UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

ISABEL KAUFMANN DE ALMEIDA

OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS NO AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DE ESCASSOS REGISTROS HIDROLÓGICOS

CAMPO GRANDE
2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

ISABEL KAUFMANN DE ALMEIDA

OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS NO AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DE ESCASSOS REGISTROS HIDROLÓGICOS

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, na área de concentração em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos

ORIENTADOR: Prof. Dr. Jorge Luiz Steffen

Aprovada em:

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jorge Luiz Steffen
Orientador - UFMS

Prof. Dr. Robert Schiaveto de Souza
UFMS

Prof. Dr. Silvio Bueno Pereira
UFGD

Campo Grande, MS
2009

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado
a minha filha Aleska, razão de tudo.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Jorge Luiz Steffen que, com grande competência e serenidade, orientou este trabalho.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Tecnologias Ambientais, pela oportunidade do aprendizado.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

Aos meus pais, pelo incentivo ao estudo, em especial à Mamãe (in memoriam), motivo de orgulho e exemplo a ser seguido.

A minha filha Aleska, grande amiga e incentivadora, pela revisão do texto e normatização.

E, finalmente, ao meu esposo Victor René, por .....tudo.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA ii
AGRADECIMENTOS iii
SUMÁRIO iv
LISTA DE FIGURAS vi
LISTA DE TABELAS vii
LISTA DE SIGLAS E ABRAVIATURAS viii
LISTA DE SÍMBOLOS ix
RESUMO xi
ABSTRACT xii
1. INTRODUÇÃO 1
2. OBJETIVOS 3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4
3.1 Considerações Gerais 4
3.2 Classificação de modelos 5
3.3 Modelos Hidrológicos 6
3.3.1 Transformação de chuva em vazão 6
3.4 O escoamento 9
3.4.1 Método do *Soil Conservation Service* – SCS 10
3.4.2 Equações de *Saint-Vénant* 12
3.4.2.1 Equações para escoamento nos planos 14
3.4.2.2 Equações para escoamento nos canais 15
3.5 Otimização de parâmetros de modelos hidrológicos 16
3.6 Métodos de otimização de parâmetros 18
3.6.1 Pesquisa Harmônica (*Harmony Search*) 20
4. METODOLOGIA 26
4.1 Escolha e descrição do local de estudo 26
4.2 Delineamento e caracterização física das sub-bacias 28
4.3 Identificação dos postos pluviométricos e determinação das áreas de influência na bacia 28
4.4 Levantamento dos tipos de solo e de sua utilização 30
4.5 Determinação preliminar dos valores do parâmetro Curva Número (CN) 32

4.6 Escolha de um método de otimização de parâmetros e elaboração de programa computacional para implementação 34
4.7 Escolha de um modelo de transformação de chuva em vazão e elaboração de programa para implementação 35
4.8 Levantamento dos dados pluvio-fluviométricos e escolha de eventos 36
4.9 Fase de ajuste dos modelos e funções objetivo 36
4.10 Fase de verificação dos parâmetros ajustados 38
4.11 Fase de simulação ou de utilização dos modelos 38
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 39
5.1 Escolha do método de otimização de parâmetros e elaboração de programa computacional do modelo de simulação 39
5.2 Escolha de um modelo de transformação de chuva em vazão e elaboração de programa para implementação 41
5.3 Levantamento dos dados pluvio-fluviométricos e escolha de eventos 42
5.4 Fase de ajuste dos modelos 43
5.5 Fase de verificação dos parâmetros ajustados 50
5.6 Fase de simulação ou de utilização dos modelos 53
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 54
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 56
ANEXOS 60
ANEXO A – Características físicas de canal e planos laterais 61
ANEXO B – Dados pluviométricos e fluviométricos 66
ANEXO C – Resultados de Ajustes dos parâmetros 70
ANEXO D – Gráficos dos ajustes 78
ANEXO E – Resultados de Ajustes para todos os eventos 85

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - Formas de Estruturas de Discretização 8

FIGURA 3.2 – Trecho de rio com planos retangulares e canais livres 14

FIGURA 3.3 – Estrutura da Memória Harmônica (HM) 22

FIGURA 3.4 – Esquema funcional da Pesquisa Harmônica 24

FIGURA 4.1 – Área de estudo 26

FIGURA 4.2 – Localização da área de estudo 27

FIGURA 4.3 – Polígono de Thiessen para postos influentes na bacia em estudo 29

FIGURA 4.4 – Carta do tipo de solo 31

FIGURA 4.5 – Carta do tipo de vegetação.....32

FIGURA 5.1 – Hietograma de chuva efetiva determinado pelo Método do

SCS para uma bacia 45

FIGURA 5.2 – Hidrogramas observado e calculado pelo Método do SCS para

o Evento 2ª..... 46

FIGURA 5.3 – Comparação dos melhores resultados de cada um dos três ajustes

da Tabela 5.9 48

FIGURA 5.4 – Resultado da simulação para o Evento 1 com os dados da

Tabela 5.11 51

FIGURA 5.5 – Resultado da verificação para o Evento 2 com os dados da

Tabela 5.11 para o Evento 1 51

FIGURA 5.6 – Resultado da verificação para o Evento 3 com os dados da

Tabela 5.11 para o Evento 1 52

FIGURA 5.7 – Resultado da verificação para o Evento 3 com alteração de

beta para 0,085 no Evento 1 52

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – Dados pluviométricos e fluviométricos influentes na bacia 30
TABELA 4.2 – Classificação quanto ao tipo de solo 33
TABELA 4.3 – Classificação quanto ao uso do solo 33
TABELA 4.4 – Composição dos tipos e usos do solo com os devidos valores de CN 34
TABELA 5.1 – Limites inferior e superior das variáveis para otimização 39
TABELA 5.2 – Valores gerados para as variáveis com Memória Harmônica
de 10 valores 40
TABELA 5.3 – Planilha "CN_1" referente à discretização em uma única bacia, para cálculo
da chuva efetiva 41
TABELA 5.4 – Escolha do evento e número de sub-bacias para a simulação.....42
TABELA 5.5 – Entrada dos dados de precipitação acumulada para cálculo
da chuva efetiva 43
TABELA 5.6 – Chuvas (mm) e vazões (m^3/s) observadas nos postos para o Evento 2ª ...44
TABELA 5.7 – Dados de entrada para geração das variáveis 44
TABELA 5.8 – Resultado da simulação para o Evento 2ª 45
TABELA 5.9 – Os 10 melhores resultados para três gerações distintas
do Evento 1 (NMH = 200; NIT =300;) com as cinco funções objetivo 47
TABELA 5.10 – Limites de valores iniciais para simulação 49
TABELA 5.11 – Resultados para os seis eventos com todas as funções 49
TABELA 5.12 – Resultados da convergência para os seis eventos
considerando variação inicial de 1 a 99 para CN, NMH =100, NIT = 100 50

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CN Curva Número

MDET Modelos Digitais de Elevação de Terreno

SGI Sistemas Geográficos de Informações

HS Pesquisa Harmônica (*Harmony Search*)

NRCS *National Resources Conservation Service*

SCS *Soil Conservation Service*

VBA *Visual Basic for Aplications*

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção molhada
b	Largura do canal
B	Sub-bacia
BCM	Bacia contribuinte de montante
d	Desnível entre curvas de nível
E	Evaporação
F_{obj}	Função objetivo
g	Aceleração da gravidade
HM	Memória harmônica
HMCR	Memória harmônica considerando a taxa
HMS	Número de vetores solução na memória harmônica
I_a	Perdas iniciais
i_e	Precipitação efetiva
L	Comprimento total das curvas de nível de cada lado da bacia
Ld	Comprimento do lado direito do plano
Le	Comprimento do lado esquerdo do plano
Ls	Comprimento do canal de drenagem
M	Módulo da bacia.
N	Número de variáveis de decisão
NCM	Número de contribuintes de montante
NIT	Número de iterações a realizar
Ni	Número de gerações no vetor solução
n_i	Coeficiente de rugosidade de Manning
nd	Coeficiente de rugosidade do plano à direita do canal
ne	Coeficiente de rugosidade do plano à esquerda do canal
ns	Coeficiente de rugosidade do canal
NMH	Número de conjunto de variáveis
NSB	Número de sub-bacias
ns	Coeficiente de rugosidade do canal
q	Vazão por unidade de largura
P	Precipitação

Par	Taxa de ajuste
Q	Vazão
q_1	Entrada ou saída de vazão, por unidade de largura de contribuição lateral
S	Capacidade máxima de retenção
Sd	Declividade do plano à direita
Se	Declividade do plano à esquerda
Ss	Declividade do canal
S_f	Declividade da linha de fricção
S_0	Declividade do fundo
t	Tempo
TSB	Tipo de sub-bacia
w_i	Peso referente à importância de cada uma das funções objetivo
x	Distância longitudinal
X_i	Range das variáveis
x_i^k	Variáveis de decisão
X	Sentido longitudinal do fluxo
y	Profundidade do escoamento
Ys	Profundidade do canal
β	Coeficiente de abstração inicial
$\boldsymbol{\theta_i}$	Declividade da bacia

RESUMO

A realização de estudos hidrológicos em bacias hidrográficas justifica-se pela necessidade de compreender-se o funcionamento do balanço hídrico, os processos que controlam o movimento da água e os impactos de mudanças do uso da terra sobre a quantidade e qualidade da água, sempre com o objetivo de planejar o uso das águas visando à própria sustentabilidade. Frequentemente, os projetos de aproveitamento de recursos hídricos recaem em locais com ausência de dados. Em tais situações, tem-se como alternativa de procedimento a formulação e aplicação de modelos hidrológicos. No entanto, tais modelos possuem parâmetros que necessitam ser otimizados. A otimização de parâmetros de modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão, associados às características físicas e geomorfológicas da bacia hidrográfica, torna esses modelos aplicáveis em locais sem dados ou com poucos dados. Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia para otimização de parâmetros físicos de um modelo matemático do tipo chuva-vazão, visando a obtenção de hidrogramas em sub-bacias sem medição. O modelo usa um algoritmo de otimização recentemente desenvolvido chamado Pesquisa Harmônica. Para a otimização dos parâmetros e validação do modelo, são utilizados dados pluviométricos e fluviométricos obtidos na bacia hidrográfica do Rio Aquidauana, drenada na seção da Ponte do Grego, no estado de Mato Grosso do Sul e dados de precipitação em sete (07) postos de observação influentes, além das informações sobre as características físicas das bacias.

Palavras-chave: *otimização, chuva-vazão, pesquisa harmônica*

ABSTRACT

The realization of hydrologics investigations on watersheds are justfied by the need to understand the functioning of the hydric balance, the processes that control the movement of the water and the impacts of changes of the lad use on water quality and quantity, with order to plan the use of the water having in view the sustainability. Often, the water resource utilization's designs fall in places with no data. In such situations, there is an alternative procedure for the formulation and application of the hydrologic models. However, such models have parameters that need to be optimized. The optimization of parameters of the hydrological rainfall-runoff models associated with physical and geomorphologic characteristics of the watershed, making these models apply in places with no data or limited data. This research developed a methodology for optimization of physical parameters of a rainfall-runoff mathematical model, to obtain hydrograph on sub-basins without measurement. The model uses a recently developed optimization algorithm: Harmony Search. For the optimization of parameters and validation of the model, are used stream flow and rainfall data obtained in the watershed of the River Aquidauana, drained in the section of the Ponte do Grego in the state of Mato Grosso do Sul and precipitation data from seven (07) station influential observation, in addition to information about the physical characteristics of the basins.

Keywords: *optimization, rainfall-runoff, harmony search.*

1 INTRODUÇÃO

Atualmente busca-se a conciliação entre a exploração da natureza e a sua conservação, possibilitando a preservação da vida em tempos futuros. Faz-se necessário o uso de maneira sustentável dos recursos naturais hoje disponíveis de modo a evitar sua exaustão, sendo a água o mais importante desses recursos.

A água é um recurso natural necessário às diversas atividades do homem e imprescindível à sua própria sobrevivência.

Por ser indispensável para a preservação da vida na Terra, esse recurso precisa ser bem gerenciado, pois tanto sua escassez quanto seu excesso pode causar grandes danos.

Estudos são desenvolvidos visando um melhor entendimento dos processos hidrológicos e o embasamento do uso da bacia hidrográfica.

"A bacia hidrográfica é uma área definida topograficamente, drenada por um curso de água ou um sistema conectado de cursos de água tal que toda vazão efluente seja descarregada através de uma única saída, a seção exutória" (Viessman *et al.*, 1972). "A bacia hidrográfica constitui um sistema físico extremamente complexo, em geral anisotrópico, heterogêneo e variável no tempo" (Barth *et al*., 1987).

A necessidade de se compreender o funcionamento do balanço hídrico e os processos que controlam o movimento da água justificam a realização de estudos em bacias hidrográficas. Em tais estudos, adota-se a bacia hidrográfica como unidade hidrológica, uma vez que suas características governam os processos de formação do escoamento. O entendimento do conjunto de processos físicos que ocorrem na bacia é indispensável para a interpretação dos resultados obtidos, suas limitações e sua aplicabilidade em outras regiões.

"A procura por novos métodos de modelação hidrológica, visando otimizar o planejamento de projetos na área de recursos hídricos, deve-se à preocupação com os efeitos resultantes da utilização inadequada desses recursos e aos custos associados" (Steffen, 1997).

Segundo Costa Neto (2005), visando subsidiar estudos de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, faz-se necessária a obtenção de dados que auxiliem na determinação das vazões em pontos de interesse.

"Devido à escassez de postos pluviométricos e fluviométricos, que forneçam uma série histórica de dados confiáveis, criam-se técnicas de modelagem que variam em sua complexidade, que vão desde os métodos empíricos até os modelos matemáticos. Tais

modelos podem ser usados para fazer previsões em áreas sem registro de dados, assumindo ajustes aceitáveis com base na topografia e uso do solo" (Chery et al., 1979).

"Os modelos matemáticos têm a finalidade de representar, o mais próximo possível da realidade, a estrutura e funcionamento dos sistemas ambientais, considerando as relações entre seus fatores físicos, biológicos e socioeconômicos" (Braga *et al.*, 2002).

Os modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão possibilitam a obtenção de séries de vazões partindo de uma série de registros de precipitação, bem como a previsão de vazões em locais desprovidos de informações. Tais modelos procuram descrever uma sequência de etapas, desde a vazão até o escoamento, tendo como elemento fundamental a bacia hidrográfica.

Os projetos de aproveitamento de recursos hídricos, frequentemente, recaem em locais com ausência de dados. Em tais situações, uma alternativa de procedimento são os estudos de otimização de parâmetros de modelos chuva-vazão associados às características físicas e geomorfológicas da bacia hidrográfica, de forma a torná-los aplicáveis em locais sem dados ou com poucos dados.

Nesta dissertação foi desenvolvida uma metodologia que objetiva a otimização de parâmetros de um modelo hidrológico de chuva-vazão, visando à obtenção de hidrogramas em sub-bacias sem medição de níveis ou vazões. Para a otimização dos parâmetros e validação do modelo, foram utilizados dados pluviométricos observados na bacia hidrográfica do Rio Aquidauana, dados fluviométricos na seção da Ponte do Grego, no estado de Mato Grosso do Sul, além das informações sobre as características físicas da bacia. Na região em estudo existem sete (07) postos de observação influentes.

A previsão de possíveis cheias ou secas seria uma medida no sentido de amenizar os prejuízos e poupar eventuais perdas de vidas humanas e de animais, no que se refere ao fornecimento de informações às autoridades de Defesa Civil, com antecedência suficiente para a tomada das decisões necessárias.

A bacia hidrográfica do Rio Aquidauana foi escolhida como área de estudo, devido à existência de dados pluviométricos e fluviométricos nesse local e de registros pluviométricos em sete (07) postos influentes, além de já ter sido detalhada em estudos anteriores com informações das características físicas disponíveis.

2 OBJETIVOS

- Objetivo Geral

Otimizar os parâmetros de um modelo hidrológico, como meio de obter os hidrogramas em sub-bacias sem medição, com base nas observações pluviométricas de postos influentes na bacia hidrográfica do Rio Aquidauana e os dados observados no posto fluviométrico na seção exutória na localidade da Ponte do Grego.

- Objetivos Específicos

- Estimar fatores de rugosidade conforme as superfícies das bacias e cursos de água;
- Determinar os valores ótimos da precipitação efetiva pelo Método do Soil Conservation Service - SCS.
- Ajustar modelos hidrológicos baseados na distribuição espacial e temporal do escoamento superficial unidimensional da bacia hidrográfica, elaborados a partir de dados físicos e de vazão medidos na seção exutória.
- Obter hidrogramas em sub-bacias sem medição, formadoras de uma bacia hidrográfica, utilizando os dados climáticos, físicos e de vazão na seção exutória da bacia.
- Otimizar os parâmetros físicos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Considerações Gerais

"Prever o comportamento do sistema hidrológico requer descrever seu funcionamento, sendo capaz de reproduzi-lo de forma satisfatória conforme os objetivos do estudo, considerando-o sob determinadas condições iniciais e de contorno. Para tanto, a modelagem matemática vem sendo empregada há décadas, procurando representar o escoamento da água através de equações matemáticas derivadas da mecânica dos fluidos (equações da conservação da massa, quantidade de movimento e energia)" (Abbott, 1979; Cunge, 1980).

Segundo Tucci & Collischonn (2001), a natureza dentro de sua complexidade interativa mostra que todos os processos que ocorrem na bacia hidrográfica produzem alterações ou impactos na água que escoa nos rios e lagos. Entender os processos que ocorrem na bacia hidrográfica é essencial para dar respostas aos diferentes usos e sustentabilidade da população.

Conforme Tucci (1998), para o hidrólogo existem ainda os desafios dos aspectos sociais e econômicos do gerenciamento dos recursos hídricos e meio ambiente somados aos problemas ambientais de representação dos processos. Planejar a ocupação da bacia hidrográfica é uma necessidade de uma sociedade com usos crescentes de água e que tende a ocupar espaços com risco cada vez maior de inundação. A tendência atual envolve o desenvolvimento sustentado da bacia hidrográfica, que implica no aproveitamento racional dos recursos com o mínimo dano ao meio ambiente.

Os modelos hidrológicos possibilitam a representação dos processos hidrológicos, permitindo prever as condições em que o meio estará sujeito para que seja possível minimizar seus impactos. Essas ferramentas são fundamentais no que se refere ao planejamento e a tomada de decisões no processo de ocupação ambiental.

"As técnicas de análise de terreno são de fundamental importância no emprego dos modelos hidrológicos de parâmetros distribuídos, os quais buscam simular a variabilidade espacial dos processos de fluxo dentro das bacias. Por isso, a estrutura dos modelos necessita ser compatível com os métodos de analise de terreno, devendo ter como base um método que possibilite uma representação física realista dos processos envolvidos" (Steffen, 1997).

Para Tucci (1998), simplificações na representação matemática são adotadas conforme a disponibilidade de dados, os objetivos do estudo, as características do sistema e a disponibilidade de recursos computacionais, de tempo e de material humano. A despeito das dificuldades na representação matemática de alguns processos físicos e da necessidade da discretização de processos contínuos, os modelos matemáticos têm a vantagem de permitir a geração de resultados para diferentes situações com elevada velocidade de resposta.

3.2 Classificação de modelos

Um modelo pode ser classificado segundo vários critérios. Maiores detalhes a respeito deste tema podem ser encontrados em Tucci (1998), que serviu de base para organização deste texto.

De acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem, podem ser estocásticos ou determinísticos. Considerando-se o tipo de relação entre essas variáveis tem-se modelos empíricos ou conceituais. Com relação à forma de apresentação dos dados classificam-se em discretos ou contínuos. Quanto à existência ou não de relações espaciais os modelos podem ser concentrados ou distribuídos.

No modelo estocástico, pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório. Se os conceitos de probabilidade forem ignorados durante a elaboração do modelo, o mesmo será dito determinístico. No entanto, uma variável de entrada pode ser aleatória e mesmo assim o modelo será determinístico quando cada valor de entrada produz um único valor de saída.

Os modelos empíricos utilizam relações baseadas em observações, não têm nenhuma relação com os processos físicos envolvidos. Tal característica os torna específicos para a região em que as relações foram desenvolvidas, ou seja, esses modelos não possibilitam simulações em condições diferentes daquelas previstas por ele. Quando as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos, o modelo é dito conceitual. Os modelos conceituais são, geralmente, mais complexos que os empíricos, já que procuram descrever todos os processos que envolvem determinado fenômeno.

Os modelos também podem ser classificados como concentrados ou distribuídos. Os modelos concentrados utilizam somente o tempo como variável independente e a variabilidade espacial não é considerada. Nos modelos distribuídos as variáveis e parâmetros envolvidos dependem do espaço e/ou do tempo. Modelos puramente distribuídos não existem,

na prática, uma vez que alguma discretização do espaço é feita, o modelo distribuído torna-se concentrado em uma pequena região homogênea, resultante da subdivisão.

Geralmente os modelos descrevem processos com diferentes escalas de tempo e diferentes níveis de detalhamento. Um modelo pode ser bastante detalhado, adequado a pequenos intervalos de espaço e tempo, ou ser mais genérico, sendo capaz de simular o comportamento de grandes regiões e/ou intervalos de tempo mais longos. Determinados modelos trabalham em diferentes escalas espaciais e temporais. Processos podem ser simulados considerando-se pequenos intervalos de espaço e tempo, para que os resultados sejam gerados em escalas espaciais menos detalhadas e intervalos de tempo maiores.

3.3 Modelos Hidrológicos

Conforme Tucci & Collischonn (2001), os modelos hidrológicos são ferramentas de quantificação de cenários analisados no gerenciamento dos recursos hídricos. Compreender os processos na bacia hidrográfica é fundamental para responder aos diversos usos e sustentabilidade da população. Um mesmo processo pode ser representado de diferentes maneiras, sendo algumas mais apropriadas para determinados casos.

Tucci (1998) coloca que o modelo hidrológico é uma das ferramentas que a ciência desenvolveu para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas. É utilizado para antecipação de eventos, de modo a permitir que medidas preventivas sejam tomadas. No entanto, ressalta que nenhuma metodologia poderá aumentar as informações fornecidas pelos dados e que não se deve deixar de usá-los na aferição dos parâmetros, na tentativa de reduzir as incertezas dos mesmos na estimativa das variáveis hidrológicas. Os modelos hidrológicos apresentam limitações básicas como qualidade e quantidade dos dados hidrológicos e simplificação do comportamento espacial de variáveis e fenômenos.

3.3.1 Transformação de chuva em vazão

Estes modelos foram desenvolvidos visando a obtenção de séries hidrológicas de vazões mais longas e representativas, para diferentes projetos de recursos hídricos.

A transformação de chuva em vazão envolve os processos de interceptação, armazenamento local, evapotranspiração, infiltração e escoamento.

Obtidos os dados de precipitação, sejam eles medidos ou estimados, parte-se para a simulação hidrológica da bacia em questão. Este procedimento é muito usado por hidrólogos, uma vez que valores pluviométricos são de mais fácil obtenção que dados fluviométricos. Através dos modelos chuva-vazão torna-se possível obter vazões desconhecidas ou estimá-las para novos cenários existentes ou previstos para as bacias.

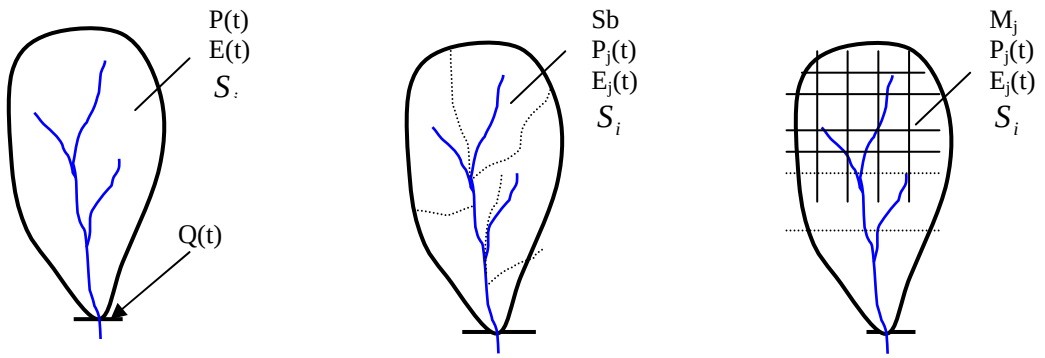
Conforme Tucci (1998), os modelos chuva-vazão têm sua estrutura baseada na discretização da bacia hidrográfica, nas variáveis de entrada, na estrutura básica da integração dos processos, na aquisição dos dados físicos da bacia e na determinação dos parâmetros.

Discretização da bacia hidrográfica:

Para representar a bacia, os modelos adotam critérios de subdivisão espacial. Geralmente os modelos utilizam uma das estruturas para discretização representadas na Figura 3.1. Na referida figura P(t) representa a precipitação no instante t, E(t) a evaporação no instante t, Q(t) a vazão no instante t, M o módulo da bacia, S_i a declividade e Sb a palavra sub-bacia.

Sejam as seguintes estruturas de discretização:

- Concentrado: tipo de estrutura utilizada em bacias de pequeno porte, onde a distribuição espacial dos parâmetros e variáveis não compromete os resultados da pesquisa em questão (figura 3.1a). Os processos hidrológicos são representados por variáveis concentradas no espaço e adota-se uma precipitação média para toda a bacia;
- Distribuídos por sub-bacias: de acordo com a drenagem principal da bacia, a mesma é subdividida em sub-bacias (figura 3.1b). A subdivisão acontece baseada no seguinte: disponibilidade de dados, locais de interesse e variabilidade dos parâmetros físicos da bacia;
- Distribuição por módulos ou por condicionantes físicos: adota-se a estrutura da subdivisão em formas geométricas, mesmo sem relação direta com o formato da bacia, mas caracterizando internamente os componentes dos processos envolvidos (figura 3.1c). A principal dificuldade enfrentada pelos usuários ao adotarem a discretização por módulos é quanto ao entendimento da integração dos processos e ajuste dos parâmetros, em razão do elevado número de módulos para grandes bacias.



a - Concentradas **b – Distribuído por Sub-bacias** **c- Distribuído por módulos**

FIGURA 3.1 - Estruturas para Discretização.
Fonte: Tucci (1998).

- Variáveis de entrada

Em geral as variáveis de entrada utilizadas pelos modelos são a precipitação e a evapotranspiração potencial.

● Precipitação: esta é a principal variável de entrada. A estimativa adequada da precipitação exige uma densa rede de pluviômetros e pluviógrafos e até mesmo radar, fato que não ocorre na prática, uma vez que as redes disponíveis são geralmente insuficientes para representar as variabilidades espaciais e temporais;

● Evapotranspiração: Os postos climatológicos fornecem dados de tanque, que tem sérias limitações na estimativa da evapotranspiração potencial devido às suas características de medição, já que dados como evaporação e informações climatológicas permitem a estimativa da evapotranspiração.

- Estrutura básica da integração dos processos

A estrutura é separada em dois módulos: bacia e canal. Os processos são simulados fisicamente em cada módulo ou bacia discretizada. Da mesma forma, as variáveis e os parâmetros são determinados para cada um dos subsistemas.

● Bacia: simula o balanço vertical dos fluxos e o escoamento na sub-bacia ou no módulo;

● Canal: simula o escoamento em rios e canais definidos, difundindo a vazão de montante e recebendo a contribuição do módulo da bacia.

- Aquisição de dados físicos das bacias

A diversidade, tanto do uso do solo quanto das características naturais do mesmo, resulta em um número muito grande de informações a serem transferidas para os modelos, essencialmente para os modelos distribuídos onde são maiores as relações entre os parâmetros e as características físicas dos modelos. Objetivando a obtenção de informações físicas e climáticas das bacias, o uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Sensoriamento Remoto tem sido utilizado na estrutura de alguns modelos. Para obtenção de informações físicas morfológicas são usados os Modelos Digitais de Elevação do Terreno (MDET).

