidade dos parâmetros em conjunto. As tabelas tipo 8 apresentam os resultados para variações dos parâmetros por valores superiores, enquanto que as tabelas tipo 9 apresentam os resultados para variações dos parâmetros por valores inferiores aos considerados ótimos.

A análise dos parâmetros em conjunto apresenta certa dificuldade, uma vez que em cada um dos 26 casos testados, foram pesquisados valores ótimos dos 13 parâmetros, o que conduziu muitas vezes a valores finais bastante diferentes dos ótimos em vários parâmetros de um mesmo caso.

TABELA 5-A

**ANÁLISE INDIVIDUAL DOS PARÂMETROS C(J)
PERÍODO ANALISADO - OUT/1948 A SET/1951**

	C(1)	C(2)	C(3)	C(4)	C(5)	C(6)	C(7)	C(8)	C(9)	C(10)	C(11)	C(12)	C(13)	COEF. COR.	SD
VALORES OTIMIZADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.984	130

VALORES TESTADOS	0.32	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.809	414
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.984	130

VALORES TESTADOS	0.16	2.70	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	-	478
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.984	131

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	800	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.869	314
VALORES FINAIS	0.16	1.35	396	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.983	130

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	6.00	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.943	233
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.983	130



TABELA 6-A

ANÁLISE INDIVIDUAL DOS PARÂMETROS C(J)
PERÍODO ANALISADO - OUT/1948 A SET/1951

	C(1)	C(2)	C(3)	C(4)	C(5)	C(6)	C(7)	C(8)	C(9)	C(10)	C(11)	C(12)	C(13)	COEF. COR.	SD
VALORES OTIMIZADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.984	130

VALORES TESTADOS	0.08	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.954	217
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.983	130

VALORES TESTADOS	0.16	0.68	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.837	344
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.984	130

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	200	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.521	456
VALORES FINAIS	0.16	1.35	397	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.983	130

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	2.00	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.582	464
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.94	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.983	130

- 59 -

3

TABELA 5-B

**ANÁLISE INDIVIDUAL DOS PARÂMETROS C(J)
PERÍODO ANALISADO-OUT/1948 A SET/1951**

	C (1)	C (2)	C (3)	C (4)	C (5)	C (6)	C (7)	C (8)	C (9)	C (10)	C (11)	C (12)	C (13)	COEF. COR.	SD
VALORES OTIMIZADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.984	130
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.50	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.972	169
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.19	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.982	137
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	2.20	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.941	203
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	2.21	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.941	203
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	1.40	0.14	50	60	90	30	0.74	0.980	151
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	1.05	0.14	50	60	90	30	0.74	0.982	135
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.28	50	60	90	30	0.74	0.982	134
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.28	50	60	90	30	0.74	0.982	134

- 60 -



TABELA 6-B

ANÁLISE INDIVIDUAL DOS PARÂMETROS C(J)

PERÍODO ANALISADO - OUT/1948 A SET/1951

	C (1)	C (2)	C (3)	C (4)	C (5)	C (6)	C (7)	C (8)	C (9)	C (10)	C (11)	C (12)	C (13)	COEF. COR.	SD
VALORES OTIMIZADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.984	130
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	0.50	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.795	379
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.980	130
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	0.55	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.566	556
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.984	130
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.35	0.14	50	60	90	30	0.74	0.979	156
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.983	130
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.07	50	60	90	30	0.74	0.977	162
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.983	130

TABELA 5-C
ANÁLISE INDIVIDUAL DOS PARÂMETROS C(J)
PERÍODO ANALISADO-OUT/1948 A SET/1951

	C (1)	C (2)	C (3)	C (4)	C (5)	C (6)	C (7)	C (8)	C (9)	C (10)	C (11)	C (12)	C (13)	COEF. COR.	SD
VALORES OTIMIZADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.984	130

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	100	60	90	30	0.74	0.889	364
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	49	60	90	30	0.74	0.984	129

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	120	90	30	0.74	0.959	223
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	61	90	30	0.74	0.984	129

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	180	30	0.74	0.979	160
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	190	30	0.74	0.982	139

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	60	0.74	0.973	173
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	31	0.74	0.983	133

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	1.00	0.929	265
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.75	0.983	134



TABELA 6-C
ANÁLISE INDIVIDUAL DOS PARÂMETROS C(J)
PERÍODO ANALISADO-OUT/1948 A SET/1951

	C(1)	C(2)	C(3)	C(4)	C(5)	C(6)	C(7)	C(8)	C(9)	C(10)	C(11)	C(12)	C(13)	COEF. COR.	SD
VALORES OTIMIZADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.984	130

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	25	60	90	30	0.74	0.941	263
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.984	130

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	30	90	30	0.74	0.975	181
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	45	90	30	0.74	0.982	148

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	45	30	0.74	0.974	165
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.984	130

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	15	0.74	0.977	154
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	15	0.74	0.979	146

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.10	0.954	263
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.58	0.980	161

- 63 -



Verificou-se através da análise das tabelas 8 e 9 que na maioria das vezes a gama de variação dos valores finais de cada parâmetro, apresentava valores extremos exatamente quando o parâmetro em questão sofria variações bruscas nos seus valores iniciais, demonstrando portanto, que na otimização simultânea de todos os parâmetros, a maioria destes mostrava-se sensível a variações de seus valores iniciais, excessão que pode ser feita aos parâmetros C(1) e C(13) .

Para se ter uma idéia mais clara do problema, procuramos reproduzir na Tabela 7 apresentada a seguir um resumo das Tabelas 8 e 9 .