- Determinação dos parâmetros

Certos parâmetros de modelos são estimados baseados nas características físicas, enquanto que outros têm que ser ajustados baseados em informações observadas das variáveis de entrada e de saída. Determinados modelos possuem módulos para ajuste destes parâmetros por meio de otimização. No entanto a utilização da técnica de otimização fica prejudicada em bacias com número muito grande de subdivisões, em razão do grande número de parâmetros resultante para ajuste.

3.4 O escoamento

"Os processos hidrológicos estão diretamente relacionados à morfologia da bacia através de processos geomorfológicos de modificação, erosão e deposição do solo. O escoamento da água na bacia, proveniente das precipitações sobre ela ocorridas, é o mecanismo principal para o transporte de solutos e sedimentos" (Steffen, 1997).

"A precipitação efetiva é a parcela do total precipitado que gera o escoamento superficial. Para obter o hietograma correspondeste à precipitação efetiva é necessário retirar os volumes evaporados, retidos nas depressões e os infiltrados" (Tucci, 1993).

A seguir são apresentadas algumas metodologias para determinação da precipitação efetiva, a saber:

- Equações de infiltração (como Horton e Green Ampt): são usadas para calcular as perdas iniciais. A precipitação efetiva é obtida após a subtração dessas perdas. Destaca-se a dificuldade de estimativa dos parâmetros das equações para aplicação da metodologia.
- Índice Φ: significa um valor de infiltração constante durante a enchente. Este índice é calculado pelo quociente entre o total da chuva e o número dos intervalos de tempo. A precipitação efetiva é a diferença entre o precipitado e o infiltrado. Nos intervalos de tempo

em que Φ for maior que a precipitação, deve-se distribuir a diferença nos demais intervalos para que o volume da precipitação efetiva seja igual ao escoado.

● Índice W: estima-se uma precipitação média no intervalo, mas o índice é deduzido somente das precipitações que superem a taxa de infiltração.

● Relações Funcionais: este tipo de metodologia relaciona a precipitação total e a efetiva. Pode-se citar como exemplo o Método do SCS (Soil Conservation Service), amplamente utilizado nos cálculos hidrológicos. A relação proposta é a seguinte: a razão entre o volume infiltrado e a capacidade máxima de armazenamento do solo é igual ao quociente entre a precipitação efetiva e a precipitação total.

A metodologia do SCS tem sido bastante utilizada para o cálculo da infiltração e posterior determinação da chuva excedente. É exigida uma maior sensibilidade na estimativa da infiltração para escolha do parâmetro CN (Curva Número) usado no método.

3.4.1 Método do *Soil Conservation Service* – SCS

"O *U. S. Department of Agriculture Soil Conservation Service* (SCS), atual *National Resources Conservation Service* (NRCS), desenvolveu uma metodologia de relação chuva-vazão para bacias hidrográficas" (Mays, 2005). A metodologia baseia-se fundamentalmente em um parâmetro que procura descrever o tipo de solo, sua utilização e condição de superfície no que diz respeito à potencialidade de gerar escoamento superficial. Este parâmetro é representado por CN que significa Curva Número.

Teoricamente, admite-se o valor de CN compreendido entre 0 e 100, correspondendo o zero a uma bacia de condutividade hidráulica infinita e o cem a uma bacia totalmente impermeável.

Os valores de CN foram tabelados em função do tipo e uso do solo. Para uma bacia hidrográfica composta de diferentes tipos e usos de solo, deve-se fazer a composição porcentual para a obtenção do valor de CN.

- Capacidade Máxima de Retenção

A capacidade máxima de retenção da bacia é expressa em altura de água, e representada por S. Embora a natureza física deste conceito seja bastante discutível, ele procura exprimir de alguma forma uma capacidade potencial máxima da bacia para absorver a água que se torna assim não utilizável para a geração de escoamento superficial.

O valor da capacidade máxima de retenção depende apenas do número de escoamento e é determinado pela seguinte expressão:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \qquad (3.1)$$

onde, S representa a capacidade de retenção máxima em polegadas (2,54 cm) e CN o número que representa a capacidade de gerar escoamento, tal como foi definida anteriormente. Para se obter o valor de S, em mm, deve ser utilizada a seguinte expressão:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \qquad (3.2)$$

Da análise da expressão anterior constata-se que para um valor de CN tendendo a zero obtêm-se um valor de S infinito e para um valor de CN igual a 100 obtêm-se um valor nulo de S.

Na prática, admite-se que CN varia entre 1 e 100. Dessa forma, conclui-se que uma bacia com CN igual a 100 seja totalmente impermeável, isto é, a mesma dispõe de uma capacidade nula de absorver precipitação.

- Perdas Iniciais

Para que se forme o escoamento superficial é necessário que ocorra a saturação da camada superficial do solo e que sejam satisfeitas as perdas iniciais, que o SCS representa por Ia. Estas perdas são constituídas por três parcelas: intercepção, retenção e infiltração até a saturação da camada superficial do solo.

O valor de Ia aumenta com o valor de S. Portanto, numa bacia quase impermeável as perdas iniciais são mínimas e numa bacia de elevada permeabilidade os valores de Ia são elevados.

A relação proposta pelo SCS é dada pela seguinte expressão:

$$Ia = 0{,}2\ S \qquad (3.3)$$

Segundo o SCS verifica-se que em 50% dos casos observados os valores de Ia estão compreendidos entre 0,1S e 0,4S. Portanto a relação anterior representa um valor médio,calculado apenas em função de CN, e que permite obter uma ordem de grandeza de Ia.

- Precipitação Efetiva

De acordo com os princípios adotados pelo SCS, não existe precipitação efetiva até que as perdas iniciais sejam integralmente satisfeitas. A ocorrência de escoamento superficial está condicionada a verificar-se:

$P > I_a$

onde P representa a precipitação ocorrida desde o início. A precipitação efetiva pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \tag{3.4}$$

Considerando-se as perdas iniciais iguais a 20%. Tem-se I_a = 0,2 S. Substituindo-se na expressão anterior, resulta:

$$Q = \frac{(P - 0{,}2S)^2}{P + 0{,}8S} \tag{3.5}$$

A precipitação utilizada para a geração do escoamento superficial, é uma medida acumulada de chuvas. Para que esse valor possa ser utilizado pelo algoritmo de propagação do escoamento superficial, necessita-se desacumular a precipitação efetiva.

3.4.2 Equações de *Saint-Vénant*

As equações de *Saint-Vénant,* são equações matemáticas, que descrevem o comportamento do movimento da água em rios e canais, e são representadas basicamente por duas equações diferenciais que controlam a conservação de massa "equação da continuidade" e a quantidade de movimento "equação da quantidade de movimento", do escoamento. Para os casos com escoamento unidimensional temos:

- Equação da continuidade:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_1 \tag{3.6}$$

onde:

Q – Vazão ($m^3\ s^{-1}$)

A - Área da seção molhada (m^2)

x - Distância longitudinal (m)

t - Tempo (s)

q_1 - Entrada ou saída de vazão, por unidade de largura de contribuição lateral ($m^3\ s^{-1} m^{-1}$)

- Equação da quantidade de movimento:

O primeiro termo da equação da quantidade de movimento representa as forças de inércia do escoamento; o segundo termo representa os valores de pressão; o terceiro termo representa a gravidade (S_0) e fricção (S_f).

$$\overbrace{\frac{1}{gA}\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{1}{gA}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{A}\right)}^{1^{\circ}\text{ termo}}+\overbrace{\frac{\partial y}{\partial x}}^{2^{\circ}\text{ termo}}=\overbrace{\left(S_0-S_f\right)}^{3^{\circ}\text{ termo}} \tag{3.7}$$

onde: g – aceleração da gravidade (m s^{-2})

y – Profundidade do escoamento (m)

S_0 – Declividade do fundo (m m^{-1})

S_f – Declividade da linha de fricção (m m^{-1})

Para solução das equações (3.6) e (3.7), são utilizados métodos numéricos.

As principais simplificações adotadas na dedução das equações de *Saint-Vénant* são:

- Fluído incompressível e homogêneo;
- Pressão hidrostática na vertical. O erro dessa aproximação é pequeno para escoamento gradualmente variado (relação y/L é pequena, onde y é a profundidade do escoamento e L é o comprimento da onda);
- Aproximação na declividade de fundo. Considera-se, nesse caso, que sen(θ)=tg(θ), onde θ é o ângulo entre a horizontal e a inclinação do fundo. Segundo Liggett (1975) essa condição é aceita para pequenas declividades de fundo, isto é, declividade aproximadamente, igual a 0,29 m m^{-1}, caso em que o erro é de, aproximadamente, 2%;
- Escoamento unidimensional. Admite-se, como mais importante o escoamento na direção longitudinal, com velocidades verticais e transversais pequenas, quando comparadas com as velocidades longitudinais. Como consequência dessa simplificação, a velocidade é considerada uniformemente distribuída na seção transversal;
- Variação gradual da forma das seções transversais. Variação gradual das seções, desprezando os efeitos singulares da contração e expansão da seção;
- Fricção. A declividade da linha de fricção é obtida pelo uso das equações de movimento uniforme como Chezy e Manning, estabelecidas para escoamento uniforme e permanente.

Assim, desprezando os termos inerciais (aceleração), obtém-se a equação da difusão:

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \tag{3.8}$$

Desprezando o gradiente de profundidades, obtém-se a equação da onda cinemática:

$$S_f = S_0 \tag{3.9}$$

Para casos em que o escoamento ocorre em planos retangulares impermeáveis e canais livres, a parcela da precipitação referente à infiltração pode ser desconsiderada. Considerando o esquema da Figura 3.2, podemos deduzir as equações para escoamento em planos e canais.

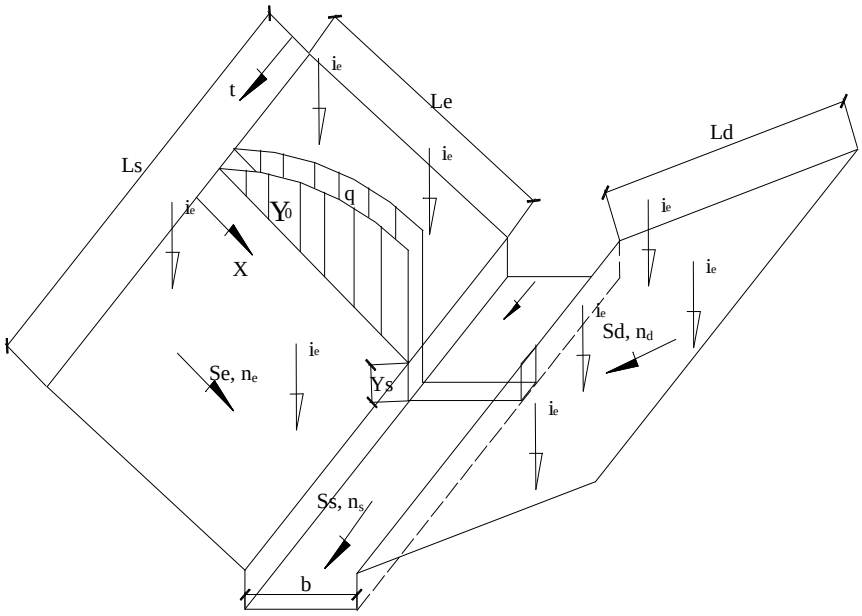


FIGURA 3.2 - Trecho de rio com planos retangulares e canais livres.
Fonte: Costa Neto (2005).

3.4.2.1 Equações para escoamento nos planos

Considerando a equação da onda cinemática, onde:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_L$$

e (3.10)

$$q_1 = \alpha . y^m$$

Sendo: $A=b.y$ e $Q=q.b$

Particularizando para o plano de índice $_0$, temos:

$$\frac{\partial q_0}{\partial x}+\frac{\partial y_0}{\partial t}=\begin{cases} i_e & se \quad t \le t_d \\ -f_c & se \quad t > t_d \end{cases} \tag{3.11}$$

$$q_0 = \alpha_0 . y_0^m$$

Sendo: $\alpha_0 = S_0^{\frac{1}{2}} / n_0$ e m=5/3 tem-se:

$$q_o = \frac{\sqrt{S_o}}{n_o}\sqrt[3]{y^5{}_o} \tag{3.12}$$

Expressando y_0 em função de q_0 na equação (3.12), diferenciando em função de t e substituindo na equação (3.11), temos:

$$\frac{\partial q_0}{\partial x}+\frac{1}{\alpha_0^{\frac{1}{m}} m q_0^{1-\frac{1}{m}}}.\frac{\partial q_0}{\partial t}=\begin{cases} i_e & se \quad t \le t_d \\ -f_c & se \quad t > t_d \end{cases} \tag{3.13}$$

Admensionalizando as variáveis,

$$X = x / L_0 \tag{3.14}$$

$$P = q_0 /(i_e . L_0) \tag{3.15}$$

$$T = m . t_e / t_c \tag{3.16}$$

$$T_D = m . t_d / t_c \tag{3.17}$$

$$F = f_c / i_e \tag{3.18}$$

Sendo t_c o tempo de concentração no plano temos:

$$t_c = \left(\frac{L_0}{\alpha_0 i_e^{m-1}}\right)^{1/m} \tag{3.19}$$

Substituindo q_0, x, t, t_e e f_c; na equação (3.13), derivando e manipulando algebricamente, obtemos a equação do plano para todos os tempos, assim descrita:

$$\frac{1}{P^{0,4}}.\frac{\partial P}{\partial T}+\frac{\partial P}{\partial X}=\begin{cases} 1 & se \quad T \le T_D \\ -F & se \quad T > T_D \end{cases} \tag{3.20}$$

3.4.2.2 Equações para escoamento nos canais

A equação da continuidade utilizada para o escoamento em canais, considerando que os planos laterais possuem largura, comprimento, rugosidade, declividade e intensidade iguais, pode ser escrita como:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial z} + b\frac{\partial Y_s}{\partial t} = 2q_0 L \tag{3.21}$$

Partindo da Equação de Manning onde:

$$Qs = b\alpha_s Y_s^m \tag{3.22}$$

Expressando *Ys* em função de *Qs*, através da equação (3.22); derivando e manipulando algebricamente e substituindo na equação (3.21) resulta:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial z} + \frac{b^{1-1/m}}{m\alpha_s^{1/m} Q_s^{1-1/m}}\frac{\partial Q_s}{\partial t} = 2q_0 \tag{3.23}$$

Considerando as variáveis já admensionalizadas no item 3.4.2.1. (X, F, T,….) e ainda:

$$Q = \frac{Q_s}{2L_0 L_s i_e}$$

$$Z = z / Ls$$

Substituindo *Qs*, *z*, *t*, q_0 e *m*, na equação (3.23), e rearranjando temos:

$$\frac{G}{Q^{0,4}}\frac{\partial Q}{\partial T} + \frac{\partial Q}{\partial Z} = P \tag{3.24}$$

sendo

$$G = \left(\frac{2L_s}{b\alpha_s}\right)^{0,6} \frac{b\alpha_0{}^{0,6}}{2L_0}$$

3.5 Otimização de parâmetros de modelos hidrológicos

"Os modelos hidrológicos chuva-vazão possuem parâmetros que caracterizam o sistema" (Tucci,1998). Alguns desses parâmetros representam abstrações da realidade e, em consequência, não podem ser medidos. Nessas circunstâncias, o ajuste dos valores dos parâmetros é realizado através do processo de calibração, com base nas informações hidrológicas existentes na bacia.

Na modelagem hidrológica do processo de transformação de chuva em vazão depara-se com duas questões, primeiramente a escolha do modelo que representará melhor o comportamento hidrológico da bacia e a seguir a definição dos valores dos parâmetros do modelo que permitem obter valores simulados próximos aos valores observados.

A outra questão é resolvida através da calibração entendida como o processo de busca dos valores ótimos dos parâmetros do modelo hidrológico. A calibração é um processo de otimização onde as variáveis de decisão são os parâmetros do modelo hidrológico, que são modificados pelo usuário ou através de uma técnica numérica, com o objetivo de encontrar uma boa concordância entre os valores calculados, ditos simulados, e os valores observados das variáveis de saída.

"A calibração de modelos hidrológicos é um processo iterativo em que os valores dos parâmetros são modificados e seu efeito nos resultados é avaliado repetidamente, até que o hidrograma calculado reproduza o hidrograma observado com boa precisão. Para isto, o usuário normalmente utiliza a avaliação visual, em gráficos, verificando se as vazões calculadas e observadas têm valores próximos nos períodos de cheia e estiagem, se a recessão do hidrograma está bem apresentada, se o valor do pico da cheia está próximo do observado e se os picos de vazão calculado e observado estão próximos. Adicionalmente, podem ser utilizadas funções objetivo, que procuram quantificar a qualidade do ajuste dos hidrogramas" (Tucci, 1998).

Três conceitos importantes devem ser levados em conta na calibração de modelos hidrológicos: equifinalidade, parcimônia e representatividade dos dados utilizados.

"O conceito de equifinalidade, introduzido por Beven & Binley (1992), estabelece que existem vários conjuntos de parâmetros possíveis que, de forma apropriada, darão a resposta desejada. Esse conceito é oriundo da geomorfologia, onde estabelece que formas de superfícies terrestres similares possam ser originadas como resultados de processos completamente diferentes. Portanto, considerando unicamente a forma da superfície terrestre é difícil identificar o processo que a originou" (Beven, 2006). Sua analogia na calibração de modelos chuva-vazão substitui as formas das superfícies terrestres por hidrogramas e os processos pelos parâmetros do modelo.

"O princípio de parcimônia estabelece que os modelos devam ter o menor número de parâmetros que permitam uma representação adequada do comportamento hidrológico da bacia. Muitas vezes, ao incrementar o grau de complexidade dos modelos hidrológicos observa-se que a partir de certo número já não existem melhoras significativas no desempenho do modelo em termos de uma melhor reprodução do comportamento hidrológico da bacia" (Wagener *et al.*, 2004).

Conforme Tucci (1998), os resultados da calibração estão intimamente ligados à quantidade, qualidade e representatividade dos dados utilizados. É importante destacar que nenhum modelo cria informação sobre uma bacia, o modelo tem a finalidade de explorar

melhor as informações existentes. Ressalta-se também que o período de dados deve apresentar suficiente variabilidade no comportamento hidrológico da bacia para que os diferentes processos sejam corretamente representados pelo modelo hidrológico e que não podem ocorrer erros de medição nos dados.

3.6 Métodos de otimização de parâmetros

Uma das técnicas pioneiras de calibração de modelos chuva-vazão é a calibração manual por tentativa e erro. Essa técnica consiste num processo iterativo, onde o usuário altera os valores dos parâmetros do modelo a cada tentativa. Esse processo iterativo prossegue até que o usuário encontre um conjunto de parâmetros para os quais ele considera que os resultados do modelo são os mais apropriados para o processo simulado.

"Um benefício desse procedimento é a liberdade que o usuário tem de agregar ao processo sua experiência e conhecimento sobre o modelo. Porém, em função do grande número de vezes que os valores dos parâmetros devem ser modificados, essa abordagem pode não ser recomendada em modelos complexos que envolvem um grande número de parâmetros" (Mays & Tung, 1992; Fletcher & Ponnambalam, 1998).

"Na calibração manual de modelos chuva-vazão, geralmente a variável de saída é a vazão. Dessa forma, o usuário normalmente analisa o ajuste de vazões mínimas, a forma do hidrograma calculado, o ajuste dos picos de cheias em termos de valor máximo, volume, forma e tempo de ocorrência" (Collischonn & Allasia, 2006).

Técnicas de calibração automáticas foram desenvolvidas visando tornar mais rápido e eficiente o processo já que se baseiam na utilização intensiva de computadores para a calibração de modelos hidrológicos.

O procedimento típico para estimar os valores de parâmetros de modelos chuva-vazão considera os seguintes elementos principais: a função-objetivo; o algoritmo de otimização e o critério de parada.

Uma função-objetivo é uma medida de desempenho do problema analisado. No caso da calibração de modelos chuva-vazão, a função-objetivo é uma equação utilizada para calcular uma medida numérica da diferença entre os resultados do modelo e os valores observados dessa mesma variável de saída. O propósito da calibração automática é encontrar aqueles valores dos parâmetros do modelo que otimizam a função-objetivo, isto é os valores que maximizam ou minimizam a referida função.

Se otimizado o valor de uma única função-objetivo, o processo de calibração automática é denominado mono-objetivo. No entanto, quando otimizado o valor de duas ou mais funções-objetivo, o processo de calibração automática é denominado multiobjetivo.

"Quando se trata de calibração de modelos hidrológicos, as técnicas numéricas de otimização, ditas iterativas, são as mais utilizadas porque, normalmente, a função-objetivo resultante do uso destes modelos é implícita" (Tucci, 1998).

Conforme Burnash (1995), a calibração automática é criticada por hidrólogos mais experientes, para os quais:

• conjuntos de parâmetros que produzem um bom valor da função objetivo podem ser conceitualmente absurdos, ou inválidos;

• modelo calibrado com algoritmos automáticos deixa de ser uma poderosa ferramenta de análise da bacia e passa a ser uma caixa preta, destinada a produzir os melhores valores da função objetivo;

• ao utilizar uma técnica de calibração automática o usuário do modelo perde a sensibilidade sobre o comportamento do modelo e tende a não compreender plenamente as suas limitações;

• atingir um melhor valor de uma função objetivo qualquer não necessariamente implicará em representar melhor o comportamento da bacia;

• usuário do modelo tem, na calibração manual, uma forma de aprendizado, que não existe na calibração automática;

• nem sempre o tempo necessário para a calibração é inferior com algorítmos automáticos

Uma parcela considerável das críticas à calibração automática está relacionada às funções objetivo que são utilizadas. Ainda são incipientes as tentativas de definir funções que podem ser comparadas à função objetivo implícita no processo de calibração manual. "As funções objetivo normalmente utilizadas na calibração automática não contemplam toda a complexidade considerada na calibração manual" (Boyle *et al*., 2000).

"Os modelos de otimização são úteis para a identificação de ações que maximizem os benefícios ou que minimizem os prejuízos de um determinado cenário. Porém, por serem mais complexos, exigem a aplicação de recursos computacionais mais potentes" (Barros et al.,2004).

Em tais modelos ocorre a alteração dos valores das variáveis dos algoritmos até que seja atingido o resultado ótimo de uma função objetivo. O cálculo pode envolver o uso de modelos de simulação.

Nesse tipo de modelo estabelece-se uma meta para a função objetivo, visando a obtenção de um máximo, mínimo ou de um número exato para o valor de uma variável. È

importante salientar que, em função da possibilidade de ocorrência de máximos e mínimos locais, há a necessidade de um desenvolvimento exaustivo dos cálculos de otimização para que se obtenha a garantia de que as soluções encontradas sejam globais.

Segundo Collischonn (2001), entre os algoritmos de otimização global propostos recentemente destacam-se os algoritmos genéticos, que tomam emprestados alguns conceitos da biologia, e estão baseados no processo de evolução de uma população, sujeita a algumas regras de seleção natural, tal como ocorre com os seres vivos na natureza.

Vários são os métodos utilizados para otimização de parâmetros de modelos matemáticos. Além do já citado método dos Algoritmos Genéticos, que baseia-se no processo de seleção natural, vale destacar o método da Pesquisa Harmônica que faz uma analogia ao processo de busca pela perfeita harmonia musical.

3.6.1 Pesquisa Harmônica *(Harmony Search)*

Muitos problemas em vários campos são formulados como problemas de otimização e resolvidos por diferentes algoritmos de otimização. No entanto, a maioria dos problemas são complexos demais, não lineares e descontínuos nas funções objetivo e de restrição, para serem resolvidos pelas técnicas tradicionais de otimização tais como: programação linear, programação não-linear e programação dinâmica. Em tais situações os algoritmos de otimização heurísticos aparecem como boas alternativas.

Um novo algoritmo heurístico foi desenvolvido para resolver tais problemas difíceis. Ele imita a improvisação de músicos na busca da melhor performance musical e é chamado Pesquisa Harmônica (HS).

“Pesquisa Harmônica é um algoritmo de otimização e busca baseado em performance musical, como por exemplo, um trio de jazz onde o objetivo é a melhor harmonia entre todos os instrumentos” (Kim et al.,2001).

Seguindo a idéia que os algoritmos heurísticos imitam os processos de otimização natural na busca do estado estável, a Pesquisa Harmônica é derivada do processo natural de busca do melhor desempenho musical.

As performances musicais procuram um estado estável (melhor harmonia) determinado por estimativa estética, enquanto que os algoritmos de otimização buscam um estado estável (ótimo global, custo mínimo ou benefício máximo) determinado pela avaliação da função objetivo. A estimativa estética é feita pelo soar de diversos instrumentos, a avaliação da função objetivo é realizada através dos valores das variáveis compostas.

Assim como os sons podem ser melhorados (por estimativa estética), prática após prática, as melhores soluções numéricas podem ser obtidas (por melhor avaliação da função objetivo), iteração após iteração.

Segundo Geem (2006), “a improvisação no jazz busca um melhor estado (melhor harmonia), determinado pela estimativa estética, assim como a otimização de um algoritmo procura um melhor estado (ótimo global) determinado pela avaliação da função objetivo.” Como se pode prever, estimativa estética é determinada pelo conjunto de tons musicais emitidos por cada instrumento, assim como a avaliação da função objetivo é realizada por um conjunto de valores atribuídos a cada variável de decisão.

Considerando-se o conjunto de jazz composto por saxofone, baixo e guitarra. Supondo-se existir tons musicais preferíveis armazenados na memória de cada músico: saxofonista (Dó, Mi, Sol), baixo (Si, Sol, Ré), e guitarra (Lá, Fá, Dó). No caso do saxofonista tocar Sol, o baixista Si e o guitarrista Dó, juntas as notas fazem a nova harmonia (Sol, Si, Dó). Se essa nova harmonia for melhor que a harmonia armazenada na memória dos músicos, ela passa a ocupar o espaço da anterior, que será excluída. Esse procedimento é repetido até que a harmonia perfeita seja encontrada.

De acordo com Gonçalves (2008), “esse método trabalha com os próprios parâmetros e com uma memória de soluções que vão se interagindo após cada iteração produzindo novas harmonias. Devido a sua natureza, apresenta convergência dos valores em um tempo computacional relativamente baixo, com bons resultados. Ele pode utilizar a própria função a ser otimizada, e não derivadas da mesma, apresentando regras de transição estocástica.”.

Cada solução possível é denominada de harmonia. O conjunto todo de harmonias é denominado memória harmônica, sendo associada a cada uma delas uma nota de desempenho, que mede sua capacidade harmônica.

Na sequência de iterações, novas harmonias são produzidas através de improvisação e/ou mixagem. As harmonias são avaliadas e ranqueadas, sendo as piores, desconsideradas. Repete-se o ciclo até que seja satisfeito o critério de parada.

Na Figura 3.3 está representado o esquema funcional da Pesquisa Harmônica.

Na Pesquisa Harmônica é relevante a importância da escolha dos parâmetros harmônicos, uma vez que tal decisão deve influir no comportamento do algoritmo. Os principais parâmetros são Memória Harmônica, Taxa Harmônica e Taxa de Improvisação.

A Memória Harmônica, que é o conjunto de todas as harmonias, deve ter um tamanho que não seja nem muito grande, nem pequeno demais. Se a Memória Harmônica for muito grande, o tempo computacional para o cálculo dos parâmetros pode aumentar em muito. Se a

mesma for muito pequena, pode ocorrer convergência prematura, já que pouca parte do espaço de busca é analisada.

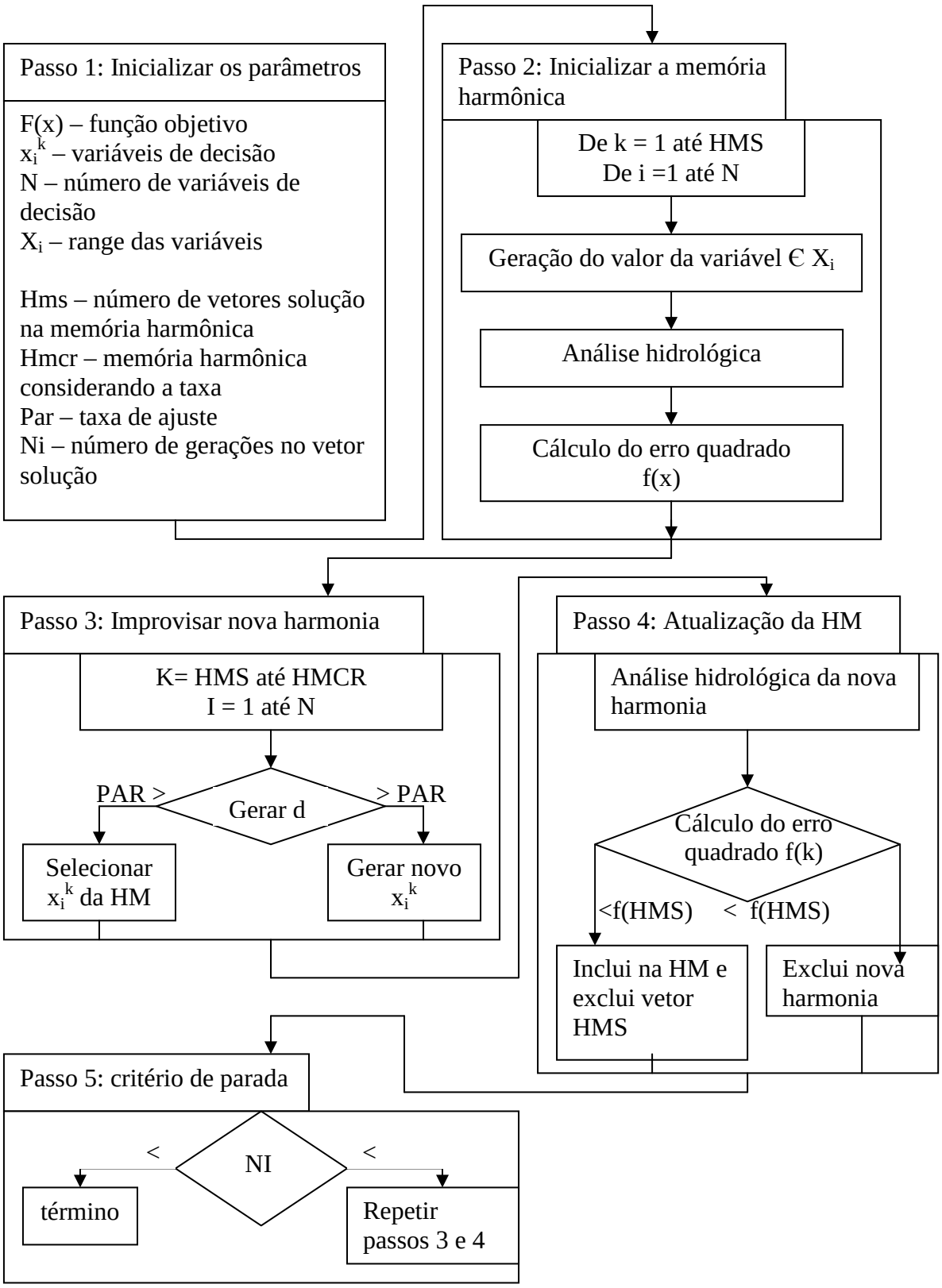


FIGURA 3.3 - Esquema funcional da Pesquisa Harmônica.
Fonte: Gonçalves (2008).

A Taxa Harmônica é responsável pelo número de harmonias a serem introduzidas na Memória Harmônica. Quanto maior a taxa, mais harmonias são introduzidas. Geralmente utiliza-se a Taxa Harmônica de um.

A Taxa de Improvisação possibilita a inserção de novas notas musicais na harmonia.

A representação dos parâmetros pode ser binária ou numérica, dependendo da característica de cada problema.

As etapas no processo da pesquisa harmônica são:

Etapa 1 - Inicializar o problema e os parâmetros do algoritmo;

Etapa 2 - iniciar uma memória harmônica;

Etapa 3 - improvisar uma nova harmonia;

Etapa 4 - atualizar a memória harmônica;

Etapa 5 - verificar o critério de parada.

Para melhor entendimento teremos:

Etapa 1 - Inicializar o problema e os parâmetros do algoritmo:

Minimizar f(x)

Sujeita a $x_{i,}$ pertencente a X_i, i = 1, 2, ..., N

onde: f(x) é a função objetivo; x_i^k é cada variável de decisão; N é o número variáveis de decisão (número de instrumentos musicais); X_i é o conjunto dos possíveis valores para cada variável de decisão, isto é $X_i = \{x_i (1), x_i(2), ...,x_i(k)\}$; e k é corresponde a posição do vetor.

Nesta etapa são especificados os parâmetros do algoritmo HS. São eles: tamanho da memória harmônica (HMS), ou o número de vetores solução contidos na memória harmônica; a memória harmônica considerando a taxa (HMCR); a taxa de adaptação (PAR) e do número de improvisações (NI), ou critério de parada.

A memória harmônica (HM) é uma memória local onde todos os vetores solução (conjunto de variáveis de decisão) e os correspondentes valores da função objetivo são armazenados.

Os valores da função são usados para avaliar a qualidade dos vetores solução.

Etapa 2 - Iniciar uma memória harmônica:

Nesta etapa a matriz HM é completada com os diversos valores de vetores solução gerados aleatóriamente.

Etapa 3 - Improvisar uma nova harmonia;

Um novo vetor harmonia $x' = (x'_{1,} x'_2, ...,x'_N)$, é gerado baseado em três regras: (1) consideração de memória, (2) ajuste de freqüência , e (3) seleção aleatória. Neste estudo, a geração de uma nova harmonia é chamada de improvisação.

Na consideração de memória, o valor da primeira variável de decisão (x'_1) para o novo vetor é escolhida aleatoriamente na extensão de HM (x_1^1, x_1^2, ..., x_1^{HMS}). Valores de outras variáveis de decisão são escolhidos da mesma maneira. Caso o valor escolhido seja maior que PAR, um novo valor é gerado. Caso seja menor, outro valor é escolhido entre aqueles armazenados na HM.

Etapa 4 - Atualizar a memória harmônica:

Se o novo vetor, (x'_1, x'_2,..., x'_N), for melhor do que o pior vetor na HM, avaliado em termos do valor da função objetivo, a nova harmonia será incluída na HM e a pior é excluída da HM.

Etapa 5 - Verificar o critério de parada:

As etapas 3 e 4 são repetidas até que o critério de parada seja satisfeito.

A estrutura da memória harmônica é mostrada na Figura 3.4.

	Violino	**Saxofone**	**Teclado**	**Avaliação**
1ª Colocada	**C**	**E**	**G**	Melhor
2ª Colocada	**C**	**F**	**A**	2ª Melhor
3ª Colocada	**B**	**D**	**G**	3ª Melhor
4ª Colocada	**D**	**F**	**A**	4ª Melhor

MEMÓRIA HARMÔNICA

FIGURA 3.4 - Estrutura da Memória Harmônica (HM)

Considerando-se um conjunto de jazz composto de violino, saxofone e teclado. Inicialmente tem-se armazenado na memória harmonias aleatórias (C, E, G), (C, F, A), (B, D, G), e (D, F, A), as quais são ordenadas por estimativa estética. No processo de improvisação, os três instrumentistas produzem novas harmonias, por exemplo, (C, D, A): violinista {C}, saxofonista {D} e tecladista {A}. A nova harmonia (C, D, A) é diferente de todas as demais harmonias (C, E, G), (C, F, A), (B, D, G) e (D, F, A), armazenadas na memória harmônica. Se a recém criada harmonia é melhor esteticamente que qualquer das armazenadas na memória

harmônica, a nova harmonia é incluída em HM e a classificada em última posição é excluída de HM. Esse processo é repetido até que resultados satisfatórios sejam obtidos.

4 METODOLOGIA

A metodologia empregada baseia-se na seqüência de atividades descritas no decorrer deste capítulo.

4.1 Escolha e descrição do local de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Aquidauana é uma sub-bacia do Rio Miranda e está totalmente localizada dentro do Estado de Mato Grosso do Sul. A parte afluente à secção da Ponte do Grego foi escolhida como área de estudo, devido à existência de dados fluviométricos observados para esse local e de registros pluviométricos em sete (07) postos influentes na área de drenagem, além de ter sido detalhada em estudos anteriores, com disponibilidade de informações de suas características físicas.

Está situada acima da localidade de Palmeiras, a montante do posto fluviométrico denominado Ponte do Grego, cujas coordenadas são: Latitude (-20º09’24”) e Longitude (-55º05’24”), conforme mostram as Figuras 5.1 e 5.2.

FIGURA 4.1 – Área de estudo.
Fonte: Mato Grosso do Sul (1990)

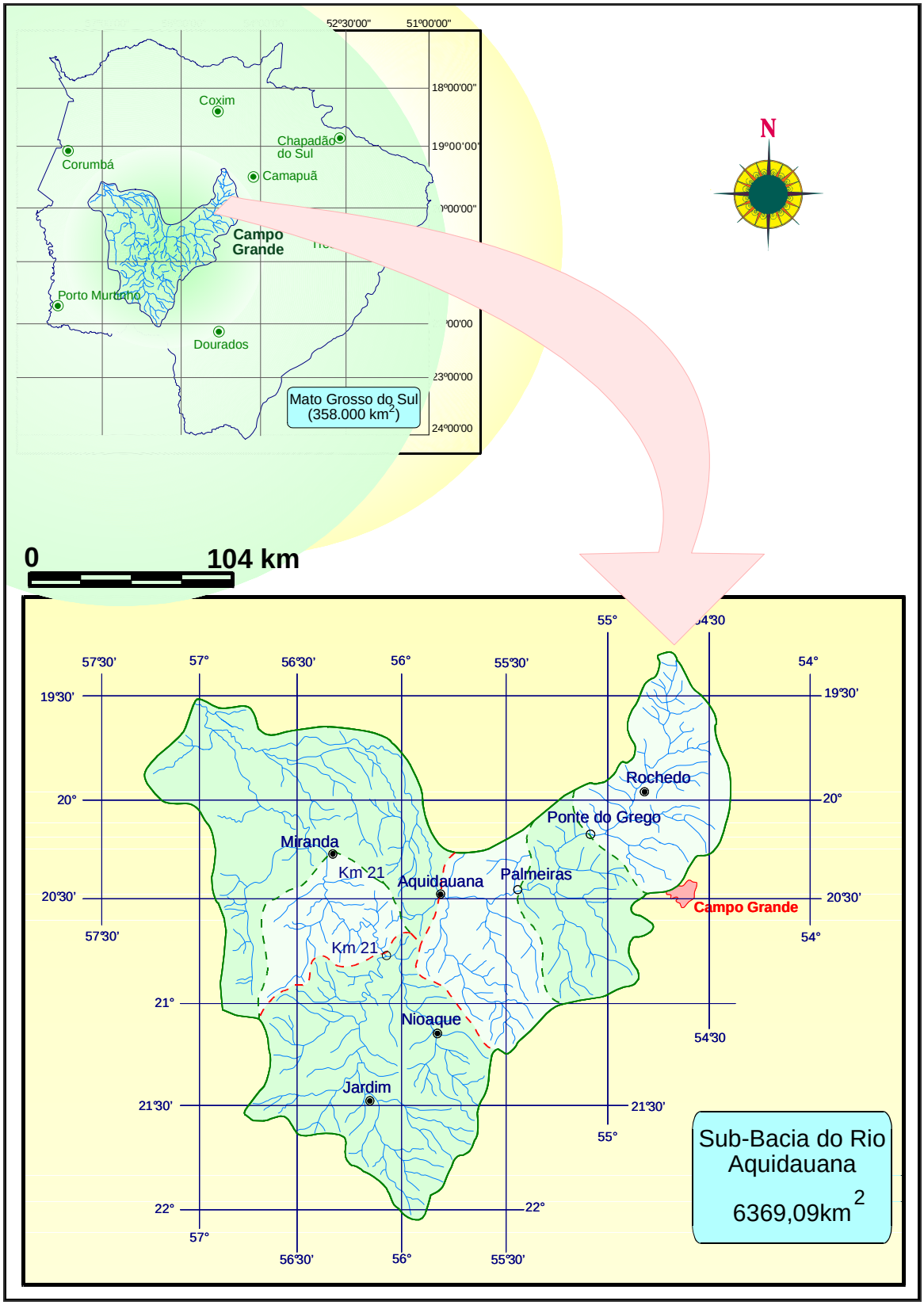


FIGURA 4.2 – Localização da área de estudo.
Fonte: Costa Neto (2005)

4.2 Delineamento e caracterização física das sub-bacias

Conforme Costa Neto (2005), cálculos realizados para determinação dos dados físicos da bacia envolvem as medidas de área, perímetro, extensões de cursos d'água e de curvas de nível, obtidas diretamente com a utilização do planímetro digital e do curvímetro.

Duas partes distintas dividem a bacia hidrográfica do Rio Aquidauana: parte sul e parte norte. Na parte sul, onde predominam os solos com textura silto-argilosa, a bacia é drenada pelos afluentes da margem esquerda, a saber: Cachoeirão, Dois Irmãos e Taquaruçú. A parte norte, onde ocorre predominância de areias quartzosas, bastante suscetíveis à erosão, é drenada pelo curso superior do Rio Aquidauana, cuja área total até a secção da Ponte do Grego é de 6.369 km² e apresentando a extensão de 162,8 km no canal principal de drenagem.

Parte da bacia é ocupada por atividades agrícolas potencialmente irrigáveis, no entanto, o que se verifica na maioria de sua área é cobertura vegetal com pastagens para pecuária. Indústrias frigoríficas e de laticínios estão instaladas na região. Parte da água da bacia é utilizada para abastecimento público da cidade de Aquidauana, localizada à jusante da bacia em questão.

A bacia hidrográfica delimitada no estudo foi discretizada em 100, 26, 11, 04 e 1 sub-bacias, com os correspondentes dados apresentados nas tabelas A.1 até A.5 do Anexo A. Nas discretizações buscou-se homogeneidade das sub-bacias discretizadas, no que se refere, principalmente, à rugosidade, declividade e precipitação efetiva. O levantamento dos dados foi realizado para cada nível de discretização das bacias, visando à alimentação do modelo proposto.

Os valores de rugosidade referentes aos tipos de solo e vegetação foram determinados após análise dos mapas de solo e vegetação e enquadramento de acordo com as Tabelas A.6 a A.8 do Anexo A na estimativa do coeficiente de rugosidade de Manning para planos e para canais.

4.3 Identificação dos postos pluviométricos e determinação das áreas de influência na bacia

Utilizou-se o Método de Thiessen para a determinação da precipitação média sobre as sub-bacias, em situações onde a precipitação efetiva de uma sub-bacia sofre influência de um ou mais postos pluviométricos, conforme Figura 4.3.

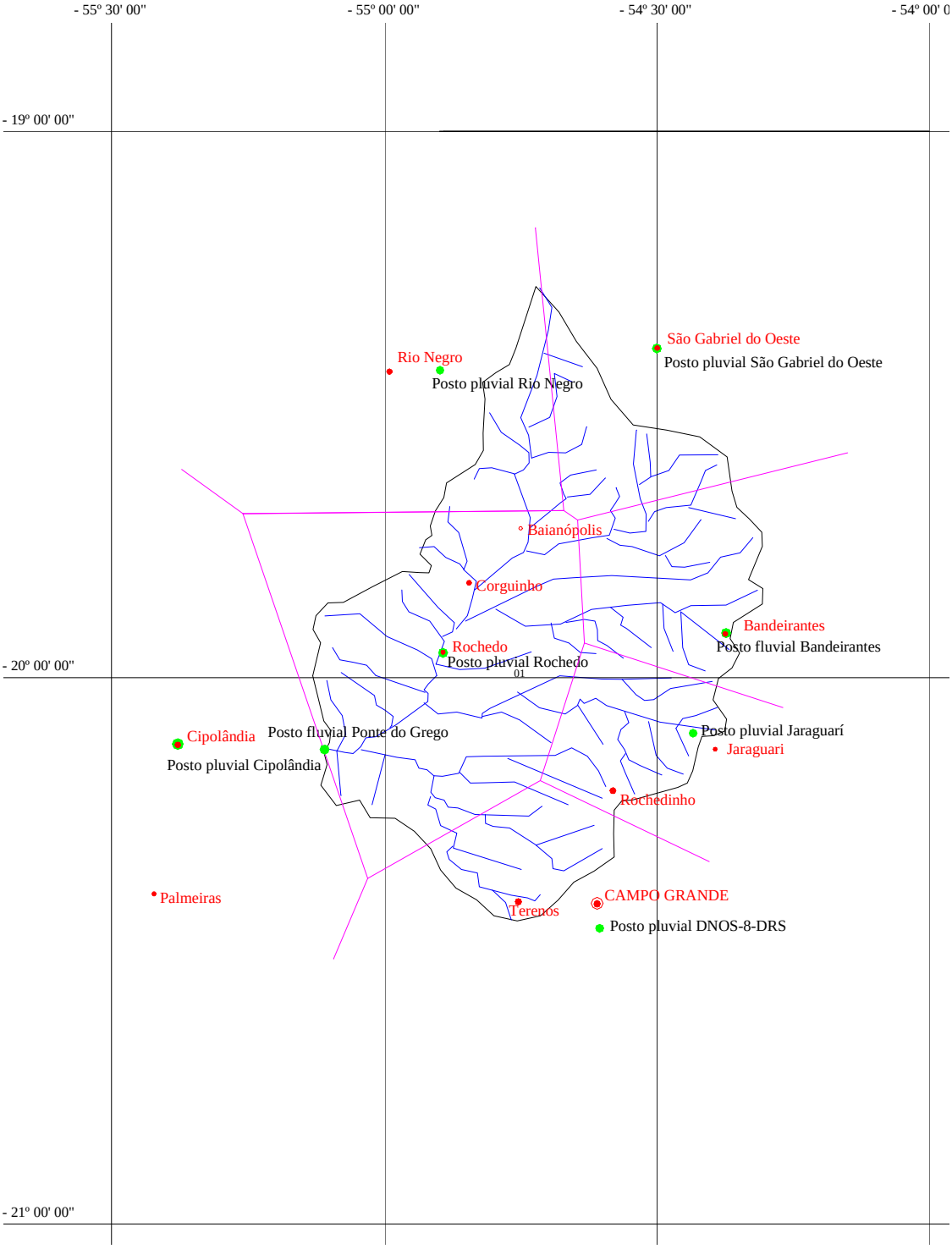


FIGURA 4.3 – Polígono de Thiessen para postos influentes na bacia em estudo.
Fonte: Costa Neto (2005)

Na tabela 4.1 constam as informações sobre os postos fluviométrico na seção da Ponte do Grego e os 07 postos de observação pluviométrica influentes na bacia hidrográfica.

TABELA 4.1 – Dados pluviométricos e fluviométricos influentes na bacia.

Postos	Estação	Área de Influência na Bacia (Km^2)	Porcentagem da Área Total (%)
Ponte do Grego	Fluvial	6.369,09	100,00
Bandeirantes	Pluvial	1.109,49	17,42
Cipolândia	Pluvial	22,93	0,36
DNOS – 8 - DRS	Pluvial	641,37	10,07
Jaraguarí	Pluvial	780,85	12,26
Rio Negro	Pluvial	549,02	8,62
Rochedo	Pluvial	2.635,53	41,38
São Gabriel do Oeste	Pluvial	629,90	9,89

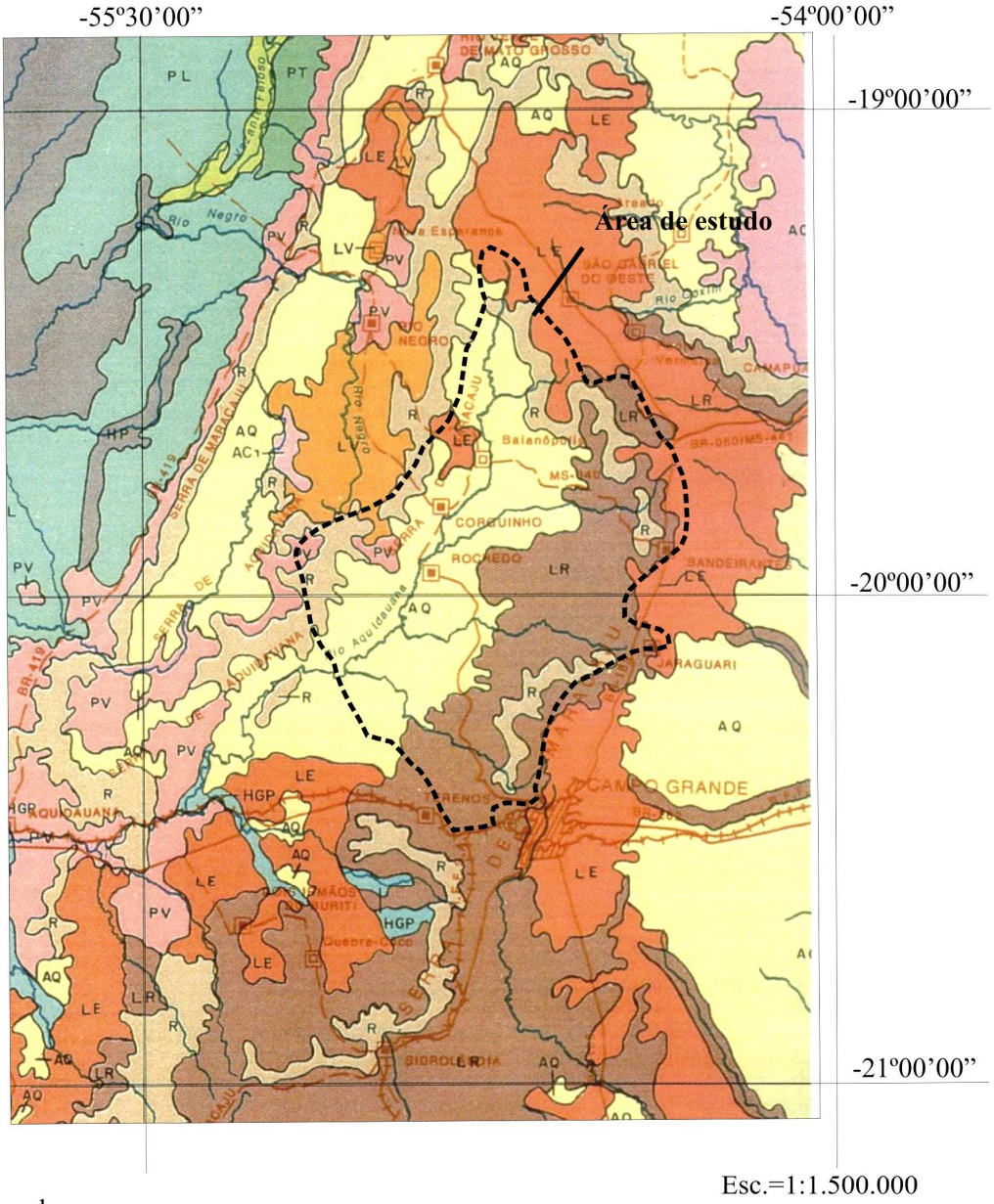
Fonte: Costa Neto (2005)

4.4 Levantamento dos tipos de solo e de sua utilização

O levantamento do tipo de solo e de sua utilização foi elaborado através da análise de mapas componentes do Atlas Multirreferencial de Mato Grosso do Sul (1990), Figuras 4.1 e 4.2. Sobrepondo-se os diferentes mapas de tipo de solo, vegetação e o mapa elaborado das sub-bacias, obteve - se a porcentagem de cada tipo de solo e vegetação presentes em cada sub-bacia.

De acordo com a carta do tipo de solo do Atlas Multirreferencial de Mato Grosso do Sul (1990) a área de estudo apresenta uma variedade de seis tipos de solos, classificados em areias quartzosas (AQ), latossolo roxo (LR), latossolo vermelho-escuro (LE), latossolo vermelho-amarelo (LV), solos litólicos (R) e podzólico vermelho-amarelo (PV).

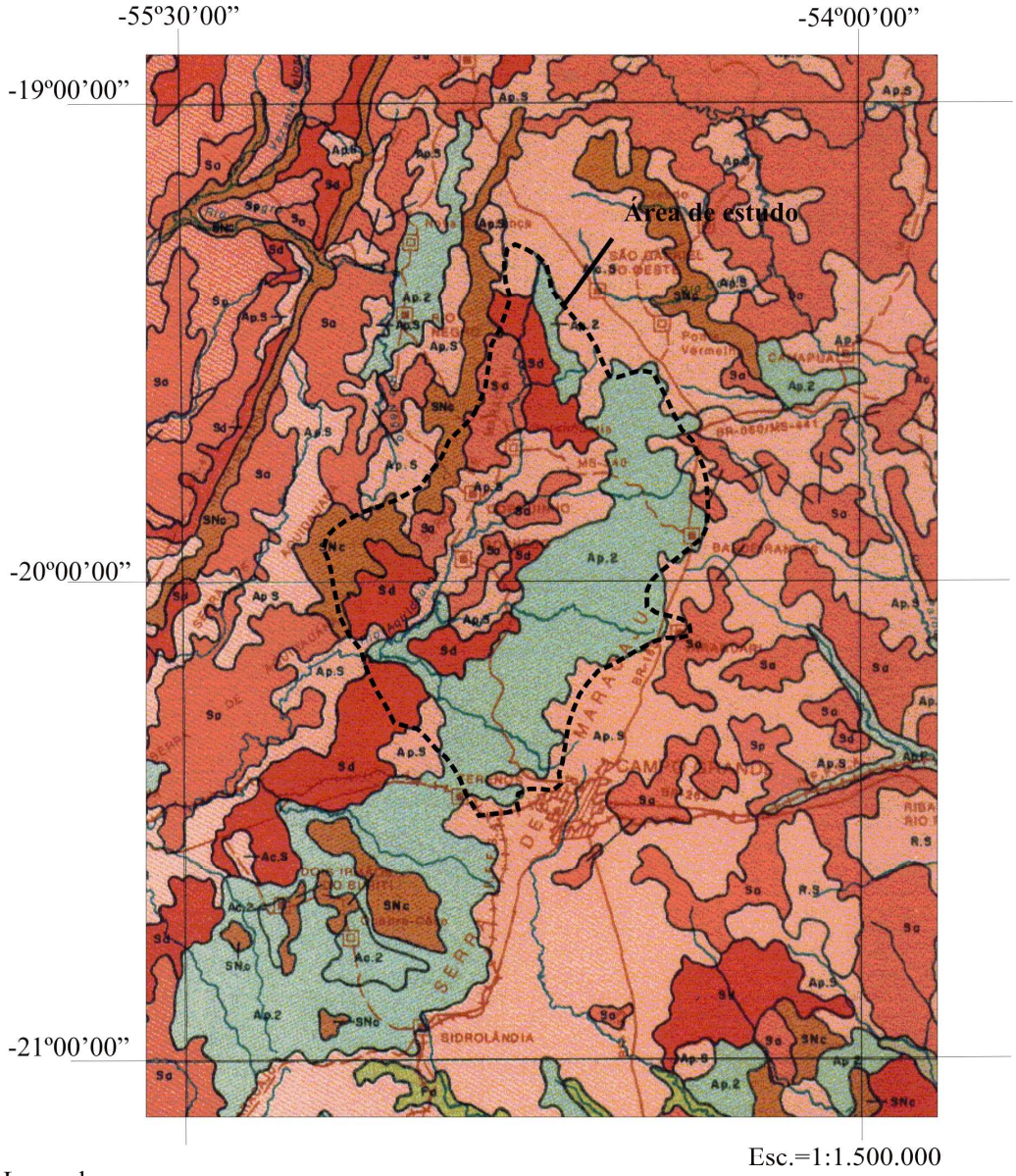
De acordo com a carta do tipo de vegetação do Atlas já mencionado, na área de estudo são encontrados seis tipos de vegetação, a saber: savana arbórea densa - cerradão (Sd), savana arbórea aberta - campo cerrado (Sa), cobertura vegetal antrópica - pastagem (Ap.S), cobertura vegetal antrópica - agropecuária (Ap.2), cobertura vegetal antrópica – agricultura Ac.S e cobertura vegetal natural – encrave, formações (SN.c).