Assim na primeira coluna são apresentados os valores finais assumidos por cada parâmetro quando seus próprios valores iniciais sofriam variações bruscas respectivamente por valores superiores e inferiores em relação ao valor ótimo.

Na segunda coluna é apresentada a faixa de variação pesquisada nos 26 casos simulados, excetuando-se o caso do próprio parâmetro sofrer variações bruscas de seus valores iniciais.

Finalmente na terceira coluna são apresentados os valores ótimos para efeito de comparações com as duas primeiras colunas.

T A B E L A 7

Análise de variação dos parâmetros C(J)

PARÂMETROS	VALORES FINAIS PARA VARIÂÇÕES NO PRÓPRIO PARÂMETRO	VALORES FINAIS PARA VARIÂÇÕES NOS DEMAIS PARÂMETROS	VALORES ÓTIMOS DOS PARÂMETROS
C(1)	0.19 - 0.12	0.19 - 0.15	0.16
C(2)	2.03 - 1.01	1.63 - 1.12	1.35
C(3)	719 - 242	578 - 326	395
C(4)	5.89 - 2.42	5.47 - 3.24	3.92
C(5)	1.50 - 0.62	1.33 - 0.90	1.00
C(6)	1.50 - 0.85	1.21 - 1.00	1.10
C(7)	1.40 - 0.47	0.95 - 0.53	0.70
C(8)	0.26 - 0.09	0.22 - 0.11	0.14
C(9)	83 - 33	60 - 43	50
C(10)	108 - 35	80 - 50	60
C(11)	168 - 76	138 - 82	90
C(12)	50 - 15	37 - 25	30
C(13)	0.78 - 0.62	0.82 - 0.63	0.74

Se observarmos agora a Tabela 7, podemos tirar as seguintes conclusões:

- a - os parâmetros C(1) e C(13) demonstraram bom desempenho quando analisados em conjunto com os demais, quaisquer que sejam os parâmetros alterados inicialmente.
- b - os parâmetros C(3) , C(4) , C(8) e C(11) , quando analisados em conjunto com os demais, mostraram-se sensíveis a variações, quaisquer que sejam os parâmetros alterados inicialmente.

c - os parâmetros C(2) , C(5) , C(6) , C(7),C(9) , C(10) e C(12) mostraram-se sensíveis a variação quando isoladamente cada um sofreu alterações em seus valores iniciais e demonstraram relativamente bom desempenho quando os parâmetros alterados inicialmente eram outros que não eles próprios.

Estas conclusões entretanto, referem-se apenas à análise dos valores extremos assumidos pelos parâmetros C(J).

Se fizermos agora uma análise das Tabelas 8 e 9, desprezando-se os valores extremos assumidos por C(J) já então analisados, podemos constatar que de certa forma os valores finais permaneceram em torno dos valores iniciais na maioria dos casos.

A análise de variação do coeficiente de correlação e da soma dos desvios, indicou níveis de ajustamentos bastante bons uma vez que nas 26 corridas do programa a gama de variação do coeficiente de correlação foi de 0.975 a 0.987, correspondendo respectivamente a uma variação de 153 a 120 para a soma dos desvios.

O tempo de computação gasto neste tipo de teste atingiu 67 minutos em um computador IBM/370 modelo 145, correspondendo ao tempo total gasto desde a entrada do programa até a saída com os resultados.

4.4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DE EXTENSÃO

Tendo em vista a disponibilidade de 40 anos de dados de chuvas e vazões na Bacia do Alto Tietê em Pirapora, foram programados quatro casos de extensão de dados.

No caso A utilizou-se os 30 primeiros anos de dados

TABELA 8-A

ANÁLISE EM CONJUNTO DOS PARÂMETROS C(J)

□ PERÍODO ANALISADO - OUT/1948 A SET/1951

	C (1)	C (2)	C (3)	C (4)	C (5)	C (6)	C (7)	C (8)	C (9)	C (10)	C (11)	C (12)	C (13)	COEF. COR.	SD
VALORES OTIMIZADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.984	130
VALORES TESTADOS	0.32	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.809	414
VALORES FINAIS	0.19	1.48	513	4.31	1.10	1.00	0.77	0.14	45	80	109	27	0.73	0.982	136
VALORES TESTADOS	0.16	2.70	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	-	1478
VALORES FINAIS	0.16	2.03	578	5.47	1.33	1.15	0.70	0.22	60	55	120	25	0.67	0.982	130
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	800	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.869	314
VALORES FINAIS	0.17	1.63	719	3.56	1.01	1.09	0.70	0.15	50	65	95	30	0.71	0.981	132
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	6.00	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.943	233
VALORES FINAIS	0.18	1.63	405	5.89	1.00	1.10	0.72	0.14	52	55	112	37	0.65	0.985	122

TABELA 9-A

**ANÁLISE EM CONJUNTO DOS PARÂMETROS C(J)
PERÍODO ANALISADO-OUT/1948 A SET/1951**

	C (1)	C (2)	C (3)	C (4)	C (5)	C (6)	C (7)	C (8)	C (9)	C (10)	C (11)	C (12)	C (13)	COEF. COR.	SD
VALORES OTIMIZADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.984	130
VALORES TESTADOS	0.08	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.954	217
VALORES FINAIS	0.12	1.35	445	3.24	0.91	1.13	0.73	0.12	50	60	109	30	0.71	0.977	150
VALORES TESTADOS	0.16	0.68	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.837	344
VALORES FINAIS	0.19	1.01	326	3.87	0.91	1.00	0.75	0.17	45	73	120	33	0.65	0.982	136
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	200	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.521	456
VALORES FINAIS	0.18	1.12	242	5.22	1.21	1.10	0.66	0.16	55	66	94	33	0.71	0.983	131
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	2.00	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.582	464
VALORES FINAIS	0.15	1.23	478	2.42	1.20	1.09	0.70	0.15	55	59	99	33	0.73	0.980	138