Legenda:

- AQ - Areias quartzosas
- LE - Latossolo vermelho-escuro
- LR - Latossolo roxo
- R - Solos litólicos
- PV - Podzólico vermelho-amarelo
- LV - Latossolo vermelho-amarelo

FIGURA 4.4 – Carta do tipo de solo.
Fonte: MATO GROSSO DO SUL (1990).



Legenda:

- Sd - Savana arbórea densa (cerradão)
- Sa - Savana arbórea aberta (campo de cerrado)
- Ap.S - Cobertura vegetal antrópica (pastagem)
- Ap.2 - Cobertura vegetal antrópica (agropecuária)
- Ac.S - Cobertura vegetal antrópica (agricultura)
- SN.c - Cobertura vegetal natural (encrave/formações)

FIGURA 4.5 – Carta do tipo de vegetação.
Fonte: MATO GROSSO DO SUL (1990).

4.5 Determinação preliminar dos valores do parâmetro Curva Número (CN)

O U. S. *Department of Agriculture Soil Conservation Service* (SCS), atual *National Resources Conservation Service* (NRCS), desenvolveu uma metodologia de relação chuva-

vazão para bacias hidrográficas. A metodologia baseia-se fundamentalmente em um parâmetro que procura descrever o tipo de solo, sua utilização e condição de superfície no que diz respeito à potencialidade de gerar escoamento superficial. Este parâmetro é representado por CN que significa Curva Número.

Na determinação preliminar de valores para o parâmetro CN fez-se o enquadramento dos tipos de solo encontrados na região com os valores tabelados e obteve-se: latossolo roxo (LR), latossolo vermelho-escuro (LE) e areias quartzosas (AQ) são classes de solos enquadradas no tipo A, ou seja, produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração, são solos arenosos profundos com pouco silte e argila, Os demais tipos: latossolo vermelho-amarelo (LV), solos litólicos (R) e podzólico vermelho-amarelo (PV) foram enquadrados na classe B, ou seja, solos arenosos menos profundos do que os anteriores e embora menos permeáveis que os solos tipo A, possuem permeabilidade superior à média conforme disposto na Tabela 4.2.

TABELA 4.2 -Classificação quanto ao tipo de solo

Tipos de solo	Enquadramento para calculo de CN
Latossolo roxo – LR Latossolo vermelho-escuro – LE Areias quartzosas – AQ	Classe de solos enquadradas em solo tipo A: - Baixo escoamento superficial, alta infiltração - Solos arenosos profundos com pouco silte e argila.
Solos litólicos – R Podzólico vermelho-amarelo – PV Latossolo vermelho-amarelo – LV	Classe de solos enquadrados em solo tipo B: - Solos menos permeáveis que o anterior, arenosos, -menos profundos que o tipo A, boa permeabilidade.

O enquadramento com relação ao uso do solo está representado na Tabela 4.3

TABELA 4.3 - Classificação quanto ao uso do solo

Savana arbórea densa – Sd	Classe de florestas densas - V1
Savana arbórea aberta – Sa	Classe de florestas normais - V2
Cobertura vegetal antrópica – Ap.S Cobertura vegetal antrópica – Ap.2	Classe de pastagens normais em curvas de nível - V3
Cobertura vegetal antrópica – Ac.S	Classe de plantações de cereais em curvas de nível - V4
Cobertura vegetal natural – SNc	Classe de florestas esparças - V5

Levando-se em conta o tipo e o uso do solo, fez-se a ponderação preliminar dos valores de CN dispostos na Tabela 4.4, conforme os valores recomendados em Tucci (2001).

TABELA 4.4 - Composição dos tipos e usos do solo com os devidos valores de CN

Tipo de Solo	A		B	
Tipo de Uso	Composição	CN	Composição	CN
V1	A V1 =	26	B V1 =	52
V2	A V2 =	36	B V2 =	60
V3	A V3 =	25	B V3 =	59
V4	A V4 =	62	B V4 =	74
V5	A V5 =	46	B V5 =	68

De acordo com os diferentes tipos e coberturas dos solos de cada região componente das sub-bacias, foram adotados valores recomendados e tabelados para o parâmetro CN. A seguir calculou-se a média ponderada desses valores, levando-se em conta as áreas de ocorrência correspondentes.

4.6 Escolha de um método de otimização de parâmetros e elaboração de programa computacional para implementação

O método da Pesquisa Harmônica é utilizado para melhor ajustar os parâmetros que representam as perdas iniciais ocorridas na bacia hidrográfica e determinação da precipitação efetiva. Para tanto, estipula-se uma variação no valor de CN recomendado pelo método SCS, entre um limite inferior e um limite superior. Divide-se esse intervalo de variação em espaçamento constante, gerando-se 13 variáveis na Memória Harmônica, 10 variáveis representando valores de CN (combinação dos tipos de solo A e B e de cinco tipos de uso do solo), uma que representa a porcentagem de perdas iniciais e 2 outras para as rugosidades nas superfícies e nos canais. O conjunto de variáveis é armazenado em um espaço denominado Memória Harmônica.

Para implementação do método foi elaborado um programa computacional em planilha eletrônica dotada de botões de comando. Cada vez que o comando é acionado, são gerados NMH conjuntos de 13 variáveis, sendo feita a verificação quanto à harmonia de todos os conjuntos, representada pelos valores mínimos de funções objetivo, ordenadas de modo crescente. A seguir, gera-se para cada variável um novo valor com base em 90% dos valores contidos na Memória Harmônica. Se o novo conjunto possuir melhor harmonia, o pior conjunto que estava na Memória Harmônica é descartado e o novo conjunto passa a fazer parte da mesma. Nesta fase define-se o número de iterações (NIT) a realizar.

4.7 Escolha de um modelo de transformação de chuva em vazão e elaboração de programa para implementação

Através dos modelos chuva-vazão torna-se possível obter vazões desconhecidas ou estimá-las para novos cenários existentes ou previstos para as bacias em função das chuvas efetivas disponíveis. Esses modelos devem descrever a distribuição espacial da precipitação levando em consideração os diferentes tipos de perdas ocorridas e o escoamento nos planos e no canal que compõem a bacia hidrográfica. Os cálculos utilizados, neste trabalho, para determinação dos dados físicos da bacia envolvem as medidas de área, perímetro, extensões de cursos de água e de curvas de nível, obtidas diretamente com a utilização de planímetro digital e de curvímetro.

Adotou-se o modelo de discretização da bacia em forma de "V", pela transformação da superfície em planos de escoamento retangulares, considerando que a largura e a declividade fossem constantes para cada lado do canal, mas diferentes entre si. Para retangularização dos planos laterais fez-se necessária a determinação de uma largura média, obtida através da divisão da área da superfície pelo comprimento do canal.

Foi utilizado o Método do SCS para determinação da precipitação efetiva, obtendo-se a precipitação efetiva acumulada e, em seguida, desacumulando-se os valores.

O Modelo da Onda Cinemática foi usado para propagar a precipitação efetiva na superfície e nos canais das sub-bacias. Para resolução das equações do modelo citado foi adotado o método numérico explicito de diferenças finitas para variáveis adimensionalizadas.

Para determinação dos coeficientes de rugosidade de Manning nos planos e no canal fez-se o enquadramento dos tipos de solo e vegetação, encontrados na bacia, em função dos mapas disponíveis e adotados os correspondentes valores tabelados.

Foram calculadas as declividades nos planos e nos canais para todas as bacias, conforme o nível de discretização espacial considerado.

Com relação à determinação da declividade nos planos, calculou-as a declividade media da bacia, para cada plano através da equação 4.1:

$$S = \frac{(\sum L).d}{A} \tag{4.1}$$

Onde:

S – Declividade;

ΣL – Comprimento total das curvas de nível de cada lado da bacia;

d – Desnível entre curvas de nível;

A – Área de cada plano da bacia.

A declividade dos canais foi calculada utilizando-se a equação 4.2, da declividade equivalente constante.

$$S = \frac{L^2}{\left[\sum\left(\frac{L_i}{\sqrt{I_i}}\right)\right]^2} \tag{4.2}$$

Onde:

L – Comprimento total em planta;

L_i – Comprimento do sub-trecho;

I_i – Declividade do sub-trecho $\left(I_i = \frac{\Delta H}{L}\right)$

ΔH – Diferença de cotas entre os extremos.

O modelo computacional é alimentado com dados físicos e pluvio-fluviométricos das bacias, obedecendo a uma ordem para o encadeamento dos dados de entrada, conforme a posição das bacias. De acordo com as discretizações previamente realizadas, torna-se possível definir quantas contribuições de montante possui a sub-bacia em cálculo e quais são essas contribuições.

4.8 Levantamento dos dados pluvio-fluviométricos e escolha de eventos

O levantamento dos dados pluvio-fluviométricos foi realizado através de um estudo de séries temporais disponíveis para postos influentes na bacia escolhida, referentes a chuva e vazão, tendo como finalidade selecionar eventos capazes de fornecer hidrogramas bem definidos e chuvas correspondentes, possibilitando, desta forma, uma melhor análise dos resultados obtidos.

4.9 Fase de ajuste dos modelos e funções objetivo

Nesta fase os dados registrados da saída são utilizados para determinar os parâmetros. O método utilizado para estimativa dos parâmetros é o ajuste por otimização. Com valores das variáveis de entrada e saída, o ajuste por otimização foi realizado utilizando métodos

matemáticos, onde as funções objetivo são otimizadas, retratando a diferença entre os dados observados e aqueles calculados pelo modelo.

Na fase de ajuste do modelo, as funções objetivo são métodos de avaliação do desempenho do mesmo.

Através da implementação de programa computacional, alimentado com dados físicos e pluvio-fluviométricos, previamente ajustado no que se refere à discretização da bacia e a possíveis contribuições de montante, obtém-se, para o evento em questão a vazão simulada (Q_{sim}). Fazendo-se a diferença entre as vazões observadas (Q_{obs}) e as vazões do escoamento de base (Q_{base}) obtem-se a vaz~zo corrigida (Q_{cor}) para os n valores da série, e calculando-se o erro quadrático mínimo $(Q_{cor} - Q_{sim})^2$ em relação à vazão média ($\overline{Q}_{cor}$) dos dados observados, resulta na primeira função objetivo:

$$F_{obj}1 = \frac{\sqrt{\dfrac{\sum (Q_{cor} - Q_{sim})^2}{n}}}{\overline{Q}_{cor}} \tag{4.3}$$

Com a obtenção do hidrograma na seção de interesse e da análise do mesmo faz-se:

$$V_{ol\ cor} = \sum Q_{cor}\ .\Delta t \tag{4.4}$$

$$V_{ol\ sim} = \sum Q_{sim}\ .\Delta t \tag{4.5}$$

De posse desses volumes, torna-se possível calcular a segunda função objetivo, visando preservar o volume escoado:

$$F_{obj}2 = \left(\frac{V_{ol\ cor} - V_{ol\ sim}}{V_{ol\ cor}}\right).100 \tag{4.6}$$

Analizando-se o hidrograma verifica-se e erro percentual entre as vazões de pico, resultando na terceira função objetivo:

$$F_{obj}3 = \left(\frac{Q_{cor} - \mathrm{Q}_{sim}}{Q_{cor}}\right).100 \tag{4.7}$$

Verificando-se a posição relativa entre os tempos de pico, tem-se a quarta função objetivo:

$$F_{obj}4 = \left(\frac{t_{pcor} - \mathrm{t}_{psim}}{t_{pcor}}\right).100 \tag{4.8}$$

Na quinta função objetivo utilizou-se a segunda parcela à direita do coeficiente de determinação de Nash-Sutcliffe, pois trata-se de um processo de minimização dos erros.

$$F_{obj}5 = 1 - \frac{\sum (Q_{cor} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{cor} - \overline{Q}_{cor})^2} \tag{4.9}$$

e por fim, faz-se a ponderação para uma única função objetivo, a ser minimizada

$$F_{obj} = \frac{(w_1 . F_{obj}1 + w_2 . F_{obj}2 + w_3 . F_{obj}3 + w_4 . F_{obj}4 + w_5 . F_{obj}5)}{(w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5)} \tag{4.10}$$

onde os coeficientes w_i são pesos referentes à importância de cada uma das funções objetivo $F_{obj,i}$ utilizadas no ajuste e descritas pelas equações 4.3 até 4.9. Para avaliar a importância individual das funções, atribuiu-se a cada uma peso igual a 1 e zero para as demais, combinações de duas ou mais funções e também todas com pesos iguais a 1.

4.10 Fase de verificação dos parâmetros ajustados

A fase de verificação é a simulação do modelo com os parâmetros determinados no processo de otimização ou calibração, onde se verifica a validade do ajuste realizado. O modelo, calibrado anteriormente, é verificado com outros dados. Nesta fase os dados de saída são utilizados para observar se o modelo, cujos parâmetros foram ajustados na fase anterior, simula o sistema adequadamente.

Visando avaliar o desempenho do modelo proposto e validação do mesmo, foram realizados diversos testes e simulações para os eventos selecionados e para diferentes níveis de discretização da bacia.

4.11 Fase de simulação ou de utilização dos modelos

A simulação é o processo de utilização do modelo, que depois de ajustado e verificado, é utilizado para representar a saída do sistema para situações desconhecidas.

Nesta fase ocorre a simulação do sistema pelo modelo com parâmetros ajustados com a finalidade de quantificar os resultados para diferentes entradas.

Conforme Tucci, (1998) a qualidade dos resultados obtidos está diretamente relacionada com a representatividade dos eventos usados no ajuste e na verificação, da discretização, das condições de contorno do sistema e da possibilidade do modelo em simular as situações escolhidas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Escolha do método de otimização de parâmetros e elaboração de programa computacional do modelo de simulação

A elaboração do programa computacional para simular o processo de transformação de chuva em vazão com otimização de parâmetros para o modelo de simulação escolhido, foi realizado utilizando várias planilhas eletrônicas do *MS-Excel* e empregando a linguagem VBA (*Visual Basic for Aplications*). O método usado na otimização de parâmetros foi o da Pesquisa Harmônica (*Harmony Search*), apresentado na revisão bibliográfica. Utilizou-se uma Memória Harmônica de 100 valores gerados aleatóriamente para os 10 valores de CN (conforme composição da Tabela 4.4), um valor do coeficiente de rugosidade n_s para as superfícies e um valor de n_c para os canais, além de um valor porcentual β da máxima capacidade de armazenamento S do método SCS, para definir a abstração inicial, totalizando treze variáveis. Inicialmente, estimou-se um valor de CN para cada variável conforme as tabelas apresentadas na literatura e estipulou-se uma faixa de variação com limites inferior e superior, o mesmo acontecendo com os coeficientes de rugosidade e da abstração inicial, conforme se apresenta na Tabela 5.1.

TABELA 5.1 – Limites inferior e superior das variáveis para otimização.

Linf	Lsup
21	31
31	41
20	30
57	67
41	51
47	57
55	65
54	64
69	79
63	73
0,01	0,05
0,01	0,05
0,01	0,20

Uma rotina de geração de números aleatórios foi escrita para a leitura dos limites estabelecidos para cada variável e a geração de um valor entre estes limites, conforme

mostrado na Tabela 5.2, dentro de uma Memória Harmônica com 10 a 200 valores para cada uma das treze variáveis envolvidas no processo de simulação e de 100 a 400 valores para as iterações. Um botão de comando é acionado para iniciar o procedimento de geração.

A cada vez, uma linha da Memória Harmônica é processada e os valores de CN que nela constam são transportados automaticamente para cinco planilhas, denominadas “CN_100”, “CN_26”, “CN_11”, “CN_4” e “CN_1”, todas interligadas e que contém as informações necessárias para o cálculo da precipitação efetiva, em conformidade com o Método do *Soil Conservation Service (*SCS).

TABELA 5.2 – Valores gerados para as variáveis com Memória Harmônica de 10 valores.

Variáveis / NMH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	26	35	22	63	45	49	60	61	72	66	0,01	0,01	0,01
2	29	34	28	57	44	56	58	54	70	69	0,02	0,02	0,02
3	24	33	25	62	50	50	63	63	77	64	0,01	0,01	0,01
4	25	39	28	57	43	48	62	54	73	70	0,01	0,01	0,01
5	29	37	22	61	45	51	60	56	69	65	0,04	0,04	0,04
6	21	31	23	61	45	50	62	54	78	69	0,02	0,02	0,02
7	24	38	22	60	47	55	57	58	71	72	0,03	0,03	0,03
8	30	40	24	58	45	48	57	61	71	67	0,02	0,02	0,02
9	27	37	20	62	50	55	62	63	71	68	0,04	0,04	0,04
10	28	40	23	59	49	55	60	62	69	64	0,04	0,04	0,04

A Tabela 5.3 mostra a planilha “CN_1” referente à simulação da discretização espacial como uma única bacia, formada pelos planos à direita e à esquerda e um canal central. Na 4ª coluna entram os valores de CN e com as porcentagens de área da 6ª coluna, relativas a diferentes tipos e usos de solo, são compostos na 7ª coluna para a determinação da capacidade máxima de retenção S. Na 10ª coluna entra o valor da precipitação acumulada para o intervalo de tempo em consideração, que foi ponderada entre os diversos postos influentes na sub-bacia. A variável β (beta) refere-se à porcentagem de abstração que também foi gerada aleatoriamente e serve para definir a precipitação efetiva acumulada até o momento considerado.

TABELA 5.3 – Planilha “CN_1” referente à discretização em uma única bacia, para cálculo da chuva efetiva.

									Beta =	0,02	
Caracterização das áreas das bacias quanto ao tipo e uso do solo.								P - Preciptação total			
				Dados relacionados com a planilha do enquadramento							
Bacias (nº)	**Lado**	**Área (Km²)**	**Coef. CN**	**Área p/ calc. CN**	**% da área**	**CN médio**	**S (Param.)**	**P>Beta*S (Cond. Eq. Pe)**	**Precip. total**	**Calc. cond.**	**Pe Calc.**
1	LD	4985,14	36,82	1.259,44	25,26						
			28,91	1.069,40	21,45						
			28,26	1.231,90	24,71						
			29,08	1.424,40	28,57	31	570,74	11,41	64,25	4,48	4,48
	LE	1383,95	36,65	403,35	29,14						
			32,92	267,10	19,30						
			32,29	486,20	35,13						
			28,08	227,30	16,42	33	515,89	10,32	79,10	8,09	8,09

Para a Memória Harmônica composta de apenas 10 conjuntos de variáveis e de 50 a 100 iterações houve rápida convergência nos valores de CN, mas os resultados não foram satisfatórios. Assim, foi necessário aumentar a Memória Harmônica para mais de 100 valores e também o número de iterações, implicando em aumento significativo do tempo de computação.

Posteriormente, fez-se cada uma das dez variáveis CN variar desde 1 até 99 para a geração da Memória Harmônica, com 100 a 200 conjuntos de variáveis e um número de iterações entre 100 e 400. A cada resultado, foram selecionados os 10 melhores conjuntos ordenados, escolhendo-se os limites inferiores e superiores de cada variável para uma nova geração. O método prosseguiu até que os valores das variáveis se tornassem constantes, definindo então o ajuste.

5.2 Escolha de um modelo de transformação de chuva em vazão e elaboração de programa para implementação

Uma planilha denominada “simulação” foi preparada para receber os dados de cada plano e canal que representam uma sub-bacia, assim como a chuva em cada intervalo de tempo, gerando o escoamento superficial nos planos e uma vez concentrados nos canais o escoamento é propagado. O ordenamento das bacias é essencial para o cálculo correto. Inicialmente são calculados os hidrogramas nas bacias de primeira ordem e estes servem de

condição de contorno no cálculo das bacias de maiores ordens e que recebem contribuintes de montante.

Um teste de funcionamento da planilha “simulação” foi feito com um exemplo apresentado por Stephenson, D.; Meadows, M. E., (1986) e o resultado foi reproduzido. Os valores iniciais para solução do método numérico apresentam certa sensibilidade, provocando alterações na resposta que podem ser consideradas significativas.

5.3 Levantamento dos dados pluvio-fluviométricos e escolha de eventos

Para determinação dos intervalos de chuvas, foram escolhidos seis eventos correspondendo a hidrogramas bem definidos, com objetivo de melhor análise final dos dados obtidos. Dos hidrogramas foram retirados os volumes correspondentes ao escoamento de base, permanecendo apenas os volumes escoados superficialmente para comparação aos volumes determinados pela precipitação efetiva, calculada pelo Método do SCS. As tabelas do Anexo B mostram as alturas precipitadas nos sete postos considerados influentes na bacia e as vazões na Ponte do Grego. Na planilha “CN_100” constam células para entrada de informações sobre o evento desejado e o número de sub-bacias onde se fará a simulação, tal como é apresentado na Tabela 5.4. Ao acionar um botão de comando, específico para a leitura dos dados na planilha “Eventos”, são apresentadas na planilha as datas de início e fim do evento, os dias de chuva e de duração do hidrograma. Os valores de precipitação são dispostos na planilha para os sete postos e acumulados dia a dia para toda a duração do evento.

TABELA 5.4 – Escolha do evento e número de sub-bacias para a simulação

Evento (1 a 6) =	4	Inicio :	10/12/1995	Fim :	03/01/1996	
Num de Postos =	7	**Número de Sub-Bacias? =**		**1**	NSB =	1
		Dias de chuva =		13	Bacia =	1
		Dias de vazão =		13	TSB =	0

A seguir, como mostrado na Tabela 5.5, os valores acumulados da chuva são lançados em coluna interligada às planilhas que determinam os valores acumulados da chuva efetiva pelo Método do SCS e após dispostos dia a dia, são desacumulados para formar os hietogramas de chuva efetiva relativamente aos planos de cada uma das sub-bacias, como apresentado na Figura 5.1.

TABELA 5.5 – Entrada dos dados de precipitação acumulada para cálculo da chuva efetiva.

Posto	Sigla	Precipitação Total
Jaraguari	J	0,00
DNOS	D	78,00
Bandeirantes	B	68,30
Rio Negro	RN	54,00
Rochedo	R	88,60
São Gabriel	SG	71,50
Cipolândia	C	129,60

5.4 Fase de ajuste dos modelos

Nesta fase, cada evento de escoamento e as correspondentes chuvas registradas nos postos de influência, são utilizados na determinação do conjunto ótimo de parâmetros, atendendo a alguns dos objetivos propostos nas funções objetivo consideradas.

Inicialmente, o Evento 2a apresentado na Tabela 5.6, com 25 dias de vazões e respectivas chuvas registradas no período para os sete postos influentes, foi escolhido como teste do primeiro ajuste, considerando uma memória harmônica com 10 conjuntos de 10 variáveis CN e da porcentagem β para cálculo da abstração inicial, seguindo-se de 100 iterações, conforme consta na Tabela 5.7. A Figura 5.1 mostra o hietograma de chuva efetiva resultante do referido evento, para o caso de uma bacia.

O resultado do ajuste é mostrado na Tabela 5.8 e na Figura 5.2 atendendo apenas a função objetivo dada pela equação (4.3), lembrando que as vazões calculadas pelo modelo, correspondem a intervalos de tempo menores que aquelas observadas correspondendo a valores diários. Acontece que os picos calculados, às vezes não são mostrados nas tabelas ou figuras por equivalerem a intervalos de tempo intermediários, que neste caso são de 6 horas ou 4 intervalos diários.

TABELA 5.6 – Chuvas (mm) e vazões (m^3/s) observadas nos postos para o Evento 2a

Data	Jaraguari	DNOS	Bandeirantes	Rio Negro	Rochedo	São Gabriel	Cipolândia	Ponte do Grego
16-abr-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	54,70
17-abr-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	56,80
18-abr-95	0,00	15,20	0,00	0,80	73,00	50,00	0,00	76,60
19-abr-95	0,00	34,60	28,50	39,20	0,00	20,50	97,00	214,00
20-abr-95	0,00	16,00	0,00	4,20	15,60	0,00	4,30	149,00
21-abr-95	0,00	5,60	0,00	7,00	0,00	0,00	0,00	146,00
22-abr-95	0,00	0,00	26,30	0,00	0,00	0,00	0,90	118,00
23-abr-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	95,10
24-abr-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	75,40
25-abr-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	69,50
26-abr-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	65,50
27-abr-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	63,80
28-abr-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	62,70
29-abr-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	61,60
30-abr-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	60,50
1-mai-95	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	60,00
2-mai-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	58,90
3-mai-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	57,30
4-mai-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	57,30
5-mai-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	55,20
6-mai-95	0,00	4,80	11,00	0,00	0,00	0,00	27,40	66,60
7-mai-95	0,00	1,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	69,50
8-mai-95	0,00	0,00	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00	66,10
9-mai-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	61,60
10-mai-95	0,00	0,00	0,00	0,80	0,00	0,00	0,00	58,90

TABELA 5.7 – Dados de entrada para geração das variáveis.

	Linf	Lsup
Num Variáveis = 11	21	31
Num Harmon = 10	31	41
Num Iterações = 100	20	30
	57	67
	41	51
	47	57
	55	65
	54	64
	69	79
	63	73
Porcentagem (□)	0,01	0,05

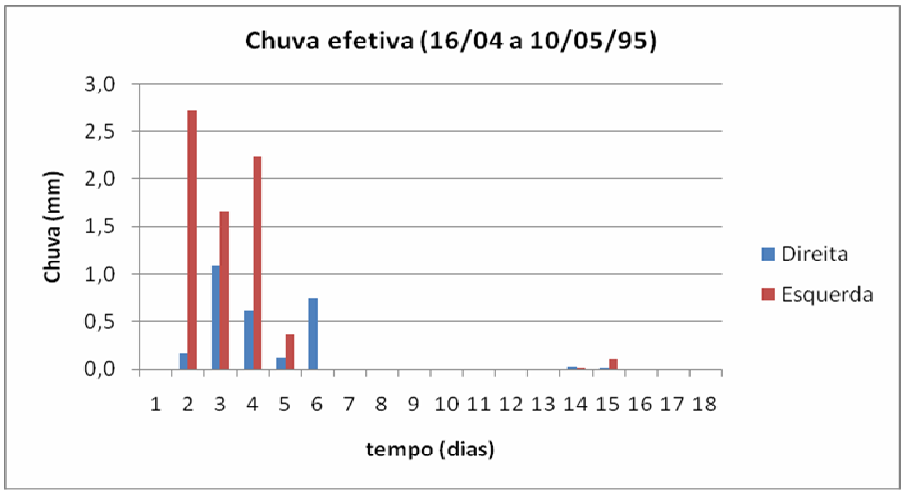


FIGURA 5.1 – Hietograma de chuva efetiva determinado pelo Método do SCS para uma bacia.

TABELA 5.8 - Resultado da simulação para o Evento 2a.