TABELA 8-B

**ANÁLISE EM CONJUNTO DOS PARÂMETROS C(J)
PERÍODO ANALISADO - OUT/1948 A SET/1951**

	C (1)	C (2)	C (3)	C (4)	C (5)	C (6)	C (7)	C (8)	C (9)	C (10)	C (11)	C (12)	C (13)	COEF. COR.	SD
VALORES OTIMIZADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.984	130

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.50	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.972	169
VALORES FINAIS	0.18	1.35	359	3.92	1.50	1.05	0.60	0.13	48	55	90	30	0.74	0.984	124

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	2.20	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.941	203
VALORES FINAIS	0.15	1.35	379	3.92	0.90	1.50	0.87	0.15	59	59	99	30	0.68	0.975	153

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	1.40	0.14	50	60	90	30	0.74	0.980	151
VALORES FINAIS	0.18	1.35	405	4.21	1.00	1.05	1.40	0.15	50	60	90	30	0.75	0.983	129

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.28	50	60	90	30	0.74	0.982	134
VALORES FINAIS	0.16	1.35	422	3.92	1.00	1.05	0.77	0.26	50	60	99	30	0.75	0.984	125



TABELA 9-B

**ANÁLISE EM CONJUNTO DOS PARÂMETROS C(J)
PERÍODO ANALISADO-OUT/1948 A SET/1951**

	C (1)	C (2)	C (3)	C (4)	C (5)	C (6)	C (7)	C (8)	C (9)	C (10)	C (11)	C (12)	C (13)	COEF. COR.	SD
VALORES OTIMIZADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.984	130
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	0.50	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.795	379
VALORES FINAIS	0.16	1.20	435	3.92	0.62	1.21	0.77	0.17	43	66	90	33	0.63	0.979	142
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	0.55	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.566	556
VALORES FINAIS	0.18	1.23	435	3.74	0.95	0.85	0.95	0.22	45	66	97	36	0.74	0.980	133
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.35	0.14	50	60	90	30	0.74	0.979	156
VALORES FINAIS	0.16	1.29	377	3.92	1.00	1.15	0.47	0.11	45	60	99	31	0.68	0.985	132
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.07	50	60	90	30	0.74	0.977	162
VALORES FINAIS	0.16	1.35	395	4.06	1.02	1.14	0.69	0.09	45	53	100	29	0.73	0.985	129



TABELA 8-C
ANÁLISE EM CONJUNTO DOS PARÂMETROS C(J)
PERÍODO ANALISADO-OUT/1948 A SET/1951

	C (1)	C (2)	C (3)	C (4)	C (5)	C (6)	C (7)	C (8)	C (9)	C (10)	C (11)	C (12)	C (13)	COEF. COR.	SD
VALORES OTIMIZADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.984	130
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	100	60	90	30	0.74	0.889	364
VALORES FINAIS	0.17	1.35	334	4.31	1.21	1.21	0.67	0.17	83	73	109	33	0.67	0.979	140
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	120	90	30	0.74	0.959	223
VALORES FINAIS	0.16	1.35	435	3.94	1.09	1.00	0.77	0.15	60	108	120	30	0.82	0.980	130
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	180	30	0.74	0.979	160
VALORES FINAIS	0.16	1.35	414	3.92	1.02	1.10	0.66	0.15	45	60	168	33	0.70	0.987	120
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	60	0.74	0.973	173
VALORES FINAIS	0.17	1.35	417	3.97	0.99	1.01	0.83	0.19	50	59	138	50	0.79	0.981	125
VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	1.00	0.929	265
VALORES FINAIS	0.17	1.35	442	3.94	1.05	1.02	0.73	0.17	46	66	82	30	0.78	0.981	126

- 71 -



TABELA 9-C
ANÁLISE EM CONJUNTO DOS PARÂMETROS C(J)
PERÍODO ANALISADO- OUT/1948 A SET/1951

	C (1)	C (2)	C (3)	C (4)	C (5)	C (6)	C (7)	C (8)	C (9)	C (10)	C (11)	C (12)	C (13)	COEF. COR.	SD
VALORES OTIMIZADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.74	0.984	130

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	25	60	90	30	0.74	0.941	263
VALORES FINAIS	0.17	1.37	435	4.31	1.00	1.10	0.53	0.16	33	50	109	27	0.67	0.982	127

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	30	90	30	0.74	0.975	181
VALORES FINAIS	0.16	1.35	359	4.31	1.21	1.10	0.93	0.15	45	35	120	30	0.72	0.986	121

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	45	30	0.74	0.974	165
VALORES FINAIS	0.17	1.35	395	4.31	1.00	1.00	0.93	0.20	50	60	76	27	0.77	0.984	121

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	15	0.74	0.977	154
VALORES FINAIS	0.16	1.35	438	3.87	1.01	1.21	0.70	0.14	45	66	90	15	0.73	0.983	128

VALORES TESTADOS	0.16	1.35	395	3.92	1.00	1.10	0.70	0.14	50	60	90	30	0.10	0.954	263
VALORES FINAIS	0.18	1.23	435	3.92	0.90	1.05	0.67	0.14	45	60	82	30	0.62	0.981	142



para ajustamento dos parâmetros e os 10 anos seguintes para extensão de dados.

No caso B foram utilizados os 20 primeiros anos para ajustamento e os 20 anos subseqüentes para extensão.

No caso C utilizou-se os 10 primeiros anos para ajustamento dos parâmetros e os 30 anos seguintes para extensão de dados.

Finalmente no caso D utilizou-se 3 anos para ajustamento dos parâmetros (os mesmos utilizados na análise de sensibilidade dos parâmetros), e a extensão de dados foi para os 40 anos disponíveis.

Como na realidade se dispunha de 40 anos de dados de vazões, em cada caso determinou-se o coeficiente de correlação entre a série estendida e a realmente verificada. Na Tabela 10 são apresentados esses valores, assim como os coeficientes de correlação obtidos na fase de ajustamento dos parâmetros.

Os valores iniciais dos parâmetros $C(J)$ utilizados na fase de ajustamento para todos os quatro casos acima enumerados, são os valores finais obtidos para o período de outubro de 1948 a setembro de 1951 e apresentados no Capítulo IV ítem 4.2.

No final deste capítulo é apresentado ainda para cada um dos quatro casos de extensão, gráficos mostrando a dispersão dos valores de vazões calculadas e observadas em torno da reta teórica de equação

$$Q_{\text{CALC}} = Q_{\text{OBS}}$$

T A B E L A 10

AJUSTAMENTO DOS PARÂMETROS C(J)				EXTENSÃO DE DADOS		
CASOS	Nº DE ANOS	PERÍODO	COEF. COR.	Nº DE ANOS	PERÍODO	COEF. COR.
A	30	JAN/31-DEZ/60	0.911	10	JAN/61-DEZ/70	0.928
B	20	JAN/31-DEZ/50	0.923	20	JAN/51-DEZ/70	0.910
C	10	JAN/31-DEZ/40	0.931	30	JAN/41-DEZ/70	0.906
D	3	OUT/48-SET/51	0.984	40	JAN/31-DEZ/70	0.906

A análise destes gráficos, assim como dos valores dos coeficientes de correlação na fase de extensão de dados apresentados na Tabela 10, mostram o bom funcionamento do modelo em apreço.

Foram entretanto observadas algumas vezes defazagem nos picos entre as vazões calculadas e observadas, atribuindo-se isto a possíveis concentrações de chuvas ao final do mês, o que não é considerado no modelo e que evidentemente refletem na vazão observada no mês seguinte.

Em outras vezes observou-se sensíveis diferenças entre as vazões calculadas e observadas, e que podem ser atribuídas além das deficiências próprias do modelo, a erros de medição das vazões observadas, a amostragens deficientes das chuvas e principalmente ao efeito de distribuição temporal da chuva mensal.

Verifica-se que uma mesma altura pluviométrica mensal produzirá vazões diferentes, conforme ela seja bem distribuída ao longo do mês ou concentrada em curtos intervalos de tempo. Ora

uma chuva concentrada no tempo deverá provocar um valor alto para o escoamento superficial direto e baixo para a infiltração, conduzindo a valores altos para a vazão no mês. Por outro lado uma chuva bem distribuída ao longo do mês deverá produzir valores mais baixos para o escoamento superficial direto e altos para a infiltração, conduzindo portanto a vazões menores neste mês e maiores nos meses seguintes devido ao aumento da contribuição do lençol subterrâneo.

Em anexo apresentamos ainda a título de ilustração, apenas para o caso A da aplicação do modelo para extensão de dados, um gráfico dos hidrogramas de vazões calculadas e observadas, escoamento base e o correspondente gráfico de chuvas em forma de hietógrafas. A apresentação deste gráfico foi feita apenas para o caso A, uma vez que os resultados para os casos B, C e D eram semelhantes e portanto o trabalho ficaria sobrecarregado de desenhos desnecessariamente.

4.5 - ANÁLISE COMPARATIVA COM O MODELO ORIGINAL

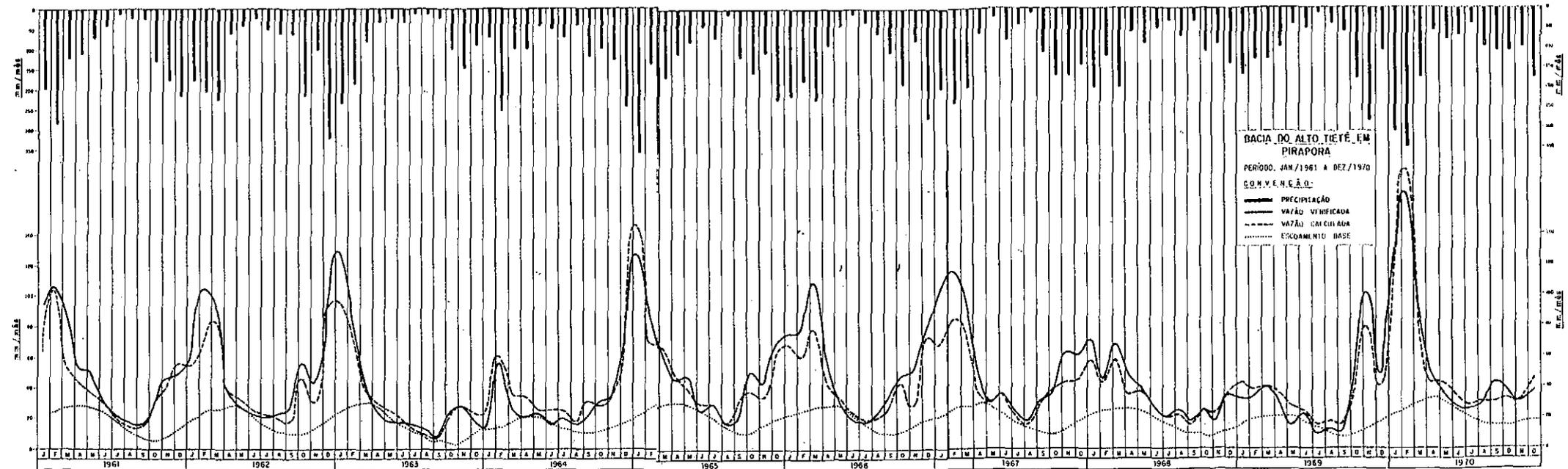
Neste item procuraremos destacar as principais diferenças entre o modelo original [1] e o modificado, mostrando as vantagens da introdução de cada uma.