Tempo (dia)	Qobs(m^3/s)	Qbas (m^3/s)	Qcor (m^3/s)	Qsim (m^3/s)
16/04/1995	54,7	54,7	0,0	0,0
17/04/1995	56,8	54,9	1,9	0,0
18/04/1995	76,6	55,0	21,5	46,3
19/04/1995	214,0	55,2	158,8	121,2
20/04/1995	149,0	55,4	93,6	126,8
21/04/1995	146,0	55,6	90,4	90,2
22/04/1995	118,0	55,8	62,3	42,7
23/04/1995	95,1	55,9	39,2	19,2
24/04/1995	75,4	56,1	19,3	8,7
25/04/1995	69,5	56,3	13,2	4,3
26/04/1995	65,5	56,5	9,0	2,1
27/04/1995	63,8	56,6	7,2	1,0
28/04/1995	62,7	56,8	5,9	0,5
29/04/1995	61,6	57,0	4,6	0,2
30/04/1995	60,5	57,2	3,3	0,1
01/05/1995	60,0	57,3	2,7	0,8
02/05/1995	58,9	57,5	1,4	1,7
03/05/1995	57,3	57,7	-0,4	1,7
04/05/1995	57,3	57,8	-0,5	1,4
05/05/1995	55,2	58,0	-2,8	0,9
06/05/1995	66,6	58,2	8,4	1,7
07/05/1995	69,5	58,4	11,1	2,2
08/05/1995	66,1	58,5	7,5	2,3
09/05/1995	61,6	58,7	2,9	1,9
10/05/1995	58,9	58,9	0,0	1,6

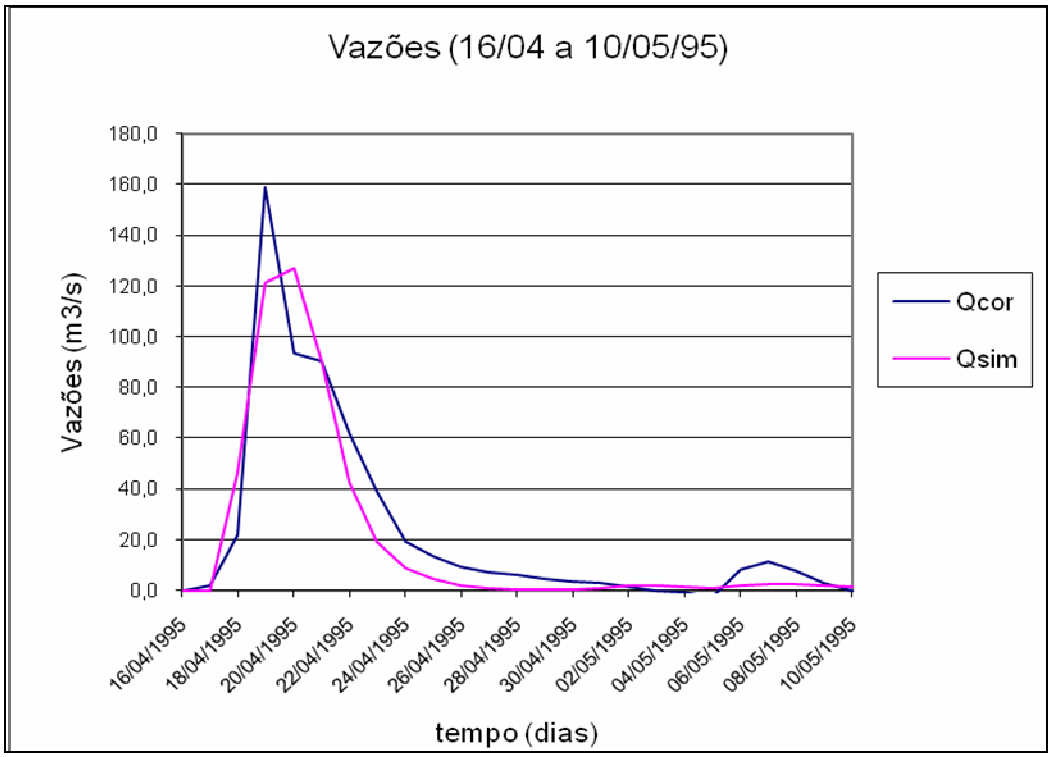


FIGURA 5.2 – Hidrogramas observado e calculado pelo Método do SCS para o Evento 2a.

Na tentativa de diminuir o intervalo de tempo para cálculo das equações diferenciais do modelo da onda cinemática, passando de 4 para 8 intervalos diários, o número de dias do hidrograma observado foi reduzido de 25 para 13 dias. Nesta etapa a função objetivo utilizada restringiu-se à minimização da soma dos quadrados dos desvios entre valores simulados e observados.

Foram depois incluídas as funções objetivo propostas nas equações (4.6) até (4.9) para obtenção de novos ajustes. No entanto, conforme os valores obtidos para cada uma destas funções é necessário obter um peso para que cada uma delas tenha a mesma influência das demais na determinação dos parâmetros. Procurou-se estabelecer as funções de maneira que os seus valores estivessem nas proximidades ou inferiores à unidade e foi utilizado peso unitário para cada uma delas. No entanto, foram utilizadas as funções isoladamente ou em combinação para o Evento 1, como mostrado nas tabelas C.1 a C.5 do Anexo C e figuras D.1 a D.10 do Anexo D.

Na Tabela 5.9 constam os dez melhores resultados em três ajustes distintos para o Evento 1, considerando NMH=200 e NIT=300 e todas as funções objetivo. Nota-se que os resultados conduzem a diferentes conjuntos de parâmetros, não havendo inclusive a convergência para um único valor de cada variável no mesmo ajuste, muito embora seus valores médios estejam bastante próximos. Quanto maior for NMH maior a probabilidade de

combinação dos parâmetros e maior deverá ser o número de iterações NIT para que haja convergência. Na Figura 5.3 verifica-se pequenas diferenças de valores nas simulações com o melhor resultado de cada um dos três ajustes mostrados na Tabela 5.9, apesar do mesmo formato gráfico.

TABELA 5.9 – Os 10 melhores resultados para três gerações distintas do Evento 1 (NMH = 200; NIT =300;) com as cinco funções objetivo

variav	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**Fobj1**	**Fobj2**	**Fobj3**	**Fobj4**	**Fobj5**	**Fobj**
1	31	44	46	62	45	55	61	63	74	66	0,116	0,099	0,004	0,89	0,18	0,27	0,39	0,71	0,49
2	35	44	41	62	45	54	60	59	74	67	0,067	0,038	0,019	0,96	0,33	0,31	0,03	0,83	0,49
3	35	36	46	62	45	59	64	60	74	66	0,020	0,004	0,028	1,06	0,31	0,10	0,02	1,00	0,50
4	35	39	46	62	45	59	60	60	74	66	0,129	0,015	0,028	0,96	0,35	0,34	0,03	0,82	0,50
5	33	42	45	62	45	58	61	60	74	66	0,001	0,046	0,040	0,97	0,43	0,25	0,02	0,84	0,50
6	26	39	46	62	45	52	62	64	74	67	0,076	0,113	0,001	0,90	0,20	0,27	0,41	0,73	0,50
7	34	39	45	62	45	58	62	61	74	66	0,001	0,004	0,025	1,11	0,26	0,03	0,02	1,11	0,51
8	27	41	46	62	45	59	64	65	74	66	0,001	0,137	0,028	0,93	0,38	0,44	0,02	0,77	0,51
9	33	36	43	62	45	56	60	65	74	66	0,107	0,068	0,001	0,94	0,19	0,20	0,42	0,79	0,51
10	30	44	45	62	45	58	64	63	74	67	0,141	0,076	0,019	0,92	0,34	0,46	0,08	0,76	0,51
media	32	40	45	62	45	57	62	62	74	66	0,066	0,060	0,019						
1	34	39	46	62	45	59	63	66	74	67	0,004	0,135	0,013	0,89	0,21	0,34	0,03	0,71	0,43
2	32	43	46	62	45	53	62	59	74	67	0,015	0,149	0,010	0,88	0,22	0,38	0,03	0,70	0,44
3	34	44	46	62	45	52	63	63	74	67	0,004	0,044	0,022	0,99	0,24	0,11	0,02	0,88	0,45
4	34	39	46	62	45	55	65	65	74	67	0,015	0,135	0,016	0,90	0,27	0,40	0,03	0,73	0,46
5	34	42	43	62	45	58	65	62	74	67	0,004	0,053	0,025	0,96	0,32	0,20	0,02	0,83	0,47
6	34	38	46	62	45	59	60	64	74	67	0,104	0,004	0,022	0,99	0,27	0,19	0,02	0,88	0,47
7	32	44	43	62	45	55	61	66	74	66	0,093	0,004	0,022	0,99	0,30	0,20	0,02	0,89	0,48
8	34	44	46	62	45	52	64	66	74	66	0,089	0,046	0,022	0,94	0,29	0,33	0,05	0,80	0,48
9	32	40	46	62	45	58	62	63	74	67	0,082	0,120	0,001	0,89	0,16	0,24	0,41	0,71	0,48
10	27	43	43	62	45	57	62	64	74	67	0,013	0,091	0,016	0,94	0,31	0,35	0,03	0,79	0,48
media	33	42	45	62	45	56	63	64	74	67	0,042	0,078	0,017						
1	33	44	45	62	45	59	62	65	74	67	0,015	0,108	0,016	0,91	0,24	0,31	0,03	0,74	0,45
2	33	41	46	62	45	56	61	59	74	66	0,010	0,101	0,016	0,92	0,25	0,31	0,03	0,76	0,45
3	34	43	44	62	45	53	63	62	74	66	0,025	0,126	0,016	0,91	0,30	0,41	0,05	0,74	0,48
4	35	41	39	62	45	59	65	59	74	67	0,025	0,108	0,010	0,92	0,30	0,39	0,05	0,75	0,48
5	34	43	45	62	45	59	62	63	74	67	0,110	0,055	0,019	0,92	0,29	0,37	0,06	0,77	0,48
6	32	44	46	62	45	54	61	65	74	67	0,013	0,037	0,034	0,98	0,37	0,22	0,02	0,86	0,49
7	32	36	45	62	45	56	63	66	74	66	0,015	0,082	0,019	0,95	0,31	0,34	0,03	0,81	0,49
8	32	40	38	62	45	58	65	64	74	67	0,017	0,101	0,010	0,93	0,32	0,39	0,03	0,78	0,49
9	33	36	45	62	45	59	65	64	74	67	0,067	0,096	0,001	0,93	0,16	0,18	0,42	0,78	0,49
10	35	41	42	62	45	56	61	64	74	67	0,023	0,101	0,019	0,93	0,34	0,40	0,03	0,78	0,50
media	33	41	44	62	45	57	63	63	74	67	0,032	0,091	0,016						

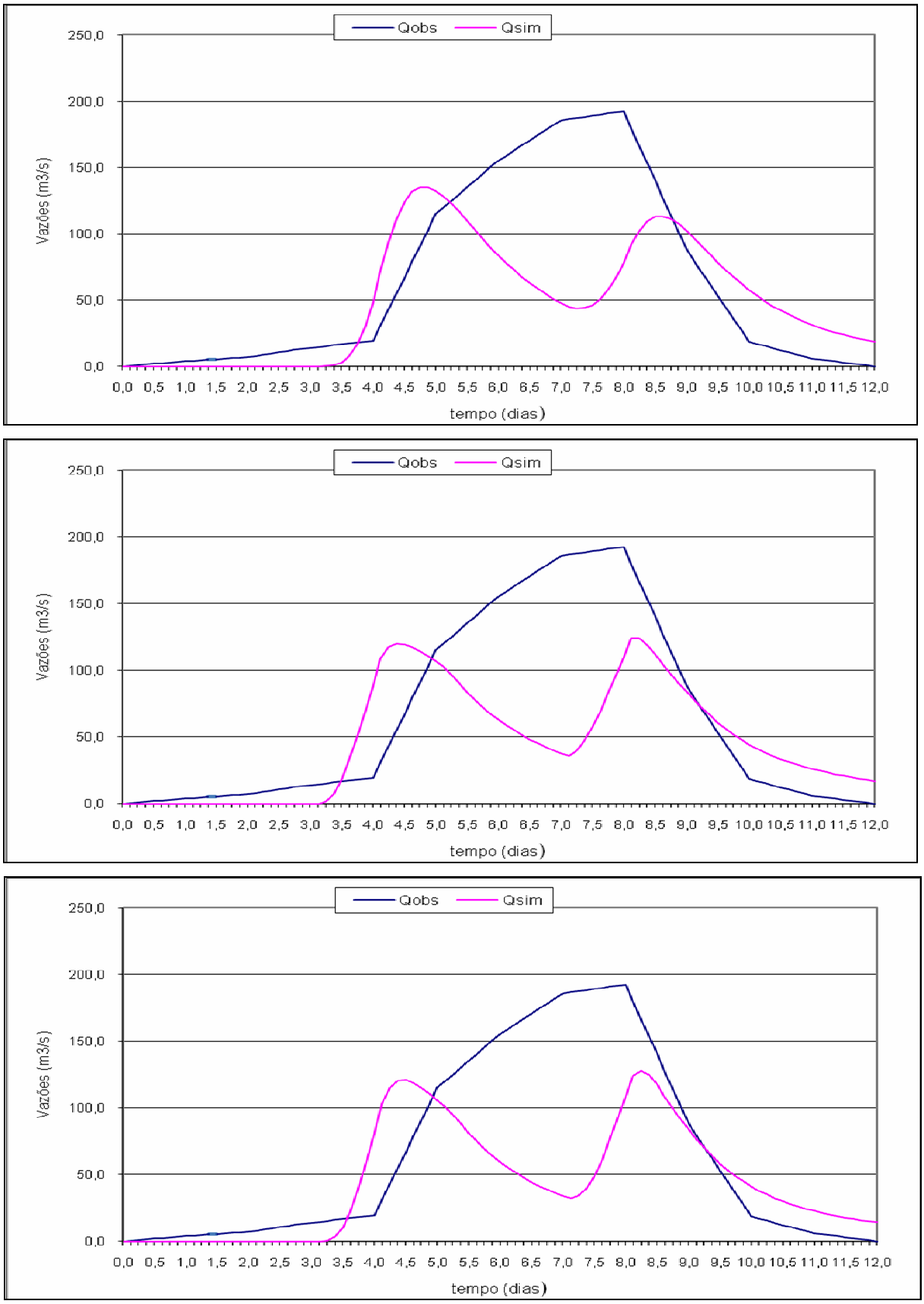


FIGURA 5.3 – Comparação dos melhores resultados de cada um dos três ajustes da Tabela 5.9.

Considerando todas as funções objetivo simultaneamente, NMH =200 e NIT = 400 e o mesmo conjunto inicial de parâmetros da Tabela 5.10, foram ajustados todos os seis eventos, cujos resultados encontram-se nas Tabelas C.6 a C.8 do Anexo C e Figuras D.11 a D.16 do Anexo D. A tabela 5.11 apresenta os resultados obtidos para os seis eventos com todas as funções.

TABELA 5.10 – Limites de valores iniciais para simulação

Numero de Variáveis	13	
Num Harmon (NMH)	200	
Num Iterações (NIT)	400	
	Linf	Lsup
	26	36
	36	45
	25	47
	62	63
	46	45
	52	60
	60	66
	59	67
	74	74
	68	66
Rugosidade de canal =	0,0010	0,1500
Rugosidade de superf =	0,0010	0,1500
Porcentagem (□)	0,0010	0,3000

TABELA 5.11 – Resultados para os seis eventos com todas as funções

Evento	1	2	3	4	5	6
	33	26	28	33	35	31
	44	42	39	41	42	44
	45	36	26	30	34	33
	62	62	62	62	62	62
CN	45	45	45	45	45	45
	59	55	53	54	59	59
	62	62	65	63	62	61
	65	59	61	62	65	60
	74	74	74	74	74	74
	67	67	67	66	67	66
ncanal	0,015	0,0025	0,0025	0,0070	0,0085	0,0055
nsuperf	0,108	0,1232	0,0040	0,0040	0,0085	0,0621
beta	0,016	0,1476	0,0399	0,1416	0,0399	0,2103

Outra forma de estimar os parâmetros foi estabelecer um intervalo máximo de variação, entre 1 e 99 para os valores de CN, para os valores de rugosidade em superfície e em canais entre 0,001 e 0,5 e para a porcentagem que define a abstração inicial entre 0,001 e 0,99, com NMH = 100 e NIT variando de 100 a 400, fazendo-se a seleção dos 10 melhores resultados e estabelecendo novo intervalo de variação baseado nos valores máximo e mínimo de cada variável, repetindo o processo até a convergência dos valores. Uma dessas tentativas

consta das tabelas E.1 e E.2 do Anexo E para todos os eventos e com todas as funções objetivo, além dos resultados apresentados na Tabela 5.12.

TABELA 5.12 – Resultados da convergência para os seis eventos considerando variação inicial de 1 a 99 para CN, NMH =100, NIT = 100

Variav	Evento 1	Evento 2	Evento 3	Evento 4	Evento 5	Evento 6	Média	Estimados
	15	15	37	45	50	34	33	26
	17	27	28	15	37	34	26	36
	22	30	19	30	8	34	24	25
	16	50	61	56	47	34	44	62
CN	16	31	34	34	33	34	30	46
	25	37	36	17	48	35	33	52
	41	43	43	30	54	35	41	60
	40	49	35	72	35	35	44	59
	36	44	39	48	38	35	40	74
	25	39	43	45	49	35	39	68
n_canal	0,0275	0,0324	0,0217	0,0258	0,0563	0,0304	0,0324	0,0300
n_superf	0,0253	0,0342	0,0389	0,0323	0,0345	0,0304	0,0326	0,0500
Porcentagem	0,0129	0,0910	0,0617	0,1148	0,0775	0,0304	0,0647	0,0100

Nas duas últimas colunas da Tabela 5.12 constam os valores médios dos parâmetros determinados nos seis eventos e os valores estimados de tabela para comparação.

5.5 Fase de verificação dos parâmetros ajustados

Nesta fase utiliza-se o conjunto de parâmetros que foi ajustado para um evento de chuvas e respectivas vazões para efetuar a simulação com as chuvas de outro evento e comparar o hidrograma resultante com o hidrograma observado neste outro evento. Como exemplo, utiliza-se os dados ajustados para o Evento 1 constantes da Tabela 5.11 cujo gráfico da simulação é apresentado na Figura 5.4 e utilizou-se com os eventos 2 e 3 resultando nos gráficos de simulação apresentados às Figuras 5.5 e 5.6**.** As discrepâncias nos volumes mostram que apenas uma redução na porcentagem que define a abstração conduza a melhores resultados.

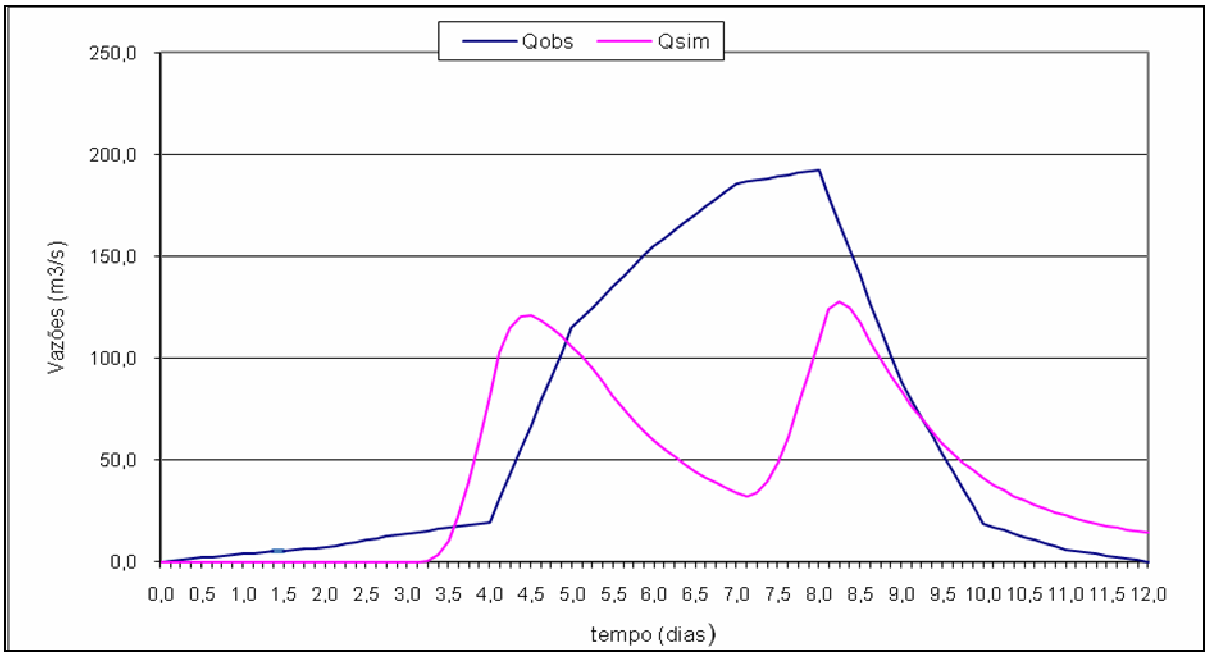


FIGURA 5.4 – Resultado da simulação para o Evento 1 com os dados da Tabela 5.11.

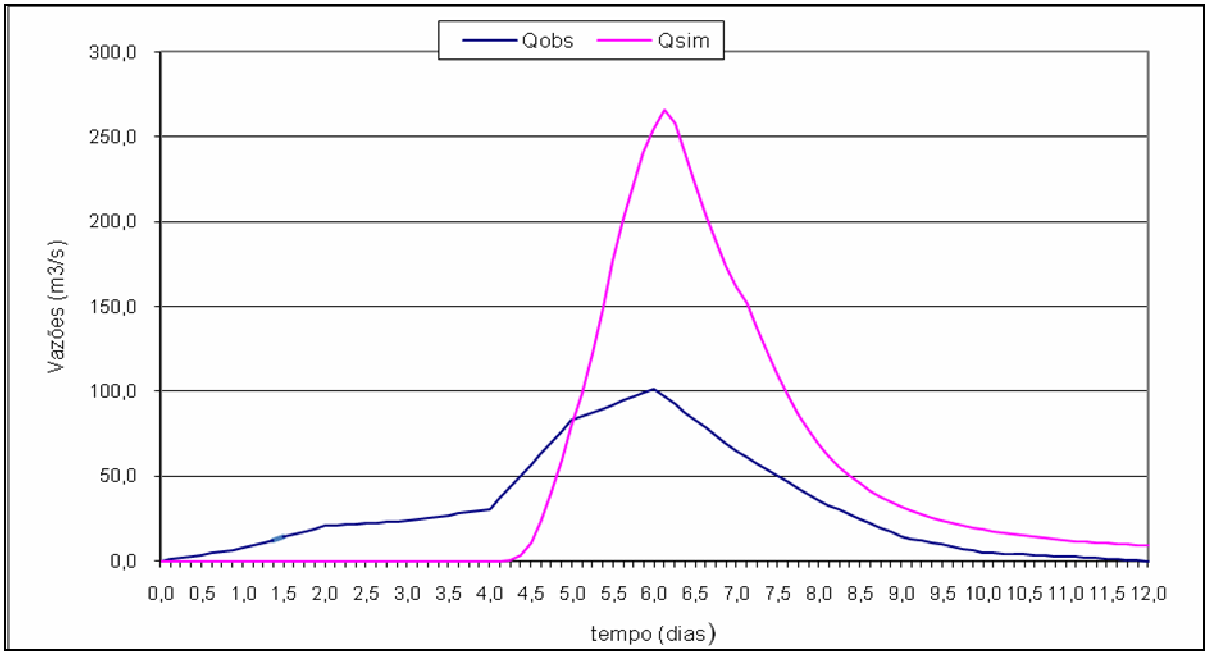


FIGURA 5.5 – Resultado da verificação para o Evento 2 com os dados da Tabela 5.11 para o Evento 1.

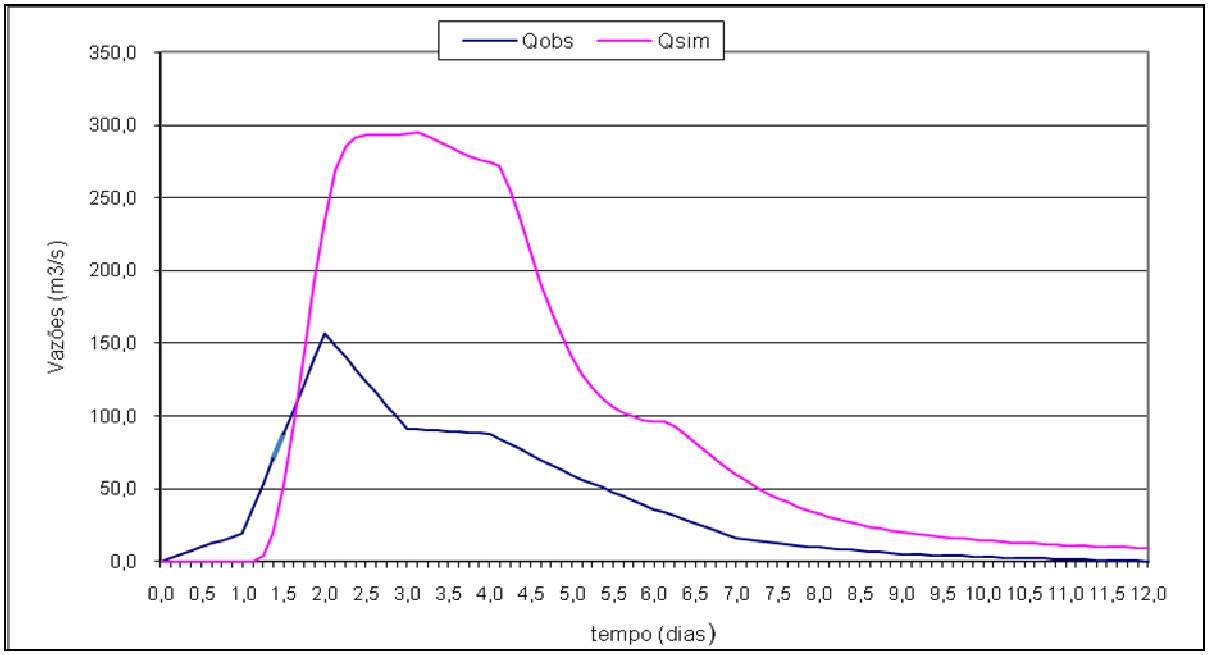


FIGURA 5.6 – Resultado da verificação para o Evento 3 com os dados da Tabela 5.11 para o Evento 1.

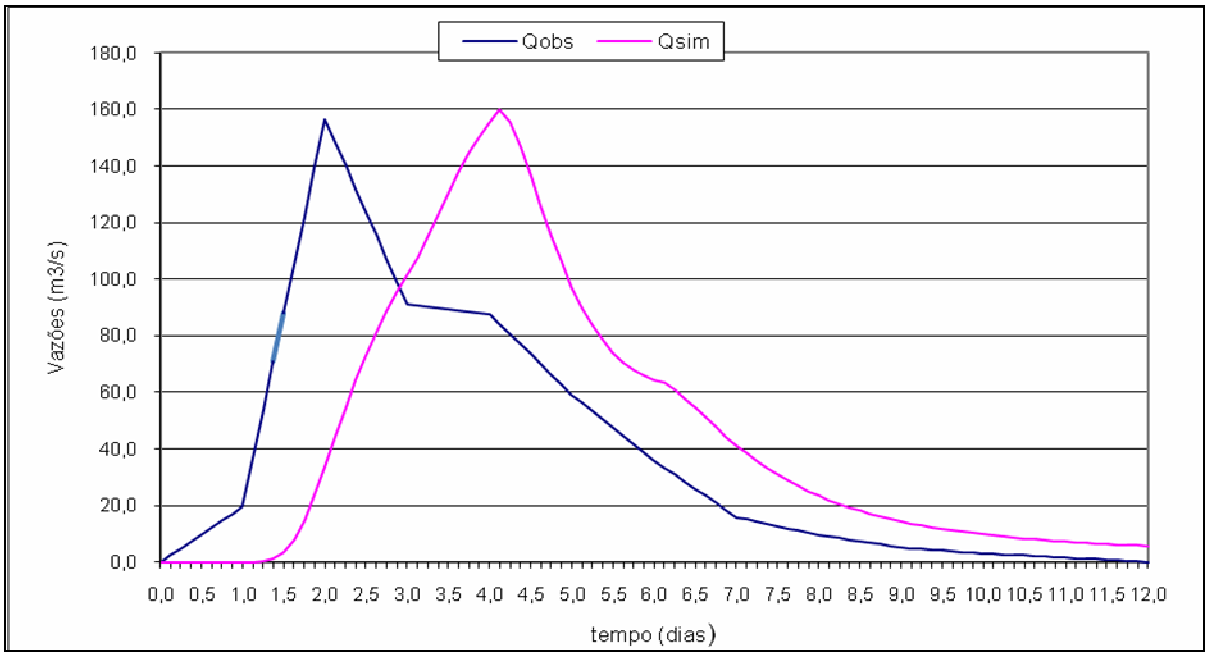


FIGURA 5.7 – Resultado da verificação para o Evento 3 com alteração de beta para 0,085 no Evento 1.