No cálculo do escoamento superficial direto o modelo utilizava inicialmente apenas dois parâmetros, ao passo que agora uma maior flexibilidade é dada a este cálculo com a introdução de mais dois parâmetros, um indicativo da percentagem de área impermeável da bacia e outro dando possibilidades a variações no expoente de P na expressão, que anteriormente era fixado.

A separação do solo em duas camadas independentes , permitiu uma maior aproximação do modelo à realidade física, uma vez que foi possível retirar da camada superior do solo a evapotranspiração da parte superficial deste e dos vegetais de raízes pouco profundas, e da camada inferior do solo a evapotranspiração dos vegetais de raízes profundas. O modelo original por possuir apenas uma camada de solo, retirava desta a evapotranspiração do solo e dos vegetais de raízes pouco profundas, e do lençol subterrâneo a evapotranspiração dos vegetais de raízes profundas.

Para as duas camadas do solo, o cálculo das perdas por evapotranspiração foi simplificado admitindo-se no modelo modificado variações lineares, proporcionais ou a unidade do solo ou a valores das evapotranspirações potenciais para cada mês. O modelo original admitia variações não lineares, tornando portanto o cálculo mais complexo e nem por isso mais preciso.

Uma desvantagem do modelo modificado em relação ao original, consistiu no aumento do número de parâmetros que passou de 10 para 13, entretanto as vantagens obtidas com as alterações no nosso entender superam as desvantagens de se ter 3 parâmetros a mais.



V - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O modelo hidrológico para extensão de dados estudado e apresentado neste trabalho, forneceu bons resultados na aplicação feita à Bacia do Alto Tietê em Pirapora e que são apresentados no ítem 4.4 do Capítulo IV.

No desenvolvimento do trabalho, foram apresentados e discutidos vários aspectos sob o ponto de vista hidrológico e computacional do modelo e a análise dos resultados nos levou às seguintes conclusões:

- 1 - os resultados obtidos do modelo tanto na fase de ajustamento dos parâmetros, como na fase de extensão de dados serão tanto melhores quanto mais confiáveis forem os dados básicos utilizados.
- 2 - os níveis de ajustamento serão tanto melhores quanto mais próximos da realidade forem os valores iniciais atribuídos aos parâmetros $C(J)$ para início do processo de auto-otimização.
- 3 - o modelo não leva em consideração as tendências da série histórica de vazões devido a variação do tipo de cobertura do solo ao longo do tempo, ajustando os parâmetros para condições médias ao longo do período de ajustamento.
- 4 - o modelo não leva em consideração os efeitos provocados pela chuva caída nos últimos dias de um mês, na vazão do mês seguinte.
- 5 - o modelo dá igual importância às vazões altas e baixas apresentando aproximadamente o mesmo erro relatiu

vo no cálculo tanto de uma como de outra.

- 6 - o critério utilizado pelo modelo na auto-otimização dos parâmetros $C(J)$ apresenta deficiência uma vez que sendo fixado o número de iterações para ajustamento dos parâmetros $C(J)$ e definido o critério de convergência (fixado o valor de JD), pode ocorrer o caso de determinados parâmetros convergirem para valores diferentes dos ótimos.

Tendo em vista as conclusões apresentadas e objetivando dar subsídios para a continuidade dos estudos, algumas recomendações fazem-se necessárias, como as que se seguem:

- 1 - a aplicação do modelo deve sempre ser precedida de uma análise de consistência dos dados a fim de eliminar os valores discrepantes que podem distorcer os resultados.
- 2 - os valores iniciais dos parâmetros $C(J)$ devem ser criteriosamente avaliados para início do processo de auto-otimização.
- 3 - para se assegurar das boas qualidades do modelo, é considerado imprescindível a aplicação deste a outras bacias particularmente as que possuam características fisiográficas bastante diferentes da estudada neste trabalho.
- 4 - a reestruturação do critério utilizado pelo modelo na auto-otimização dos parâmetros $C(J)$ deve ser realizada visando eliminar as deficiências referidas no item 6 das conclusões anteriormente citadas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PFAFSTETTER, OTTO: Modelo Matemático para Deflúvios Mensais, Revista "Saneamento", Nº 38 (1970), pag. 48-71
- [2] BONNÉ, JOCHANAN: Stochastic Simulation of Monthly Streamflow by a Multiple Regression Model Utilizing Precipitation Data, Journal of Hydrology, Nº 12 (1971), pag. 285-310
- [3] MATALAS, NICHOLAS e BARBARA JACOBS: A Correlation Procedure for Augmenting Hydrologic Data, U.S. Geological Survey, Prof. Paper 434-E, (1964), pag. E1-E7
- [4] LANGBEIN, W.B.: Hydrologic Networks and Methods, Flood Control Series Nº 15, World Meteorological Organization, ECAFE, United Nations, (1960), pag. 13-41
- [5] DISKIN, M.H.: Definition and Uses of the Linear Regression Model, Water Resources Research, Vol. 6, Nº 6, Dezembro (1970), pag. 1668-1673
- [6] DISKIN, M.H., N. BURAS e S. ZAMIR: Application of a Simple Hydrologic Model for Rainfall - Runoff Relations of the Dalton Watershed, Water Resources Research, Vol. 9, Nº 4, Agosto (1973), pag. 927-936
- [7] JOHNSTONE, D. e W.P. CROSS: Elements of Applied Hydrology, 276 pp., Ronald, New York, (1949)
- [8] LINSLEY, R.K., M.A. KOHLER e J.L.H. PAULHUS: Hydrology for Engineers, 340 pp., Mc Graw-Hill, New York (1958)

- [9] WILSON, E.M.: Engineering Hydrology, 182 pp., Macmillan, London (1969)
- [10] Hydrology Guide for Use in Watershed Planning, National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Supplement AA, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service
- [11] CONVÊNIO HIBRACE: Desenvolvimento Global dos Recursos Hídricos das Bacias do Alto Tietê e Cubatão - Plano Diretor de Obras, Vol. 1, Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo, Dezembro (1968).
- [12] GRUPO MECO-CAEEB: Updated Streamflow Records for Southeast Brazil, Vol. 1, ELETROBRÁS, Centrais Elétricas Brasileiras S.A., Maio (1972)
- [13] GRUPO MECO-CAEEB: Updated Streamflow Records for Southeast Brazil, Vol. 2, ELETROBRÁS, Centrais Elétricas Brasileiras S.A., Maio (1972)

A N E X O

C
C
C
C
C
C
C

PROGRAMA PARA CORRELACAO ENTRE CHUVAS E VAZÕES MENSAIS

```
INTEGER BRANCO,PW,DW,GW,AREA1(121),AREA2(121),
1 AREA3(51,101),AST
DIMENSION R(480),P(480),Q(480),D(480),EP(12),C(32),
1 FC(32),VG(480),MES(12)
DATA BRANCO,IW,PW,DW,GW,AST,MES/' ','I','O','C','G','*',
1 'JAN','FEV','MAR','ABR','MAI','JUN','JUL','AGO','SET',
2 'OUT','NOV','DEZ'/'
LR=5
LW=6
READ(LR,1)M,NP,MI,JA,JB,JC,JD,LC,CONV
READ(LR,2)(C(J),J=1,32)
READ(LR,2)(FC(J),J=1,32)
READ(LR,2)(EP(K),K=1,12)
1 FORMAT(8I5,F15.6)
2 FORMAT(10F5.0)
WRITE(LW,3)M,NP,MI,JA,JB,JC,JD,LC,CONV
3 FORMAT(1H1,////,18X,'M=',I3,4X,'NP=',I2,5X,'MI=',I2,5X,
1 'JA=',I2,5X,'JB=',I2,5X,'JC=',I2,5X,'JD=',I2,5X,'LC=',I2,
24X,'CONV=',F9.6////)
WRITE(LW,4)
4 FORMAT(39X,'VALDRES INICIAIS PARA OS PARAMETROS C(J)',////)
WRITE(LW,5)C(1),C(2),C(3),(J,C(J),J=4,8)
5 FORMAT(5X,'C( 1)=',F7.3,3X,'C( 2)=',F7.3,3X,'C( 3)=',F7.1,
15(3X,'C( ',I2,')=',F7.3)//)
DO 6 I=9,25,8
K=I+7
6 WRITE(LW,7)(J,C(J),J=I,K)
7 FORMAT(2X,8(3X,'C( ',I2,')=',F7.3)//)
WRITE(LW,8)
8 FORMAT(//,39X,'EVAPOTRANSPIRACOES POTENCIAIS',
1 ' CONSIDERADAS',////)
WRITE(LW,9)MES
9 FORMAT(11X,12A8,/)
WRITE(LW,10)EP
10 FORMAT(11X,12F8.1,////)
MF=M+MI-1
DO 11 I=1,MF
Q(I)=0.
11 P(I)=0.
```

C
C

```
C
C   CALCULO DA CHUVA MEDIA NA BACIA
C
C
C
12  DO 14 K=1,NP
    READ(LR,12)(R(I),I=1,MF)
    FORMAT(16X,12F5.1)
    DO 14 I=1,MF
      IF(R(I))14,13,13
13  Q(I)=Q(I)+C(K+16)
    P(I)=P(I)+C(K+16)*R(I)
14  CONTINUE
    DO 15 I=MI,MF
      P(I)=P(I)/Q(I)
15  Q(I)=0.
      IF(LC)62,16,62
16  READ(LR,17)(Q(I),I=1,MF)
17  FORMAT(20X,12F5.0)
    DO 18 I=1,MF
18  Q(I)=Q(I)*CDNV
      WRITE(LW,19)
19  FORMAT(//,16X,'SQ',15X,'SD',12X,'SQ2',14X,'CDR',13X,
    1'C(J)',11X,'FC(J)',6X,'J',//)
      NC=0
      SD=1.±15
      Q1=0.
      Q2=0.
      DO 20 I=MI,MF
        Q1=Q1+Q(I)
20  Q2=Q2+Q(I)**2
      C(JA)=C(JA)/FC(JA)
C
C
C   AJUSTAMENTO DOS PARAMETROS C(J)
C
C
C
    DO 59 NE=1,JC
    DO 59 J=JA,JB
      C(J)=C(J)*FC(J)
      SQ=0.
      SQ2=0.
      GA=C(14)
      HSA=C(15)
      HIA=C(16)
      HS=HSA
```