Analisado-se a Figura 5.7, nota-se que apesar da forma e do volume serem bastante aproximados os tempos de pico são bastante defasados. Assim a ponderação das funções

objetivo ou o uso isolado de uma delas pode priorizar um objetivo, tal como manutenção dos volumes, acerto dos tempos ou vazões de pico ou minimização dos erros quadráticos.

5.6 Fase de simulação ou de utilização dos modelos

Uma vez que o modelo tenha provado bom desempenho na fase de verificação, ele pode ser utilizado na fase de simulação, na qual se dispõe apenas dos dados de precipitação, sem, no entanto, conhecer os dados do escoamento. Neste trabalho qualquer dos eventos de chuva pode ser utilizado como entrada, desde que os modelos tivessem sido ajustados de maneira satisfatória.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O método de determinação da chuva efetiva, conhecido como Método da Curva Número ou Método do SCS, embora bastante utilizado em todos os países, foi concebido para utilização dos valores tabelados para uma abstração inicial da chuva de 20% da capacidade máxima de retenção de pequenas bacias.

No caso da presente aplicação, trata-se de uma grande bacia que foi distribuída em muitas sub-bacias com consideráveis extensões para o deslocamento do escoamento. Além disso, as grandes distâncias entre os postos pluviométricos não permite determinar com exatidão a distribuição pluviométrica sobre a bacia, observando-se ausência de precipitação quando há aumento na vazão da exutória, ou no caso de precipitação localizada, sem qualquer influência na alteração do deflúvio. Ressalta-se também que cinco dos sete postos pluviométricos se encontram nas proximidades dos divisores das bacias, cuja precipitação neles registrada tem grande tempo de percurso até chegar à exutória e assim, o cálculo da precipitação média pelo Método de Thiessen, usando apenas a área como ponderador pode não corresponder ao hietograma real de chuva efetiva.

O modelo da onda cinemática representa muito bem a processo de transformação da chuva em vazão. Apenas, deve-se ter cautela na escolha dos intervalos de tempo e espaciais, ao discretizar as equações diferenciais que regem o escoamento, que possam prejudicar a convergência do modelo. Ainda se observa que os valores iniciais das variáveis para o cálculo, podem ter certa sensibilidade no processo de cálculo modificando o resultado do modelo.

Com base nos resultados obtidos e analisados pode-se afirmar que a metodologia de otimização, denominada Pesquisa Harmônica (Harmony Search), empregada na determinação dos parâmetros dos modelos hidrológicos é bastante eficiente e de rápida convergência, justificando sua aplicação. No entanto, o número de conjuntos de variáveis dentro da Memória Harmônica não pode ser muito pequeno, para que haja uma maior possibilidade de combinação entre os valores das variáveis. Se muito extensa a Memória Harmônica, conforme o número de variáveis pode aumentar o tempo de convergência da solução.

Uma vez ajustados os valores de CN para uma única bacia, utilizando o hidrograma observado na exutória da bacia, é possível obter os hidrogramas para todas as sub-bacias em que foi discretizada a área total da bacia, sendo portanto o modelo proposto de grande

utilidade nas regiões desprovidas de postos de observação de níveis ou de medição de vazões, onde se pretende fazer gerenciamento dos recursos hídricos, outorga de vazões ou mesmo obras hidráulicas tais como barragens, pontes, bueiros e outros usos da água.

Sugere-se que outros estudos a respeito das metodologias empregadas sejam feitos no intuito de observar melhor a distribuição espacial da precipitação e considerações a respeito da influência temporal dos registros na precipitação média da bacia. Também é importante analisar a parcela da capacidade de retenção máxima da bacia como abstração inicial da chuva em relação ao volume precipitado.

Torna-se importante, também, avaliar a sensibilidade dos valores iniciais escolhidos para as variáveis no resultado final do método da onda cinemática.

Estudos mais detalhados sobre o estudo multi-objetivo no que se refere à ponderação das funções objetivo que buscam escolher o melhor conjunto de parâmetros no sentido de ajustar picos, vazões de pico, manutenção dos volumes, também deverão ser motivo de análise futura.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ABBOTT, M. B.. *Computational hydraulics - Elements of the theory of free surface flows. Pitman Advanced Publishing Program*, Londres, 326, 1979.

BARROS, M. T. L. et al. **Sistema de suporte de decisões aplicado à gestão e planejamento de recursos hídricos.** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2004.

BARTH, F. T.; POMPEU, C. T.; FILL, H. D.; TUCCI, C. E. M.; KELMAN, J.; BRAGA JR., B. P. F. **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**. São Paulo: Nobel, 1987.

BEVEN, K. J.*A manifesto for the equifinality thesis.* ***Journal of Hydrology*** 320, p.18-36, 2006.

BEVEN, K.; BINLEY, A. ***The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction.*** *Hydrological Processes* 6, p.279–298, 1992.

BOYLE, D. P.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, SOROOSH**.** ***Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strenghts of manual and automatic methods.*** *Water Resources Research* Vol. 36, No. 12, p.3663-3674, 2000.

BRAGA, B; HESPANHOL, L; CONEJO, J. G. L; BARROS, M. T. L; SPENSER, M; PORTO, M; NUCCI, N; JULIANO, N; EIGER, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. São Paulo: Pratice Hall, 2002.

BURNASH, R. J. C. *The NWS river forecast system catchment modelling. In: Singh, V. J. (editor) Computer models of watershed hydrology.* ***Water Resources Publications, Highlands Ranch***. 1130 p, 1995.

CHERY, D. L.; CLYDE, C. G.; SMITH, R. E. *An application runoff model strategy for ungaged watersheds.* ***Water Resources Bulletin***, v.15, n.4, ago.1979.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.G.P. Até que ponto devemos confiar em modelos matemáticos? Uma visão da hidrologia superficial. **Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas (ABAS),** mesa redonda, 23 p, 2006.

COLLISCHONN, W.; TUCCI ,C. E. M.; Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.8, n.3, p. 27-39. 2003.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias.** Porto Alegre, 2001.194p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

COSTA NETO, J. F. **Distribuição Espacial e temporal do Escoamento Superficial em Bacias Hidrográficas**. Campo Grande, 2005. 117p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais). Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

FLETCHER, S.G.; PONNAMBALAM, K. *A constrained state formulation for the stochastic control of multireservoir systems.* ***Water Resources Research*** 34(2), p. 257-270, 1998.

GONÇALVES, L. A. **Métodos de Otimização de Parâmetros de Modelos Pluvio-Fluviométricos.** Campo Grande, 2008. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais). Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

GEEM, Z. W. *Optimal cost design of distribution networks using harmony search.* ***Engineering Optimizattion***, v. 38, n. 3, p. 259 – 280, 2006.

CUNGE, J. A. et al. ***Practical aspects of computational river hydraulics***. *Pitman Advanced Publishing Program*, Boston, 420 p, 1980.

KIM, J. H.; GEEM, Z. W.; KIM, E. S. *Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Model using Harmony Search.* ***Journal of the American Water ResourcesAssociation.*** V. 37, n. 5, p. 1131 – 1138, 2001.

LIGGETT, J. J. *Basic equations of unsteady flow*. In: MAHMOOD, K.; YEVJEVICH, vol. *Unsteady flow in open channels.* ***Water Resources Publications***, Fort Collins, 1975.

MAYS, L.W.; TUNG, Y-K. ***Hydrosystems engineering and management***. McGraw-Hill Inc., New York, 530 p, 1992.

MAYS, L.W. ***Water resources engineering***. John Wiley, New York, 842 p, 2005.

SINGH, V. P. *Hybrid formulation on kinematic wave models of watershed runoff.* ***Journal of Hydrology***, 27, p.33-50, 1975.

STEFFEN, J. L. **Simulação unidimensional do escoamento superficial em bacias hidrográficas descritas por modelo numérico de terreno.** São Carlos, 1997. 185p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

STEPHENSON, D.; MEADOWS M. E**.** ***Kinematic hydrology and modelling***. *(Developments in Water Sciences).* Amsterdan. Elsevier. 1986.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Universidade/UFRGS/ABRH, 1998.

TUCCI, C. E. M., (Org.) **Hidrologia:Ciência e Aplicação.** Porto Alegre: Universidade /UFRGS/ABRH, 1993.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia.** Porto Alegre: Universidade /UFRGS/ABRH, 2001.

TUCCI, C. E. M. ; COLLISCHONN, W. **Revisão sobre modelos hidrológicos.** Porto Alegre. IPH / UFRGS.2001.

VIESSMAN Jr., W.; HARBAUGH, T. E. & KNAPP, J.W. ***Introduction to hydrology.*** *New York, Intext Educational*, 1972.

WAGENER, T.; WHEATER, H.; GUPTA, H. V. ***Rainfall-Runoff modeling in gauged and ungauged catchments.*** *Imperial College Press.*306p, 2004.

WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E. and GOODRICH, D. C. KINEROS, ***A kinematic runoff and erosion model: Documentation and User Manual.*** *U.S. Department of Agriculture. Agricultural Research Service*, ARS-77, 130p., 1990.

ANEXOS

ANEXO A - Características físicas de canal e planos laterais

Tabela A.1 - Características físicas de canal e planos laterais para NSB = 100 sub-bacias.

Num	TSB	LS (m)	SS (m/m)	nS	LE (m)	SE (m/m)	nE	LD (m)	SD (m/m)	nD	b (m)	NCM	BCM	BCM	BCM
1	0	18800	0,0122	0,070	3359	0,0354	0,072	1491	0,0399	0,065	0,5				
2	0	15000	0,0102	0,070	1973	0,0434	0,068	2827	0,0920	0,064	0,5				
3	1	20950	0,0040	0,070	5465	0,0992	0,082	1169	0,0625	0,088	1,0	2	1	2	
4	0	20000	0,0093	0,070	2030	0,0657	0,089	2110	0,1106	0,080	0,5				
5	1	9300	0,0011	0,070	645	0,0823	0,081	1355	0,0514	0,085	3,0	2	3	4	
6	0	15650	0,0104	0,070	1559	0,0807	0,079	792	0,0806	0,079	0,5				
7	0	18900	0,0060	0,070	2540	0,0690	0,082	5090	0,0707	0,072	0,5				
8	1	8500	0,0031	0,070	765	0,0782	0,081	2318	0,0380	0,090	4,0	3	5	6	7
9	0	13230	0,0103	0,070	1255	0,0811	0,078	3432	0,0858	0,078	0,5				
10	1	14850	0,0007	0,070	4013	0,0469	0,076	2236	0,0495	0,070	8,0	2	8	9	
11	0	13350	0,0098	0,070	1880	0,0685	0,086	1049	0,0737	0,086	0,5				
12	0	11350	0,0105	0,070	1991	0,0840	0,090	1313	0,0446	0,081	0,5				
13	1	9950	0,0023	0,070	1487	0,0596	0,077	2472	0,0356	0,075	3,0	2	11	12	
14	1	6350	0,0024	0,070	8630	0,0369	0,074	1323	0,0443	0,070	13,1	2	10	13	
15	0	15750	0,0148	0,070	3232	0,1149	0,062	1352	0,1193	0,065	0,5				
16	0	8850	0,0186	0,070	1729	0,1480	0,070	1989	0,1736	0,069	0,5				
17	0	15100	0,0151	0,070	2728	0,0900	0,069	2020	0,1059	0,067	0,5				
18	1	2300	0,0097	0,070	609	0,0714	0,069	3000	0,1406	0,070	1,8	2	16	17	
19	1	8800	0,0011	0,070	2625	0,1312	0,070	1136	0,1288	0,070	2,0	2	15	18	
20	0	11050	0,0190	0,070	1330	0,0679	0,069	1919	0,0560	0,070	0,5				
21	0	12050	0,0183	0,070	4133	0,0636	0,070	1510	0,0530	0,070	0,5				
22	1	12550	0,0039	0,070	2789	0,1270	0,069	2271	0,1276	0,068	1,8	2	20	21	
23	1	10850	0,0051	0,070	1419	0,1229	0,070	1853	0,0309	0,070	2,3	2	19	22	
24	0	12950	0,0102	0,070	2147	0,1053	0,093	1220	0,1065	0,070	0,5				
25	1	3650	0,0014	0,070	1808	0,0552	0,070	521	0,0368	0,070	2,5	2	23	24	
26	0	12950	0,0155	0,070	1151	0,1587	0,068	2857	0,0746	0,069	0,5				
27	0	10550	0,0156	0,070	1479	0,0844	0,070	1081	0,0807	0,070	0,5				
28	1	21850	0,0053	0,070	1474	0,0542	0,070	847	0,1137	0,070	1,5	2	26	27	
29	1	25300	0,0016	0,070	2498	0,0414	0,073	2055	0,0273	0,075	3,0	2	25	28	
30	1	16300	0,0003	0,070	3184	0,0386	0,072	2086	0,0378	0,076	18,5	2	14	29	
31	0	11450	0,0044	0,070	1799	0,1335	0,069	1345	0,1261	0,063	0,5				
32	0	21200	0,0036	0,070	2302	0,1286	0,062	3198	0,0807	0,073	0,5				
33	1	6000	0,0059	0,070	1433	0,0426	0,070	1100	0,0391	0,070	2,0	2	31	32	
34	1	11000	0,0014	0,070	4309	0,0585	0,071	909	0,0252	0,072	18,5	2	30	33	
35	0	30690	0,0089	0,070	1737	0,1271	0,070	3809	0,0324	0,070	0,5				
36	1	31250	0,0017	0,070	3382	0,0423	0,073	3002	0,0393	0,073	1,8	1	35		
37	0	16400	0,0168	0,070	2646	0,0613	0,069	2530	0,0601	0,070	0,5				
38	0	14650	0,0164	0,070	1747	0,0699	0,070	1509	0,0548	0,070	0,5				
39	0	20150	0,0114	0,070	2184	0,0756	0,070	1191	0,0643	0,070	0,5				

Tabela A.1 - Características físicas de canal e planos laterais para NSB = 100 sub-bacias. (continuação)

Num	TSB	LS (m)	SS (m/m)	nS	LE (m)	SE (m/m)	nE	LD (m)	SD (m/m)	nD	b (m)	NCM	BCM	BCM	BCM
40	1	4400	0,0023	0,070	1523	0,1373	0,070	432	0,0789	0,070	2,5	3	37	38	39
41	0	11450	0,0168	0,070	751	0,0926	0,070	917	0,0792	0,070	0,5				
42	1	12500	0,0018	0,070	2032	0,0680	0,070	2552	0,0674	0,070	2,5	2	40	41	
43	0	17450	0,0078	0,070	1089	0,0817	0,070	2665	0,0752	0,070	0,5				
44	1	10950	0,0026	0,070	3169	0,0350	0,070	995	0,0457	0,070	3,0	2	42	43	
45	0	17550	0,0077	0,070	1658	0,0399	0,070	1652	0,0614	0,070	0,5				
46	1	3850	0,0013	0,070	2623	0,0406	0,075	1714	0,0409	0,070	3,5	2	44	45	
47	0	11500	0,0074	0,070	1157	0,0377	0,070	2061	0,4120	0,070	0,5				
48	1	13100	0,0004	0,070	2031	0,0358	0,087	5130	0,0348	0,082	3,9	2	46	47	
49	1	9550	0,0010	0,070	1592	0,0243	0,075	4000	0,0359	0,076	5,5	2	36	48	
50	0	14850	0,0047	0,070	1811	0,0362	0,075	2330	0,0460	0,069	0,5				
51	1	3100	0,0040	0,070	3935	0,0131	0,070	1484	0,0643	0,073	30,5	3	34	49	50
52	0	14100	0,0076	0,070	2532	0,0559	0,073	1532	0,0643	0,074	0,5				
53	1	10800	0,0009	0,070	1083	0,0532	0,070	1667	0,0465	0,072	30,5	2	51	52	
54	0	12300	0,0103	0,070	1821	0,0434	0,078	2317	0,0303	0,079	0,5				
55	0	35150	0,0040	0,070	2973	0,1016	0,088	2677	0,0883	0,087	0,5				
56	1	10650	0,0009	0,070	2347	0,0400	0,070	2639	0,0370	0,076	30,5	3	53	54	55
57	0	27450	0,0051	0,070	1814	0,0875	0,088	2444	0,0878	0,079	0,5				
58	1	7050	0,0014	0,070	426	0,0833	0,070	1943	0,0540	0,076	30,5	2	56	57	
59	0	14950	0,0143	0,070	2234	0,0541	0,070	1191	0,1007	0,070	0,5				
60	0	21325	0,0135	0,070	1472	0,0718	0,070	2542	0,0831	0,070	0,5				
61	1	30750	0,0014	0,070	4898	0,0711	0,070	1994	0,0686	0,070	2,0	2	59	60	
62	0	13500	0,0173	0,070	585	0,0684	0,070	1711	0,0623	0,070	0,5				
63	0	15000	0,0157	0,070	1520	0,0579	0,070	2193	0,0620	0,073	0,5				
64	0	13000	0,0169	0,070	3146	0,0641	0,071	877	0,1123	0,070	0,5				
65	1	5750	0,0070	0,070	1391	0,0413	0,070	365	0,1295	0,070	2,0	3	62	63	64
66	0	12200	0,0161	0,070	984	0,1368	0,069	1975	0,1037	0,069	0,5				
67	1	8170	0,0042	0,070	1665	0,0547	0,070	2289	0,0752	0,069	3,0	2	65	66	
68	0	26500	0,0099	0,070	1392	0,0943	0,069	2909	0,0901	0,070	0,5				
69	1	19050	0,0021	0,070	1323	0,0660	0,070	1045	0,0523	0,070	4,0	2	67	68	
70	0	10600	0,0100	0,070	1925	0,0609	0,070	2311	0,0794	0,069	0,5				
71	1	19450	0,0014	0,070	1321	0,0532	0,070	3172	0,0382	0,072	4,6	2	69	70	
72	1	15350	0,0016	0,070	3726	0,0588	0,078	1134	0,0255	0,084	5,0	2	61	71	
73	0	17500	0,0064	0,070	1211	0,0459	0,072	2863	0,0483	0,072	0,5				
74	1	21250	0,0014	0,070	1896	0,0356	0,079	3426	0,0379	0,090	6,5	2	72	73	
75	1	9000	0,0033	0,070	2089	0,0338	0,077	5211	0,0246	0,090	43,5	2	58	74	
76	0	27600	0,0059	0,070	1899	0,0887	0,085	1504	0,0958	0,090	0,5				
77	1	8250	0,0006	0,070	3564	0,0418	0,075	2158	0,0483	0,088	43,5	2	75	76	
78	0	28900	0,0099	0,070	1502	0,0806	0,069	1644	0,0913	0,069	0,5				

Tabela A.1 - Características físicas de canal e planos laterais para NSB = 100 sub-bacias. (continuação)

Num	TSB	LS (m)	SS (m/m)	nS	LE (m)	SE (m/m)	nE	LD (m)	SD (m/m)	nD	b (m)	NCM	BCM	BCM	BCM
79	0	26650	0,0086	0,070	1917	0,1005	0,069	2432	0,0882	0,070	0,5				
80	1	14800	0,0026	0,070	2676	0,0630	0,072	1378	0,0230	0,070	3,2	2	78	79	
81	0	24800	0,0097	0,070	1802	0,1323	0,070	2476	0,0507	0,069	0,5				
82	1	8400	0,0012	0,070	1310	0,0699	0,070	619	0,0345	0,070	3,2	2	80	81	
83	0	13400	0,0107	0,070	1955	0,0483	0,070	1463	0,0582	0,070	0,5				
84	0	17200	0,0113	0,070	2849	0,1162	0,069	1762	0,1117	0,070	0,5				
85	0	23090	0,0137	0,070	1312	0,0908	0,070	3330	0,0568	0,070	0,5				
86	1	17200	0,0028	0,070	1541	0,0426	0,070	3110	0,0528	0,070	3,2	2	84	85	
87	1	17000	0,0020	0,070	1429	0,0376	0,070	1441	0,0482	0,070	3,2	2	83	86	
88	0	17350	0,0111	0,070	1533	0,0435	0,070	1216	0,0955	0,070	0,5				
89	0	20000	0,0095	0,070	2255	0,0232	0,070	2785	0,0432	0,070	0,5				
90	0	12220	0,0136	0,070	867	0,0440	0,070	2119	0,0379	0,070	0,5				
91	1	14150	0,0047	0,070	1237	0,1133	0,070	2855	0,0211	0,070	3,2	2	89	90	
92	1	20550	0,0037	0,070	1869	0,0344	0,070	1800	0,0549	0,070	3,2	2	88	91	
93	1	6800	0,0015	0,070	3044	0,0228	0,070	3985	0,0343	0,070	3,2	2	87	92	
94	1	17350	0,0006	0,070	2063	0,0367	0,072	2755	0,0234	0,084	6,4	2	82	93	
95	0	11835	0,0052	0,070	3076	0,0345	0,093	1403	0,0417	0,093	0,5				
96	1	9738	0,0031	0,070	996	0,0358	0,090	1530	0,0292	0,093	43,5	2	94	95	
97	1	7000	0,0014	0,070	686	0,1958	0,090	3714	0,0127	0,093	43,5	2	77	96	
98	0	20900	0,0077	0,070	2081	0,0974	0,085	1689	0,0711	0,081	0,5				
99	0	11000	0,0095	0,070	2536	0,0194	0,090	2282	0,0418	0,088	0,5				
100	1	900	0,0111	0,070	1778	0,1125	0,070	3556	0,0156	0,077	43,5	3	97	98	99

Tabela A.2 - Características físicas de canal e planos laterais para NSB = 11 sub-bacias.

Num	TSB	LS (m)	SS (m/m)	nS	LE (m)	SE (m/m)	nE	LD (m)	SD (m/m)	nD	b (m)	NCM	BCM	BCM	BCM
1	0	78750	0,013	0,070	5122	0,069	0,077	6875	0,066	0,077	2,0				
2	0	66000	0,015	0,070	4539	0,100	0,071	6339	0,079	0,070	2,0				
3	1	27300	0,001	0,070	9784	0,082	0,069	1612	0,035	0,075	7,8	2	1	2	
4	0	70750	0,135	0,070	7517	0,051	0,072	6977	0,057	0,072	4,0				
5	1	31600	0,001	0,070	15386	0,076	0,081	3649	0,041	0,076	21,9	2	3	4	
6	0	102520	0,022	0,070	5137	0,066	0,072	5755	0,065	0,073	4,4				
7	1	17250	0,002	0,070	8238	0,074	0,083	3751	0,031	0,090	39,2	2	5	6	
8	0	49850	0,059	0,070	3864	0,084	0,070	3942	0,078	0,070	1,5				
9	0	64090	0,010	0,070	3540	0,074	0,070	7806	0,047	0,070	2,8				
10	1	27088	0,001	0,070	1680	0,037	0,076	4271	0,030	0,089	4,2	2	8	9	
11	1	7900	0,002	0,070	10785	0,092	0,083	10405	0,024	0,090	39,2	2	7	10	

Tabela A.3 - Características físicas de canal e planos laterais para NSB = 26 sub-bacias.

Num	TSB	LS (m)	SS (m/m)	nS	LE (m)	SE (m/m)	nE	LD (m)	SD (m/m)	nD	b (m)	NCM	BCM	BCM	BCM
1	0	39750	0,008	0,070	4469	0,077	0,078	5216	0,073	0,076	0,6				
2	1	39000	0,002	0,070	5787	0,062	0,077	8567	0,062	0,078	1,5	1	1		
3	0	26200	0,006	0,070	6519	0,120	0,066	1809	0,116	0,068	0,8				
4	0	23600	0,007	0,070	2106	0,110	0,069	4987	0,076	0,069	0,7				
5	1	14500	0,004	0,070	4524	0,105	0,080	10455	0,079	0,069	1,5	2	3	4	
6	1	25300	0,002	0,070	2498	0,041	0,073	2055	0,027	0,075	2,0	1	5		
7	1	27300	0,001	0,070	9784	0,082	0,069	1612	0,035	0,075	7,8	2	2	6	
8	0	30690	0,009	0,070	1737	0,127	0,070	3809	0,032	0,070	0,7				
9	1	31250	0,002	0,070	3382	0,042	0,073	3002	0,039	0,073	1,8	1	8		
10	0	33300	0,005	0,070	2267	0,070	0,069	6309	0,068	0,070	1,1				
11	1	27900	0,001	0,070	2559	0,036	0,077	8792	0,051	0,073	2,9	1	10		
12	1	9550	0,001	0,070	1592	0,024	0,075	4000	0,036	0,076	4,1	2	9	11	
13	1	13900	0,003	0,070	24554	0,075	0,081	5288	0,040	0,077	15,5	2	7	12	
14	1	17700	0,001	0,070	8186	0,079	0,080	2362	0,043	0,076	15,5	1	13		
15	0	52075	0,002	0,070	4478	0,071	0,070	2218	0,075	0,070	1,4				
16	0	27420	0,008	0,070	1076	0,055	0,070	11014	0,083	0,070	1,3				
17	1	38500	0,002	0,070	1322	0,060	0,070	3286	0,052	0,071	0,7	1	16		
18	1	36600	0,002	0,070	2664	0,049	0,078	4413	0,041	0,082	8,8	2	15	17	
19	1	17250	0,002	0,070	8238	0,074	0,083	3751	0,031	0,090	39,2	2	14	18	
20	0	26650	0,009	0,070	5328	0,091	0,069	2432	0,088	0,070	0,8				
21	1	23200	0,001	0,070	2181	0,065	0,072	5677	0,074	0,070	1,5	1	20		
22	0	51400	0,005	0,070	2833	0,070	0,069	4193	0,067	0,070	0,9				
23	0	54700	0,005	0,070	2718	0,051	0,070	3101	0,040	0,070	1,2				
24	1	6800	0,002	0,070	3044	0,023	0,070	3985	0,034	0,070	2,7	2	22	23	
25	1	27088	0,002	0,070	1680	0,037	0,076	4271	0,030	0,089	6,5	2	21	24	
26	1	7900	0,003	0,070	10785	0,092	0,083	10405	0,024	0,090	39,2	2	19	25	

Tabela A.4 - Características físicas de canal e planos laterais para NSB = 4 sub-bacias.

Num	TSB	LS (m)	SS (m/m)	nS	LE (m)	SE (m/m)	nE	LD (m)	SD (m/m)	nD	b (m)	NCM	BCM	BCM	BCM
1	0	78750	0,004	0,070	5122	0,069	0,077	15993	0,079	0,073	6,6				
2	1	27300	0,001	0,070	9784	0,082	0,069	39172	0,053	0,072	18,3	1	1		
3	1	31600	0,001	0,070	15386	0,076	0,081	38984	0,063	0,073	30,3	1	2		
4	1	25150	0,001	0,070	9038	0,081	0,083	56636	0,057	0,074	43,5	1	3		

Tabela A.5 - Características físicas de canal e planos laterais para NSB = 1 sub-bacia.