HI=HIA
K=MI
CS=C(10)**2
CI=C(12)**2
DO 44 I=MI,MF

C
C
C
C
C
C
C

BALANCO HIDRICO DA CAMADA SUPERIOR DO SOLO

LHS=0
BS=C(6)*EP(K)/C(5)
21 S=C(1)*P(I)+(1.-C(1))*(P(I)**C(2))/(P(I)**(C(2)-1.))+
1(C(3)/HS)**C(4)
IF(HS-BS)23,23,22
22 ES=C(6)*EP(K)
GO TO 24
23 ES=C(5)*HS
24 FS=C(9)*(HS**2)/(CS+HS**2)
HSB=HSA+P(I)-S-ES-FS
HSC=(HSA+HSB)/2.
IF(LHS-300)25,28,28
25 LHS=LHS+1
IF(ABS(HSC-HS)-10.)30,30,26
26 HS=(HS+HSC)/2.
IF(HS)27,21,21
27 HS=0.
GO TO 21
28 WRITE(LW,29)LHS
29 FORMAT(/,63X,'LHS=',I3,/))
30 HSA=HSB

C
C
C
C
C
C
C

BALANCO HIDRICO DA CAMADA INFERIOR DO SOLO

LHI=0
BI=C(8)*EP(K)/C(7)
31 IF(HI-BI)33,33,32
32 EI=C(8)*EP(K)
GO TO 34
33 EI=C(7)*HI
34 FI=C(11)*(HI**2)/(CI+HI**2)
HIB=HIA+FS-FI-EI

```
HIC=(HIA+HIB)/2.  
IF(LHI-300)35,38,38  
35 LHI=LHI+1  
IF(ABS(HIC-HI)-10.)40,40,56  
36 HI=(HI+HIC)/2.  
IF(HI)37,31,31  
37 HI=0.  
GO TO 31  
38 WRITE(LW,39)LHI  
39 FORMAT(//,63X,'LHI=',I3,//)  
40 HIA=HIB
```

C
C
C
C
C
C
C

CALCULO DA VAZAO MENSAL

```
GB=GA*C(13)+FI*(1.-C(13))  
D(1)=S+(GA+GB)/2.  
GA=GB  
IF(K-12)42,41,41  
41 K=1  
GO TO 43  
42 K=K+1
```

C
C
C
C
C
C
C

CALCULO DO COEFICIENTE DE CORRELACAO
ENTRE A SERIE DE VAZoes CALCULADA E OBSERVADA

```
43 SQ=SQ+ABS(D(1)-Q(1))  
44 SQ2=SQ2+(D(1)-Q(1))**2  
CORA=1.-SQ2/(Q2-Q1*Q1/M)  
IF(CORA)45,45,46  
45 COR=0.  
GO TO 47  
46 COR=SQRT(CORA)  
47 IF(NE-1)49,49,48  
48 IF(NE-JC)53,49,49  
49 WRITE(LW,50)SQ,SQ,SQ2,COR,C(J),FC(J),J  
50 FORMAT(9X,F11.2,6X,F11.2,4X,F11.2,5X,F11.4,6X,F11.4,4X,  
1F11.4,I7,//)  
IF(J-JB)53,51,51  
51 WRITE(LW,52)  
52 FORMAT(//)
```

```
53 IF(SQ-SD)55,54,54
54 C(J)=C(J)/FC(J)
   FC(J)=1./FC(J)
   GO TO 56
55 SD=SQ
56 NC=NC+1
   IF(NC-JD*(JB-JA+1))59,57,57
57 DO 58 L=JA,JB
58 FC(L)=SQRT(FC(L))
   NC=0
59 CONTINUE
   WRITE(LW,60)
60 FORMAT(////,41X,'VALORES FINAIS PARA OS PARAMETROS C(J)'
1,////)
   WRITE(LW,5)C(1),C(2),C(3),(J,C(J),J=4,8)
   DO 61 I=9,25,8
   K=1+7
61 WRITE(LW,7)(J,C(J),J=1,K)
62 WRITE(LW,63)
63 FORMAT(////,8X,'I',7X,'P(1)',8X,'S',8X,'E SUP',6X,
1'F SUP',6X,'H SUP',6X,'E INF',6X,'F INF',6X,'H INF',
28X,'G8',7X,'Q CALC',8X,'Q DBS',//)
   SP=0.
   SS=0.
   SES=0.
   SEI=0.
   SFS=0.
   SFI=0.
   SHS=0.
   SHI=0.
   SG=0.
   SC=0.
   SO=0.
```

C
C
C
C
C
C
C
C

SIMULACAO COM OS VALORES FINAIS DE C(J),
PARA O MESMO PERIODO UTILIZADO NA AFERICAO DO MODELO

```
GA=C(14)
HSA=C(15)
HIA=C(16)
HS=HSA
HI=HIA
K=MI
CS=C(10)**2
```

CI=C(12)**2
DO 86 I=M1,MF

C
C
C
C
C
C
C

BALANCO HIDRICO DA CAMADA SUPERIOR DO SOLO

LHS=0
BS=C(6)*EP(K)/C(5)
64 S=C(1)*P(I)+(1.-C(1))*(P(I)**C(2))/(P(I)**(C(2)-1.))+
1(C(3)/HS)**C(4))
IF(HS-BS)66,66,65
65 ES=C(6)*EP(K)
GO TO 67
66 ES=C(5)*HS
67 FS=C(9)*(HS**2)/(CS+HS**2)
HSB=HSA+P(I)-S*ES-FS
HSC=(HSA+HSB)/2.
IF(LHS-100)68,71,71
68 LHS=LHS+1
IF(ABS(HSC-HS)-1.)72,72,69
69 HS=(HS+HSC)/2.
IF(HS)70,64,64
70 HS=0.
GO TO 64
71 WRITE(LW,29)LHS
72 HSA=HSB

C
C
C
C
C
C
C

BALANCO HIDRICO DA CAMADA INFERIOR DO SOLO

LHI=0
BI=C(8)*EP(K)/C(7)
73 IF(HI-BI)75,75,74
74 EI=C(8)*EP(K)
GO TO 76
75 EI=C(7)*HI
76 FI=C(11)*(HI**2)/(CI+HI**2)
HIB=HIA+FS-FI-EI
HIC=(HIA+HIB)/2.
IF(LHI-100)77,80,80
77 LHI=LHI+1
IF(ABS(HIC-HI)-1.)81,81,78

```
78 HI=(HI+HIC)/2.  
IF(HI)79,73,73  
79 HI=C.  
GO TO 73  
80 WRITE(LW,99)LHI  
81 HIA=HIB
```

C
C
C
C
C
C
C

CALCULO DA VAZAO MENSAL

```
GB=GA*C(13)+FI*(1.-C(13))  
D(I)=S+(GA+GB)/2.  
GA=GB  
IF(K-12)82,82,82  
82 K=1  
GO TO 84  
83 K=K+1  
84 VG(I)=GB  
WRITE(LW,85)I,P(I),S,ES,FS,HS,EI,FI,HI,GB,D(I),Q(I)  
85 FORMAT(2X,I7,11F11.1,/) 
```

C
C
C
C
C
C
C

DETERMINACAO DE DADOS PARA VERIFICACAO

```
SP=SP+P(I)  
SS=SS+S  
SES=SES+ES  
SEI=SEI+EI  
SFS=SFS+FS  
SFI=SFI+FI  
SHS=SHS+HS  
SHI=SHI+HI  
SG=SG+GB  
SC=SC+D(I)  
86 SO=SO+Q(I)  
WRITE(LW,87)SP,SS,SES,SFS,SHS,SEI,SFI,SHI,SG,SC,SO  
87 FORMAT(////,55X,'SOMATORIO PARA VERIFICACAO',///,9X,11F11.1)
```

C
C
C
C
C

TRACADO DOS HIDROGRAMAS DE VAZoes CALCULADAS E OBSERVADAS ,
HIETOGRAFA E ESCUMAMENTO BASE

C
C
C

```
ESC=300.  
WRITE(LW,95)  
KM=M1-1  
DO 93 I=M1,MF  
DO 88 K=1,121  
AREA1(K)=BRANCO  
88 AREA2(K)=BRANCO  
IF(KM-12)90,89,89  
89 KM=1  
GO TO 91  
90 KM=KM+1  
91 AREA1(1)=IW  
AREA2(1)=IW  
IQ=(Q(1)/ESC)*120.+1.5  
ID=(D(1)/ESC)*120.+1.5  
IG=(VG(1)/ESC)*120.+1.5  
IP=121.-(P(1)/10.)  
AREA1(IQ)=PW  
AREA1(ID)=DW  
AREA2(IG)=GW  
DO 92 J=IP,121  
92 AREA1(J)=PW  
AREA1(121)=IW  
AREA2(121)=IW  
93 WRITE(LW,94)MES(KM),AREA1,AREA2  
94 FORMAT(3X,A3,3X,121A1,/,9X,121A1)  
WRITE(LW,95)  
95 FORMAT(1H1,//)
```

C
C
C
C
C
C
C

TRACADO DO GRAFICO DE VAZÕES CALCULADAS VERSUS OBSERVADAS

```
IF(LC)108,96,106  
96 DO 97 I=1,51  
AREA3(I,1)=PW  
DO 97 J=2,51  
97 AREA3(I,J)=BRANCO  
AREA3(1,51)=PW  
DO 98 J=2,51  
98 AREA3(51,J)=PW  
DO 99 K=M1,MF  
I=51-D(K)/4.+0.5
```

```
J=Q(K)/4.+1.5
99  AREA3(I,J)=AST
    DO 106 I=1,51
    1F(I-2)100,102,104
100  WRITE(LW,101)(AREA3(I,J),J=1,51)
101  FORMAT(32X,'VAZAG',3X,51A1)
    GO TO 106
102  WRITE(LW,103)(AREA3(I,J),J=1,51)
103  FORMAT(30X,'CALCULADA',1X,51A1)
    GO TO 106
104  WRITE(LW,105)(AREA3(I,J),J=1,51)
105  FORMAT(40X,51A1)
106  CONTINUE
    WRITE(LW,107)
107  FORMAT(/,84X,'VAZAG',/,82X,'OBSERVADA')
108  CALL EXIT
    END
```