Num	TSB	LS (m)	SS (m/m)	nS	LE (m)	SE (m/m)	nE	LD (m)	SD (m/m)	nD	b (m)	NCM	BCM	BCM	BCM
1	0	162800	0,005	0,202	8501	0,076	0,0058	30621	0,063	0,0058	25,0				

TABELA A.6 - Enquadramento do tipo, de solo para cálculo do coeficiente de rugosidade de Manning

Tipos de solo	Tipo do enquadramento dos solos	Coeficiente de rugosidade n, calculado
Latossolo roxo–LR Latossolo vermelho escuro-LE Areias quartzosas-AQ	A	0,035
Solos litólicos-R Podzólico vermelho amarelo-PV Latossolo vermelho-amarelo-LV	B	0,030

TABELA A.7 - Enquadramento do tipo de vegetação para cálculo do coeficiente de rugosidade de Manning

Tipos de vegetação	Tipo do enquadramento dos vegetação	Coeficiente de rugosidade n, calculado
Savana arbórea densa-Sd	V1	0,150
Savana arbórea aberta-As	V2	0,120
Cobertura vegetal antrópica-Ap.S e Cobertura vegetal antrópica-Ap.2	V3	0,105
Cobertura vegetal antrópica-Ac.S	V4	0,085
Cobertura vegetal natural-SNc	V5	0,080

TABELA A.8 – Coeficiente de rugosidade de Manning, para canais e rios.

Tipo	Intervalo de n
CANAIS COM REVESTIMENTO	
Pouco lisas	0,017 – 0,019
Alisado	0,010 – 0,013
Paredes rugosas	0,019 – 0,021
Paredes de terra com vegetação	0,028 – 0,032
RIOS	
Limpos e retilíneos	0,025 – 0,033
Limpos e retilíneos com vegetação	0,030 – 0,040
Com meandros, vegetação e pedra	0,033 – 0,060
Com área de inundação vegetação	0,075 – 0,150

Fonte: TUCCI (2001).

ANEXO B – Dados pluviométricos e fluviométricos

TABELA B.1 – Dados de chuva e vazão relativos ao Evento 1.

Data	Jaraguarí	DNOS	Bandeirantes	Rio Negro	Rochedo	S.Gabriel	Cipolândia	PGrego(Q)
24-out-89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	45,30
25-out-89	0,00	0,00	6,40	0,00	0,00	0,00	0,00	49,60
26-out-89	0,00	0,00	1,60	0,00	0,00	2,30	0,00	53,20
27-out-89	0,00	0,00	84,60	0,00	45,00	0,00	18,50	60,50
28-out-89	0,00	0,00	0,00	24,40	0,00	0,00	0,00	66,10
29-out-89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	0,00	162,00
30-out-89	0,00	0,00	4,60	0,00	0,00	0,00	0,00	203,00
31-out-89	0,00	0,00	0,00	63,40	0,00	0,00	0,00	234,00
1-nov-89	0,00	0,00	8,60	0,00	0,00	0,00	6,00	241,00
2-nov-89	34,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	137,00
3-nov-89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	67,80
4-nov-89	0,00	0,00	10,70	26,60	23,40	13,40	7,40	55,70
5-nov-89	0,00	0,00	12,40	0,00	0,00	0,00	0,00	50,10

TABELA B.2 – Dados de chuva e vazão relativos ao Evento 2.

Data	Jaraguarí	DNOS	Bandeirantes	Rio Negro	Rochedo	S.Gabriel	Cipolândia	PGrego(Q)
13-nov-94	25,4	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	0,0	42,50
14-nov-94	0,0	5,6	1,5	4,2	9,3	0,0	0,0	51,10
15-nov-94	0,0	67,8	7,2	0,0	16,8	0,0	0,0	65,50
16-nov-94	0,0	0,1	7,9	0,0	13,8	0,0	0,0	69,50
17-nov-94	22,2	61,2	59,0	0,0	23,4	40,0	0,0	77,80
18-nov-94	24,2	0,4	78,4	0,0	0,0	10,0	15,5	131,00
19-nov-94	0,0	30,0	4,2	14,2	0,0	0,0	33,3	151,00
20-nov-94	0,0	25,5	0,0	22,2	0,0	0,0	0,0	115,00
21-nov-94	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	87,20
22-nov-94	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	90,0	0,0	67,20
23-nov-94	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	58,90
24-nov-94	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	57,80
25-nov-94	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	56,30

TABELA B.3 – Dados de chuva e vazão relativos ao Evento 3.

Data	Jaraguarí	DNOS	Bandeirantes	Rio Negro	Rochedo	S.Gabriel	Cipolândia	PGrego(Q)
17-abr-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	56,80
18-abr-95	0,00	15,20	0,00	0,80	73,00	50,00	0,00	76,60
19-abr-95	0,00	34,60	28,50	39,20	0,00	20,50	97,00	214,00
20-abr-95	0,00	16,00	0,00	4,20	15,60	0,00	4,30	149,00
21-abr-95	0,00	5,60	0,00	7,00	0,00	0,00	0,00	146,00
22-abr-95	0,00	0,00	26,30	0,00	0,00	0,00	0,90	118,00
23-abr-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	95,10
24-abr-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	75,40
25-abr-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	69,50
26-abr-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	65,50
27-abr-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	63,80
28-abr-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	62,70
29-abr-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	61,60

TABELA B.4 – Dados de chuva e vazão relativos ao Evento 4.

Data	Jaraguarí	DNOS	Bandeirantes	Rio Negro	Rochedo	S.Gabriel	Cipolândia	PGrego(Q)
13-out-95	9,40	0,00	0,00	0,00	0,00	5,50	0,00	38,40
14-out-95	8,70	4,80	15,60	12,30	7,20	0,00	17,50	46,20
15-out-95	25,20	8,20	2,30	2,10	8,60	10,70	8,50	60,50
16-out-95	7,40	12,00	2,30	0,00	11,50	0,00	0,00	97,80
17-out-95	9,60	59,80	28,50	4,80	0,00	20,00	27,20	129,00
18-out-95	0,00	15,50	9,10	14,80	27,40	20,00	0,00	125,00
19-out-95	0,00	23,60	16,00	0,00	0,00	0,00	46,50	179,00
20-out-95	0,00	0,00	0,00	6,00	60,50	10,70	14,60	137,00
21-out-95	0,00	32,20	20,00	27,60	0,00	0,00	47,40	227,00
22-out-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	114,00
23-out-95	9,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80,90
24-out-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	56,80
25-out-95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	47,70

TABELA B.5 – Dados de chuva e vazão relativos ao Evento 5.

Data	Jaraguarí	DNOS	Bandeirantes	Rio Negro	Rochedo	S.Gabriel	Cipolândia	PGrego(Q)
11-dez-95	0,0	0,0	3,7	30,0	23,4	0,0	3,0	53,8
12-dez-95	20,2	0,0	11,6	20,0	25,2	0,0	6,5	160,0
13-dez-95	0,0	0,0	16,6	49,1	0,0	0,0	50,0	185,4
14-dez-95	5,0	0,0	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	156,5
15-dez-95	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	76,1
16-dez-95	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	52,2
17-dez-95	0,0	0,0	0,1	0,0	4,0	0,0	0,0	48,3
18-dez-95	0,0	0,0	9,7	0,0	3,2	0,0	2,5	66,7
19-dez-95	15,3	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	57,4
20-dez-95	17,2	0,0	0,0	0,0	15,4	30,0	3,8	52,2
21-dez-95	20,0	0,0	33,1	9,3	0,0	0,0	10,2	60,1
22-dez-95	5,0	0,0	25,4	3,7	0,0	0,0	15,8	88,1
23-dez-95	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	18,0	61,2

TABELA B.6 – Dados de chuva e vazão relativos ao Evento 6.

Data	Jaraguarí	DNOS	Bandeirantes	Rio Negro	Rochedo	S.Gabriel	Cipolândia	PGrego(Q)
16-maio-96	0,0	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	54,8
17-maio-96	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	50,0	0,0	68,4
18-maio-96	0,0	66,6	32,3	33,0	10,4	0,0	45,6	86,2
19-maio-96	0,0	0,2	0,0	0,0	50,1	60,3	0,0	160,8
20-maio-96	0,0	58,8	27,3	19,6	82,3	0,0	48,5	207,7
21-maio-96	0,0	6,7	29,5	2,6	0,0	0,0	0,0	180,7
22-maio-96	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	128,4
23-maio-96	0,0	9,5	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	98,8
24-maio-96	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	76,7
25-maio-96	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	50,3	0,0	71,3
26-maio-96	0,0	0,0	6,1	4,5	0,0	0,0	0,0	70,8
27-maio-96	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	70,8
28-maio-96	0,0	0,0	0,0	0,0	5,3	0,0	0,0	66,7

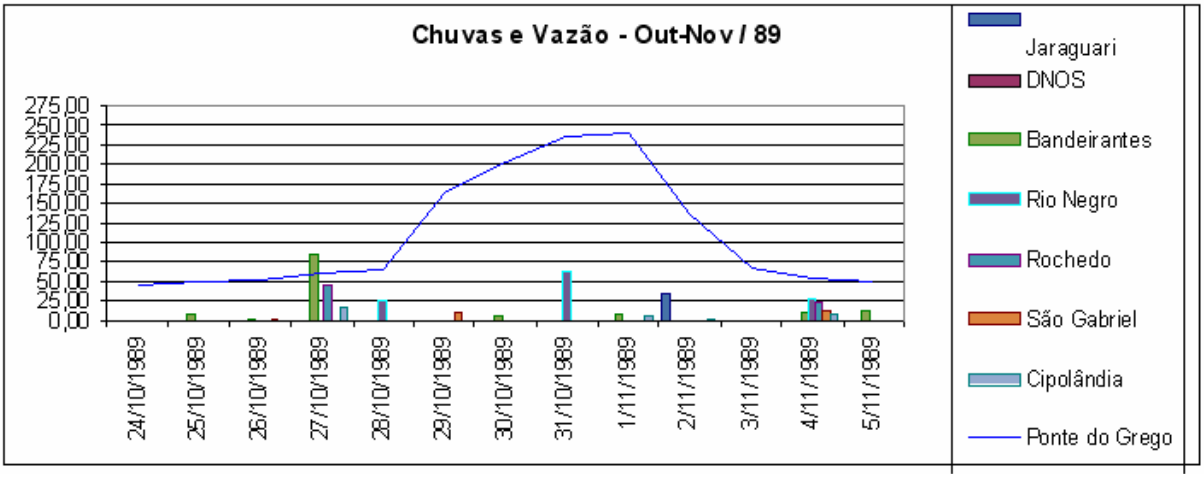


FIGURA B.1 - Dados de chuva e vazão relativos ao Evento 1.

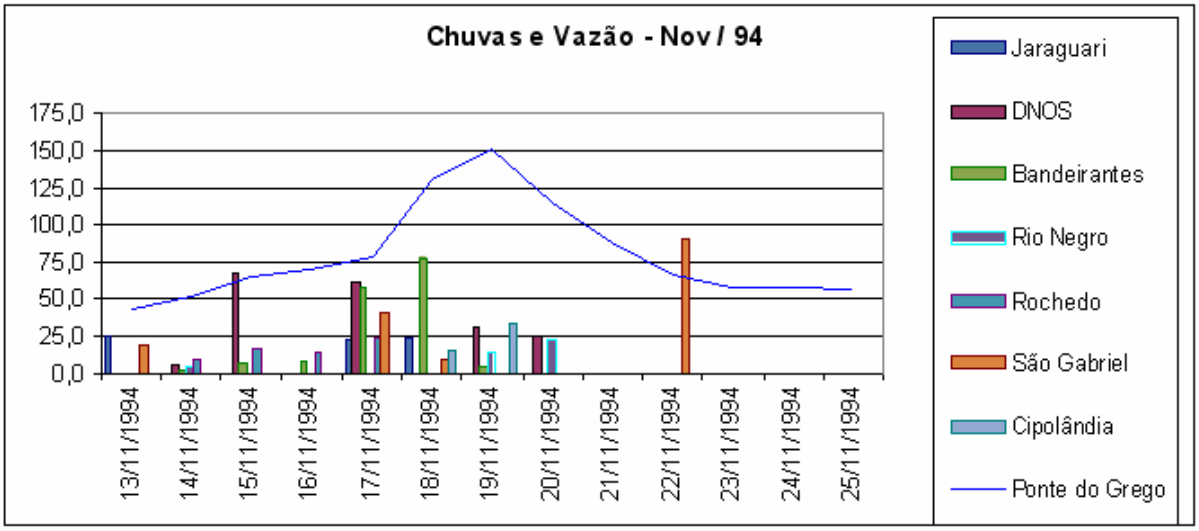


FIGURA B.2 - Dados de chuva e vazão relativos ao Evento 2.

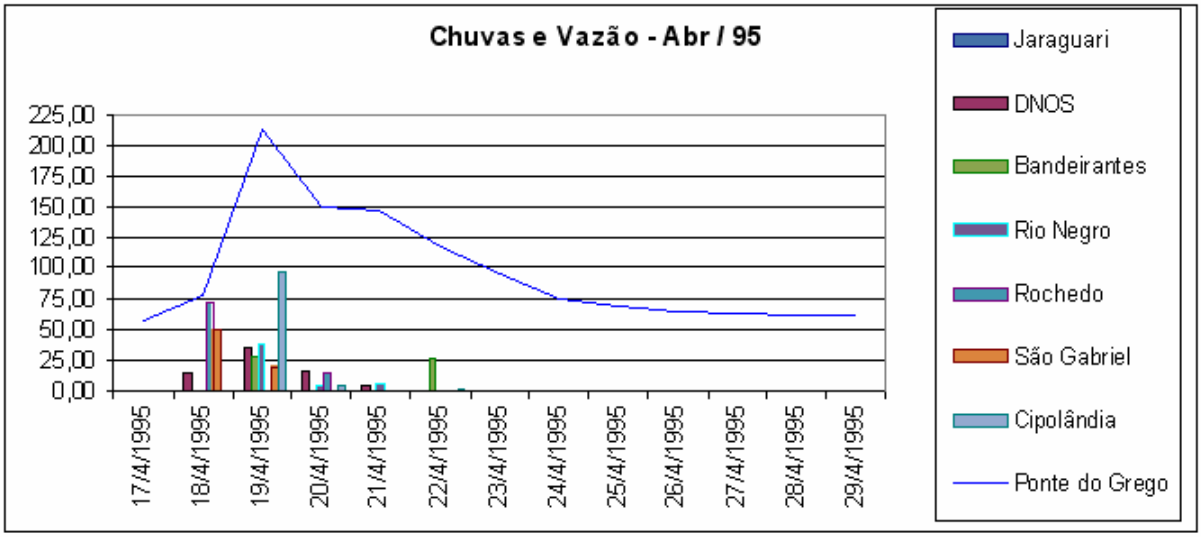


FIGURA B.3 - Dados de chuva e vazão relativos ao Evento 3.

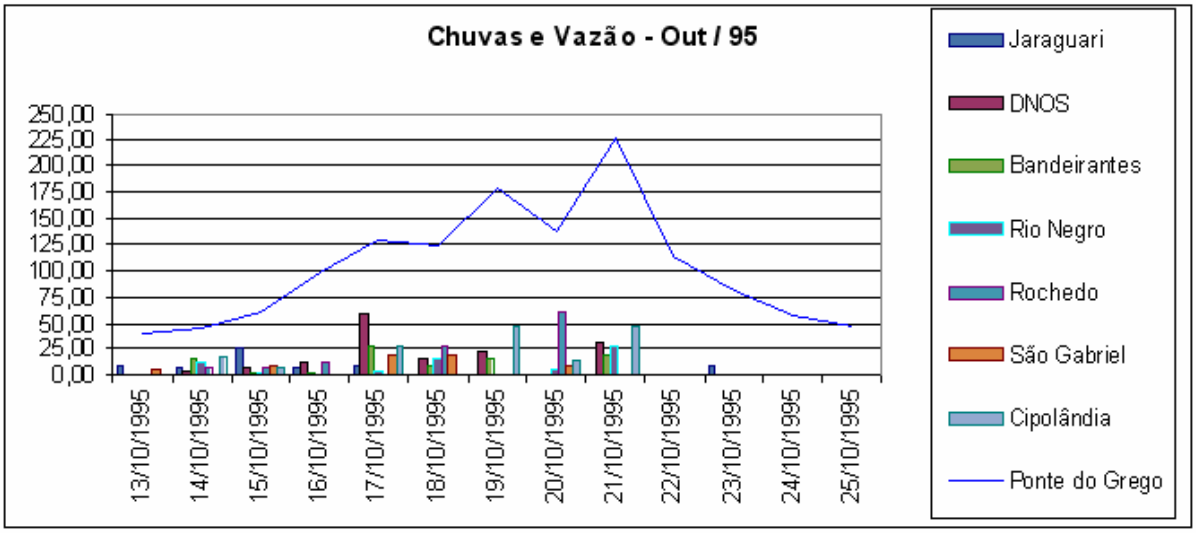


FIGURA B.4 - Dados de chuva e vazão relativos ao Evento 4.

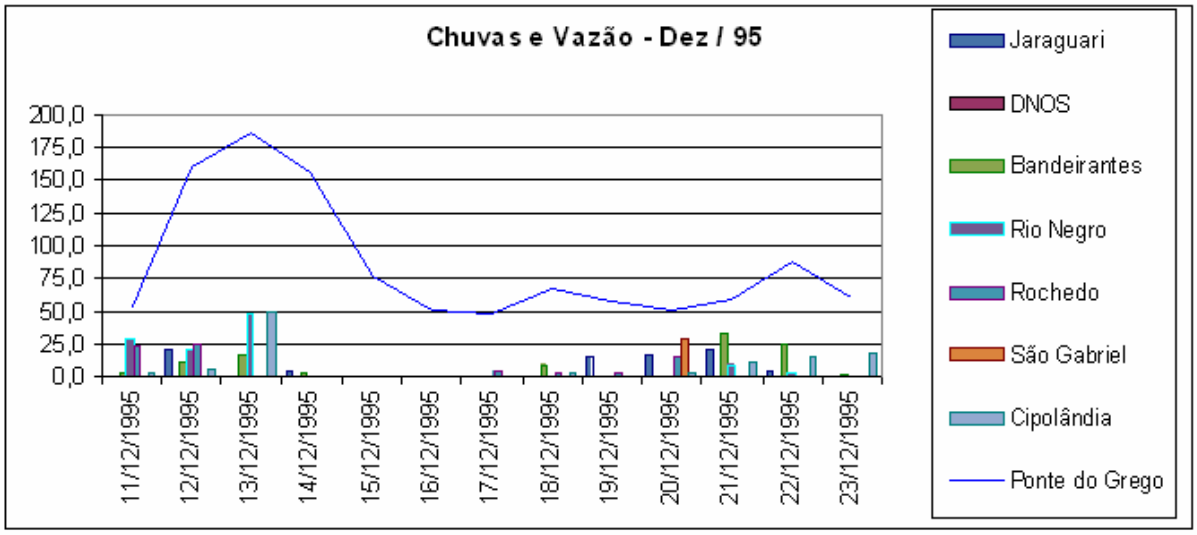


FIGURA B.5 - Dados de chuva e vazão relativos ao Evento 5.

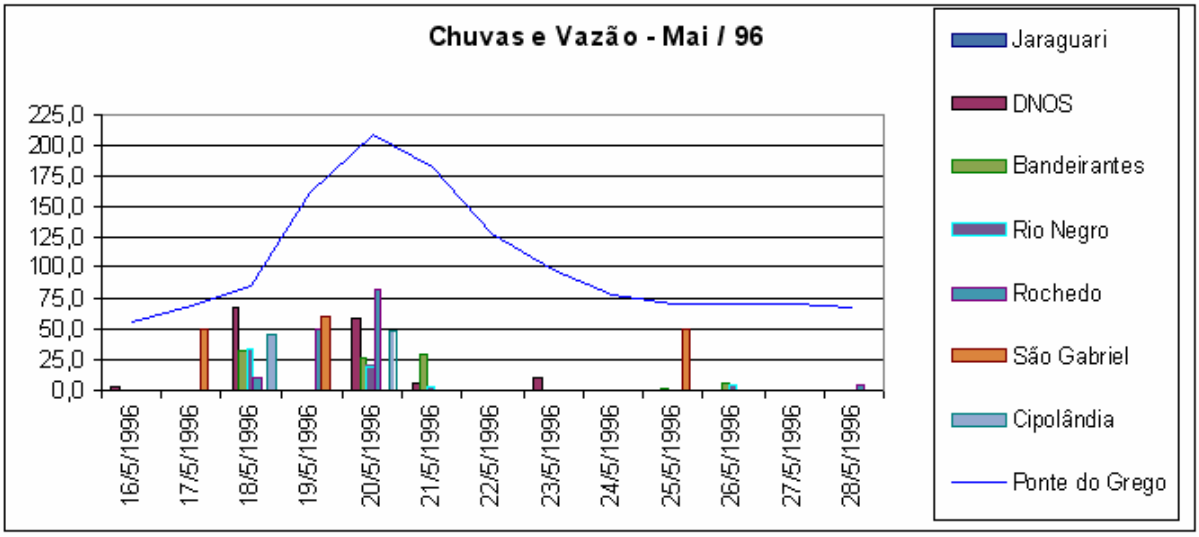


FIGURA B.6 - Dados de chuva e vazão relativos ao Evento 6.

ANEXO C - Resultados de Ajustes dos parâmetros

TABELA C.1 – Os 10 melhores resultados de ajuste para o Evento 1 considerando Fobj1 e Fobj2 isoladamente com NMH =100 e NIT = 400.

Variáveis	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**Fobj1**	**Fobj2**	**Fobj3**	**Fobj4**	**Fobj5**	**Fobj**
1	35	44	46	62	45	59	64	59	74	67	0,1426	0,1471	0,0011	0,79	0,23	0,32	0,36	0,56	0,79
2	35	44	46	62	45	59	64	65	74	66	0,1307	0,1471	0,0011	0,79	0,22	0,31	0,36	0,56	0,79
3	35	41	46	62	45	59	61	66	74	67	0,1426	0,1471	0,0011	0,79	0,24	0,33	0,36	0,56	0,79
4	35	41	46	62	45	59	61	66	74	66	0,1426	0,1471	0,0011	0,79	0,24	0,33	0,36	0,56	0,79
5	31	44	46	62	45	59	65	66	74	67	0,1426	0,1471	0,0011	0,79	0,24	0,33	0,36	0,57	0,79
6	31	44	46	62	45	59	64	66	74	66	0,1426	0,1471	0,0011	0,79	0,25	0,34	0,36	0,57	0,79
7	31	44	46	62	45	59	63	66	74	66	0,1426	0,1471	0,0011	0,79	0,25	0,34	0,36	0,57	0,79
8	31	44	46	62	45	59	63	65	74	66	0,1426	0,1471	0,0011	0,79	0,25	0,34	0,36	0,57	0,79
9	32	44	46	62	45	59	65	66	74	66	0,1307	0,1471	0,0011	0,80	0,24	0,32	0,36	0,57	0,80
10	32	44	46	62	45	59	63	66	74	67	0,1307	0,1471	0,0011	0,80	0,24	0,32	0,36	0,57	0,80
media =	33	43	46	62	45	59	63	65	74	66	0,1390	0,1471	0,0011						
1	35	44	43	62	45	59	60	63	74	67	0,0100	0,0115	0,0130	1,14	0,26	0,17	0,48	1,17	0,26
2	35	43	43	62	45	57	60	63	74	67	0,0100	0,0070	0,0130	1,17	0,27	0,17	0,48	1,22	0,27
3	35	43	43	62	45	59	63	63	74	67	0,0100	0,0130	0,0130	1,13	0,27	0,15	0,48	1,15	0,27
4	35	43	43	62	45	59	60	63	74	67	0,0100	0,0115	0,0130	1,14	0,27	0,16	0,48	1,17	0,27
5	35	43	43	62	45	59	60	63	74	67	0,0100	0,0115	0,0130	1,14	0,27	0,16	0,48	1,17	0,27
6	35	43	43	62	45	59	60	63	74	67	0,0100	0,0115	0,0130	1,14	0,27	0,16	0,48	1,17	0,27
7	35	43	43	62	45	59	63	63	74	67	0,0115	0,0115	0,0130	1,14	0,27	0,16	0,48	1,16	0,27
8	35	43	43	62	45	59	63	63	74	67	0,0115	0,0115	0,0130	1,14	0,27	0,16	0,48	1,16	0,27
9	35	44	43	62	45	55	63	63	74	66	0,0100	0,0115	0,0130	1,14	0,27	0,16	0,48	1,17	0,27
10	35	43	43	62	45	58	60	63	74	67	0,0100	0,0115	0,0130	1,14	0,27	0,15	0,48	1,17	0,27
media =	35	43	43	62	45	58	61	63	74	67	0,0103	0,0112	0,0130						

TABELA C.2 – Os 10 melhores resultados de ajuste para o Evento 1 considerando Fobj3 e Fobj4 isoladamente com NMH =100 e NIT = 400.

Variáveis	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**Fobj1**	**Fobj2**	**Fobj3**	**Fobj4**	**Fobj5**	**Fobj**
1	35	43	45	62	45	58	64	60	74	66	0,0025	0,0204	0,0220	1,06	0,32	0,02	0,48	1,00	0,02
2	35	42	45	62	45	58	64	60	74	66	0,0100	0,0204	0,0220	1,04	0,34	0,05	0,02	0,97	0,05
3	35	44	45	62	45	58	64	59	74	66	0,0234	0,0204	0,0220	1,02	0,34	0,07	0,02	0,94	0,07
4	29	42	45	62	45	58	64	63	74	66	0,0025	0,0204	0,0220	1,05	0,36	0,07	0,02	0,99	0,07
5	35	43	45	62	45	58	64	59	74	67	0,0234	0,0204	0,0220	1,02	0,35	0,08	0,02	0,93	0,08
6	35	43	45	62	45	58	64	59	74	66	0,0234	0,0204	0,0220	1,02	0,35	0,08	0,02	0,93	0,08
7	35	42	45	62	45	58	64	59	74	67	0,0234	0,0204	0,0220	1,02	0,35	0,09	0,02	0,93	0,09
8	35	42	45	62	45	58	64	59	74	67	0,0234	0,0204	0,0220	1,02	0,35	0,09	0,02	0,93	0,09
9	35	42	45	62	45	58	64	60	74	66	0,0234	0,0204	0,0220	1,02	0,35	0,09	0,02	0,93	0,09
10	35	42	45	62	45	58	64	59	74	66	0,0234	0,0204	0,0220	1,02	0,36	0,09	0,02	0,93	0,09
media =	34	43	45	62	45	58	64	60	74	66	0,0179	0,0204	0,0220						
1	33	37	28	62	45	59	60	59	74	67	0,1188	0,0025	0,0130	1,01	0,52	0,41	0,02	0,92	0,02
2	29	42	25	62	45	56	63	64	74	67	0,0130	0,0025	0,0160	1,09	0,56	0,29	0,02	1,07	0,02
3	29	42	38	62	45	54	60	60	74	67	0,0204	0,0517	0,0160	0,97	0,45	0,33	0,02	0,85	0,02
4	29	38	39	62	45	56	60	65	74	67	0,0130	0,0428	0,0160	0,99	0,44	0,28	0,02	0,88	0,02
5	33	38	25	62	45	56	63	66	74	67	0,0130	0,0025	0,0130	1,10	0,53	0,27	0,02	1,08	0,02
6	29	37	25	62	45	57	62	59	74	67	0,0204	0,0025	0,0160	1,09	0,59	0,34	0,02	1,07	0,02
7	29	37	37	62	45	56	60	64	74	67	0,0130	0,0517	0,0160	0,99	0,47	0,35	0,02	0,87	0,02
8	29	42	25	62	45	56	60	59	74	67	0,0130	0,0025	0,0130	1,10	0,54	0,27	0,02	1,08	0,02
9	29	42	25	62	46	56	63	64	74	67	0,0130	0,0517	0,0160	1,03	0,59	0,46	0,02	0,96	0,02
10	33	37	25	62	45	57	60	59	74	67	0,0204	0,0025	0,0130	1,09	0,54	0,29	0,02	1,06	0,02
media =	30	39	29	62	45	56	61	62	74	67	0,0258	0,0213	0,0148						

TABELA C.3 – Os 10 melhores resultados de ajuste para o Evento 1 considerando Fobj5 isoladamente e (Fobj3 + Fobj4) com NMH =100 e NIT = 400.

Variáveis	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**Fobj1**	**Fobj2**	**Fobj3**	**Fobj4**	**Fobj5**	**Fobj**
1	35	44	45	62	45	57	64	59	74	66	0,0815	0,1024	0,0190	0,88	0,38	0,43	0,06	0,69	0,69
2	35	44	45	62	45	57	65	62	74	66	0,0860	0,0085	0,0369	0,97	0,48	0,26	0,02	0,84	0,84
3	35	44	45	62	45	57	64	62	74	66	0,0756	0,0085	0,0369	0,97	0,48	0,24	0,02	0,85	0,85
4	35	44	45	62	45	57	64	59	74	66	0,0756	0,0085	0,0369	0,97	0,48	0,24	0,02	0,85	0,85
5	33	44	45	62	45	57	64	60	74	66	0,0815	0,0085	0,0369	0,97	0,49	0,27	0,02	0,85	0,85
6	33	44	45	62	45	57	64	62	74	66	0,0756	0,0085	0,0369	0,98	0,49	0,26	0,02	0,85	0,85
7	35	44	45	62	45	57	62	65	74	66	0,0756	0,0025	0,0459	0,99	0,54	0,26	0,02	0,88	0,88
8	35	44	45	62	45	57	62	60	74	66	0,0815	0,0025	0,0459	0,99	0,55	0,27	0,02	0,88	0,88
9	35	44	45	62	45	57	62	65	74	66	0,0756	0,0085	0,0459	0,99	0,55	0,31	0,02	0,88	0,88
10	35	44	45	62	45	57	62	65	74	66	0,0756	0,0085	0,0459	0,99	0,55	0,31	0,02	0,88	0,88
media =	35	44	45	62	45	57	63	62	74	66	0,0784	0,0167	0,0387						
1	31	43	44	62	45	59	64	60	74	67	0,0413	0,0070	0,0220	1,04	0,38	0,10	0,02	0,96	0,36
2	30	43	44	62	45	59	64	62	74	67	0,0413	0,0070	0,0220	1,04	0,38	0,10	0,02	0,96	0,36
3	31	43	44	62	45	59	64	60	74	67	0,0100	0,0070	0,0220	1,09	0,36	0,05	0,02	1,06	0,38
4	31	43	44	62	45	59	64	60	74	67	0,0100	0,0070	0,0220	1,09	0,36	0,05	0,02	1,06	0,38
5	30	43	44	62	45	59	64	60	74	67	0,0100	0,0070	0,0220	1,09	0,36	0,06	0,02	1,06	0,38
6	30	43	44	62	45	59	64	62	74	67	0,0100	0,0070	0,0220	1,09	0,36	0,06	0,02	1,06	0,38
7	30	43	44	62	45	59	61	60	74	67	0,0100	0,0070	0,0220	1,09	0,37	0,06	0,02	1,06	0,38
8	31	43	44	62	45	55	64	60	74	67	0,0100	0,0070	0,0220	1,09	0,37	0,06	0,02	1,06	0,38
9	30	43	44	62	45	55	64	60	74	67	0,0100	0,0070	0,0220	1,09	0,37	0,07	0,02	1,06	0,38
10	31	43	44	62	45	53	64	60	74	67	0,0100	0,0070	0,0220	1,09	0,37	0,07	0,02	1,06	0,38
media =	31	43	44	62	45	58	64	60	74	67	0,0163	0,0070	0,0220						

TABELA C.4 – Os 10 melhores resultados de ajuste para o Evento 1 considerando (Fobj2 + Fobj3 + Fobj4) e (Fobj2 + Fobj3 + Fobj4 + Fobj5) com NMH =100 e NIT = 400.

Variáveis	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**Fobj1**	**Fobj2**	**Fobj3**	**Fobj4**	**Fobj5**	**Fobj**
1	31	43	41	62	45	53	60	63	74	66	0,0562	0,0040	0,0220	1,02	0,43	0,18	0,02	0,93	0,21
2	32	39	43	62	45	57	65	63	74	67	0,0145	0,0919	0,0130	0,91	0,35	0,33	0,03	0,74	0,24
3	29	40	43	62	45	56	63	59	74	66	0,1068	0,0100	0,0040	1,03	0,26	0,02	0,47	0,96	0,25
4	33	40	46	62	45	58	62	62	74	66	0,0592	0,0294	0,0070	1,04	0,23	0,07	0,47	0,97	0,26
5	28	39	43	62	45	55	64	64	74	66	0,0115	0,0279	0,0339	1,01	0,54	0,29	0,02	0,92	0,28
6	26	43	39	62	45	58	64	63	74	67	0,0383	0,0756	0,0130	0,93	0,42	0,40	0,03	0,78	0,29
7	34	38	43	62	45	58	62	63	74	67	0,0770	0,0070	0,0040	1,10	0,23	0,19	0,48	1,09	0,30
8	28	38	42	62	45	52	62	64	74	67	0,0621	0,0309	0,0070	1,00	0,34	0,13	0,47	0,90	0,31
9	31	36	43	62	45	55	64	59	74	67	0,0592	0,1262	0,0130	0,90	0,42	0,50	0,06	0,72	0,33
10	27	36	29	62	45	59	62	64	74	67	0,0160	0,0249	0,0011	1,07	0,41	0,10	0,48	1,03	0,33
media =	30	39	41	62	45	56	63	62	74	67	0,0501	0,0428	0,0118						
1	32	40	46	62	45	58	62	63	74	67	0,0815	0,1203	0,0011	0,85	0,23	0,24	0,41	0,64	0,38
2	30	42	37	62	45	58	61	63	74	67	0,1292	0,0070	0,0160	0,97	0,44	0,36	0,03	0,84	0,42
3	32	43	39	62	45	53	60	61	74	67	0,0353	0,0815	0,0190	0,94	0,47	0,43	0,05	0,79	0,43
4	29	41	45	62	45	59	60	59	74	67	0,0636	0,0428	0,0310	0,96	0,50	0,39	0,03	0,83	0,44
5	35	38	32	62	45	59	62	59	74	66	0,0800	0,0979	0,0070	0,93	0,46	0,52	0,06	0,77	0,45
6	35	43	37	62	45	57	62	59	74	66	0,0577	0,1158	0,0190	0,95	0,50	0,52	0,06	0,80	0,47
7	26	42	45	62	45	54	60	64	74	67	0,0636	0,0085	0,0160	1,03	0,35	0,09	0,48	0,95	0,47
8	29	44	37	62	45	53	60	65	74	67	0,1158	0,1351	0,0100	0,92	0,46	0,57	0,09	0,76	0,47
9	33	42	34	62	45	57	62	63	74	67	0,1411	0,0458	0,0160	0,96	0,50	0,52	0,06	0,83	0,48
10	33	41	29	62	45	54	62	63	74	66	0,0145	0,0160	0,0220	1,05	0,58	0,32	0,02	0,99	0,48
media =	31	42	38	62	45	56	61	62	74	67	0,0782	0,0671	0,0157						

TABELA C.5 – Os 10 melhores resultados de ajuste para o Evento 1 considerando (Fobj1 + Fobj5) e (Fobj1 + Fobj2 + Fobj3 + Fobj4 + Fobj5) com NMH =100 e NIT = 400.

Variáveis	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**Fobj1**	**Fobj2**	**Fobj3**	**Fobj4**	**Fobj5**	**Fobj**
1	33	39	44	62	45	59	64	59	74	66	0,1188	0,1232	0,0011	0,83	0,28	0,33	0,38	0,62	0,72
2	32	37	44	62	45	56	62	59	74	66	0,0919	0,1486	0,0070	0,85	0,36	0,46	0,36	0,65	0,75
3	29	38	43	62	45	55	65	64	74	66	0,1188	0,0845	0,0040	0,88	0,32	0,34	0,41	0,69	0,78
4	30	37	45	62	45	54	61	63	74	66	0,0472	0,1143	0,0011	0,88	0,27	0,24	0,42	0,70	0,79
5	34	37	39	62	45	59	63	60	74	67	0,0234	0,1277	0,0070	0,89	0,37	0,43	0,42	0,70	0,79
6	32	43	38	62	45	53	60	60	74	66	0,1381	0,0756	0,0070	0,89	0,39	0,44	0,39	0,71	0,80
7	32	42	34	62	45	52	61	61	74	66	0,1039	0,0800	0,0040	0,91	0,41	0,44	0,39	0,74	0,83
8	33	38	37	62	45	55	65	60	74	66	0,0368	0,1426	0,0100	0,91	0,45	0,52	0,05	0,75	0,83
9	35	42	40	62	45	55	65	62	74	67	0,0592	0,0681	0,0070	0,92	0,32	0,25	0,44	0,76	0,84
10	28	40	43	62	45	54	65	59	74	66	0,0353	0,0845	0,0160	0,92	0,42	0,41	0,05	0,76	0,84
media =	32	39	41	62	45	55	63	61	74	66	0,0773	0,1049	0,0064						
1	34	42	34	62	45	56	60	60	74	66	0,0055	0,0443	0,0160	0,99	0,45	0,26	0,02	0,87	0,52
2	26	44	41	62	45	58	64	66	74	67	0,0443	0,0368	0,0220	0,97	0,46	0,32	0,03	0,84	0,52
3	31	43	44	62	45	54	64	62	74	67	0,1232	0,0323	0,0100	0,93	0,31	0,22	0,44	0,78	0,54
4	30	42	43	62	45	59	62	62	74	66	0,1113	0,0741	0,0220	0,93	0,46	0,49	0,06	0,77	0,54
5	26	44	46	62	45	52	62	59	74	66	0,0040	0,0368	0,0429	1,00	0,56	0,31	0,02	0,90	0,56
6	26	40	42	62	45	56	63	66	74	67	0,0532	0,0785	0,0100	0,92	0,38	0,36	0,42	0,76	0,57
7	30	37	42	62	45	54	61	66	74	66	0,0040	0,0353	0,0369	1,02	0,57	0,34	0,02	0,93	0,58
8	34	44	41	62	45	55	60	64	74	67	0,1083	0,1217	0,0250	0,97	0,51	0,56	0,08	0,84	0,59
9	34	40	38	62	45	59	63	62	74	67	0,0785	0,0353	0,0310	1,00	0,57	0,46	0,05	0,90	0,60
10	33	38	41	62	45	59	61	66	74	66	0,0070	0,0398	0,0429	1,03	0,61	0,38	0,02	0,96	0,60
media =	30	41	41	62	45	56	62	63	74	67	0,0539	0,0535	0,0259						

TABELA C.6 – Melhores ajustea para o Evento 01 e o Evento 02 considerando NMH=200 e NIT=400 para o mesmo conjunto inicial de parâmetros.

Eve 01	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**Fobj1**	**Fobj2**	**Fobj3**	**Fobj4**	**Fobj5**	**Fobj**
1	31	44	46	62	45	55	61	63	74	66	0,116	0,099	0,004	0,89	0,18	0,27	0,39	0,71	0,49
2	35	44	41	62	45	54	60	59	74	67	0,067	0,038	0,019	0,96	0,33	0,31	0,03	0,83	0,49
3	35	36	46	62	45	59	64	60	74	66	0,020	0,004	0,028	1,06	0,31	0,10	0,02	1,00	0,50
4	35	39	46	62	45	59	60	60	74	66	0,129	0,015	0,028	0,96	0,35	0,34	0,03	0,82	0,50
5	33	42	45	62	45	58	61	60	74	66	0,001	0,046	0,040	0,97	0,43	0,25	0,02	0,84	0,50
6	26	39	46	62	45	52	62	64	74	67	0,076	0,113	0,001	0,90	0,20	0,27	0,41	0,73	0,50
7	34	39	45	62	45	58	62	61	74	66	0,001	0,004	0,025	1,11	0,26	0,03	0,02	1,11	0,51
8	27	41	46	62	45	59	64	65	74	66	0,001	0,137	0,028	0,93	0,38	0,44	0,02	0,77	0,51
9	33	36	43	62	45	56	60	65	74	66	0,107	0,068	0,001	0,94	0,19	0,20	0,42	0,79	0,51
10	30	44	45	62	45	58	64	63	74	67	0,141	0,076	0,019	0,92	0,34	0,46	0,08	0,76	0,51
media	32	40	45	62	45	57	62	62	74	66	0,066	0,060	0,019						
Eve 02	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**Fobj1**	**Fobj2**	**Fobj3**	**Fobj4**	**Fobj5**	**Fobj**
1	26	42	36	62	45	55	62	59	74	67	0,0025	0,1232	0,1476	1,35	0,02	0,03	0,69	1,99	0,82
2	35	37	31	62	45	57	61	64	74	66	0,0025	0,0607	0,1416	1,29	0,11	0,16	0,69	1,83	0,82
3	29	38	31	62	45	54	65	62	74	67	0,0368	0,0115	0,1416	1,29	0,22	0,14	0,69	1,82	0,83
4	35	43	29	62	45	54	62	63	74	66	0,0130	0,0160	0,1535	1,29	0,37	0,05	0,69	1,84	0,85
5	32	40	31	62	45	55	64	66	74	66	0,0279	0,0145	0,1506	1,30	0,23	0,16	0,69	1,86	0,85
6	31	41	27	62	45	57	60	59	74	66	0,0502	0,0681	0,1117	1,33	0,15	0,10	0,73	1,95	0,85
7	26	40	37	62	45	54	62	59	74	67	0,0130	0,1292	0,1416	1,40	0,07	0,05	0,71	2,14	0,87
8	35	40	31	62	45	55	63	66	74	67	0,1307	0,0249	0,1416	1,37	0,15	0,09	0,73	2,05	0,88
9	31	40	35	62	45	54	62	63	74	67	0,0532	0,0994	0,1416	1,42	0,01	0,01	0,73	2,22	0,88
10	26	38	39	62	45	53	65	59	74	67	0,0279	0,1024	0,1685	1,40	0,13	0,04	0,71	2,15	0,88
media	31	40	33	62	45	55	63	62	74	67	0,036	0,065	0,144						

TABELA C.7 – Melhores ajustea para o Evento 03 e o Evento 04 considerando NMH=200 e NIT=400 para o mesmo conjunto inicial de parâmetros.

Eve 03	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**Fobj1**	**Fobj2**	**Fobj3**	**Fobj4**	**Fobj5**	**Fobj**
1	28	39	26	62	45	53	65	61	74	67	0,0025	0,0040	0,0399	0,56	0,13	0,01	1,06	0,27	0,41
2	34	38	37	62	45	57	63	63	74	67	0,0115	0,0011	0,0758	0,63	0,00	0,01	1,06	0,34	0,41
3	27	43	28	62	45	56	61	66	74	67	0,0025	0,0189	0,0459	0,58	0,12	0,00	1,06	0,29	0,41
4	31	40	40	62	45	58	62	59	74	67	0,0130	0,0011	0,0818	0,66	0,00	0,01	1,06	0,37	0,42
5	34	36	34	62	45	55	62	60	74	67	0,0011	0,0011	0,0638	0,62	0,05	0,03	1,06	0,34	0,42
6	27	41	26	62	45	55	65	66	74	67	0,0115	0,0249	0,0399	0,59	0,11	0,04	1,06	0,30	0,42
7	35	39	26	62	45	55	64	60	74	66	0,0368	0,0160	0,0489	0,63	0,02	0,10	1,06	0,34	0,43
8	34	42	34	62	45	52	64	65	74	67	0,0204	0,0085	0,0638	0,65	0,08	0,00	1,06	0,37	0,43
9	26	37	28	62	45	58	63	61	74	66	0,0502	0,0040	0,0250	0,86	0,43	0,17	0,06	0,64	0,43
10	35	40	37	62	45	55	63	64	74	66	0,0025	0,0011	0,0878	0,65	0,14	0,07	1,06	0,36	0,46
media	31	40	32	62	45	55	63	63	74	67	0,015	0,008	0,057						
Eve 04	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**Fobj1**	**Fobj2**	**Fobj3**	**Fobj4**	**Fobj5**	**Fobj**
1	33	41	30	62	45	54	63	62	74	66	0,0070	0,0040	0,1416	0,94	0,53	0,08	0,02	1,50	0,61
2	26	40	41	62	45	57	60	65	74	67	0,0040	0,0368	0,1715	1,01	0,48	0,01	0,02	1,72	0,65
3	29	40	37	62	45	56	61	63	74	66	0,0368	0,0055	0,1565	0,98	0,48	0,12	0,02	1,64	0,65
4	33	38	32	62	45	58	65	65	74	66	0,0025	0,0428	0,1416	1,00	0,48	0,07	0,02	1,69	0,65
5	28	43	44	62	45	53	65	60	74	67	0,0249	0,0055	0,1984	0,98	0,55	0,12	0,02	1,62	0,66
6	26	40	30	62	45	58	64	62	74	67	0,0204	0,0338	0,1266	1,01	0,51	0,05	0,02	1,73	0,66
7	34	37	30	62	45	59	63	64	74	66	0,0160	0,0338	0,1326	1,01	0,49	0,11	0,02	1,73	0,67
8	31	38	35	62	45	53	63	65	74	67	0,0085	0,0264	0,1565	0,99	0,57	0,13	0,02	1,66	0,67
9	31	42	25	62	45	55	64	61	74	66	0,0085	0,0383	0,1266	0,99	0,60	0,15	0,02	1,64	0,68
10	33	39	31	62	45	54	60	60	74	66	0,0279	0,0249	0,1416	1,01	0,57	0,10	0,03	1,71	0,68
media	30	40	34	62	45	56	63	63	74	66	0,016	0,025	0,149						

TABELA C.8 – Melhores ajustes para o Evento 05 e o Evento 06 considerando NMH=200 e NIT=400 para o mesmo conjunto inicial de parâmetros.

Eve 05	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**Fobj1**	**Fobj2**	**Fobj3**	**Fobj4**	**Fobj5**	**Fobj**
1	35	42	34	62	45	59	62	65	74	67	0,0085	0,0085	0,0399	0,79	0,06	0,23	0,01	0,30	0,28
2	27	40	30	62	45	55	65	66	74	66	0,0845	0,0011	0,0250	0,86	0,05	0,18	0,03	0,37	0,30
3	32	39	34	62	45	56	60	65	74	67	0,0770	0,0011	0,0369	0,90	0,11	0,12	0,04	0,40	0,32
4	27	36	38	62	45	57	63	65	74	67	0,0160	0,0011	0,0519	0,80	0,29	0,04	0,13	0,32	0,32
5	35	38	26	62	45	52	65	59	74	66	0,0204	0,0323	0,0280	0,93	0,21	0,02	0,06	0,43	0,33
6	32	41	28	62	45	59	61	64	74	67	0,1158	0,0011	0,0220	0,94	0,01	0,23	0,04	0,43	0,33
7	35	41	41	62	45	55	65	59	74	67	0,0085	0,0234	0,0459	0,94	0,03	0,24	0,03	0,43	0,33
8	32	40	40	62	45	52	65	65	74	67	0,0100	0,0234	0,0489	0,93	0,16	0,07	0,13	0,42	0,34
9	31	40	43	62	45	52	64	60	74	66	0,0189	0,0085	0,0609	0,91	0,26	0,00	0,13	0,41	0,34
10	26	39	39	62	45	52	62	62	74	66	0,0919	0,0011	0,0310	0,96	0,03	0,28	0,03	0,46	0,35
media	31	40	35	62	45	55	63	63	74	67	0,045	0,010	0,039						
Eve 06	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**Fobj1**	**Fobj2**	**Fobj3**	**Fobj4**	**Fobj5**	**Fobj**
1	31	44	33	62	45	59	61	60	74	66	0,0055	0,0621	0,2103	1,15	0,48	0,07	0,28	1,21	0,64
2	27	39	29	62	45	55	60	59	74	67	0,0219	0,0487	0,1745	1,17	0,52	0,04	0,28	1,25	0,65
3	29	39	32	62	45	52	62	64	74	67	0,1426	0,0055	0,1745	1,20	0,31	0,13	0,31	1,32	0,65
4	27	44	37	62	45	54	63	61	74	66	0,0219	0,0890	0,2014	1,21	0,32	0,08	0,31	1,35	0,66
5	34	41	28	62	45	58	63	60	74	68	0,0443	0,0487	0,1864	1,18	0,49	0,04	0,31	1,28	0,66
6	32	37	26	62	45	57	64	63	74	66	0,0398	0,0830	0,1595	1,20	0,42	0,03	0,31	1,33	0,66
7	31	41	28	62	45	52	63	62	74	66	0,0204	0,0443	0,1745	1,17	0,45	0,15	0,28	1,25	0,66
8	32	40	28	62	46	57	65	65	74	67	0,0532	0,0502	0,1775	1,19	0,45	0,04	0,31	1,31	0,66
9	34	41	45	62	45	58	65	63	74	66	0,0219	0,0934	0,2492	1,26	0,23	0,06	0,31	1,46	0,66
10	32	37	26	62	45	53	65	64	74	66	0,0353	0,1113	0,1535	1,22	0,39	0,01	0,34	1,36	0,67
media	31	40	31	62	45	56	63	62	74	67	0,041	0,064	0,186						

ANEXO D – Gráficos dos ajustes

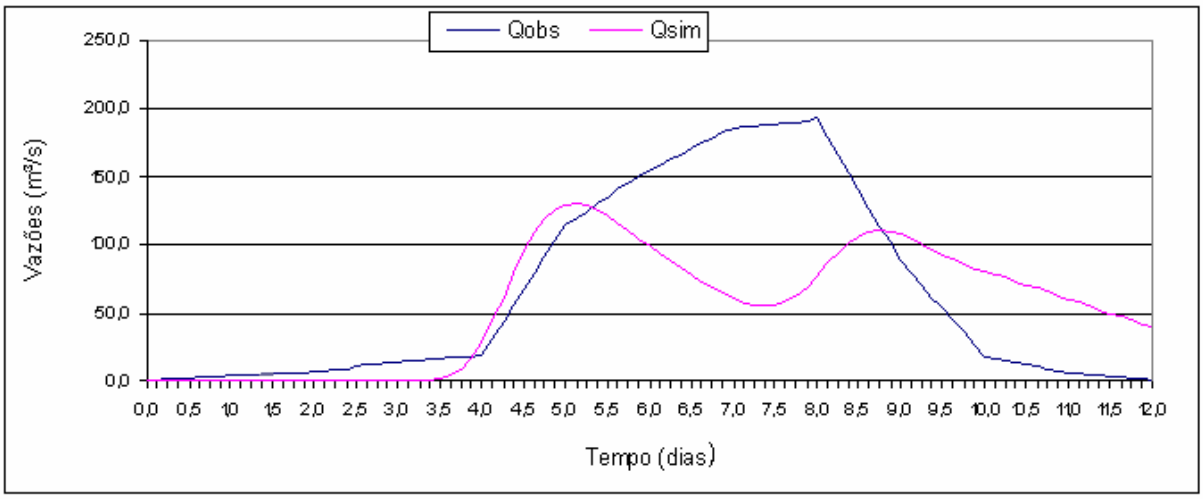


FIGURA D.1 – Simulação para o Evento 1 com uso de Fobj1.

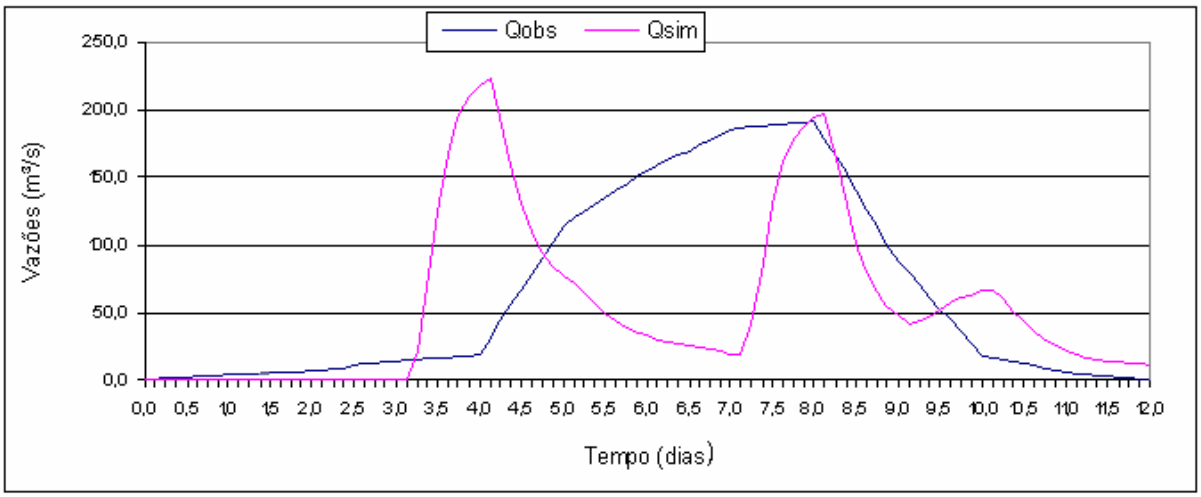


FIGURA D.2 – Simulação para o Evento 1 com uso de Fobj2.

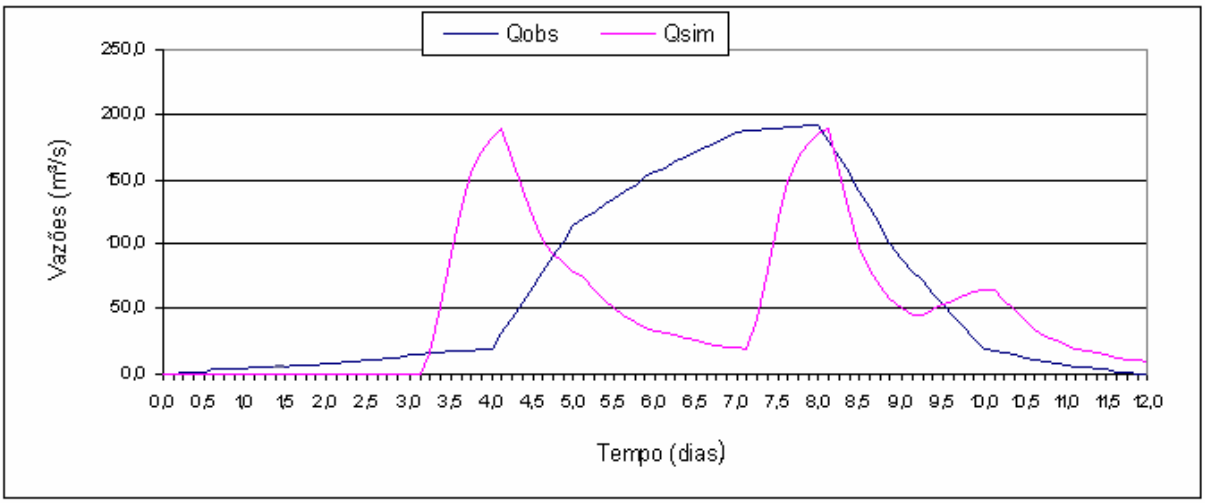


FIGURA D.3 – Simulação para o Evento 1 com uso de Fobj3.

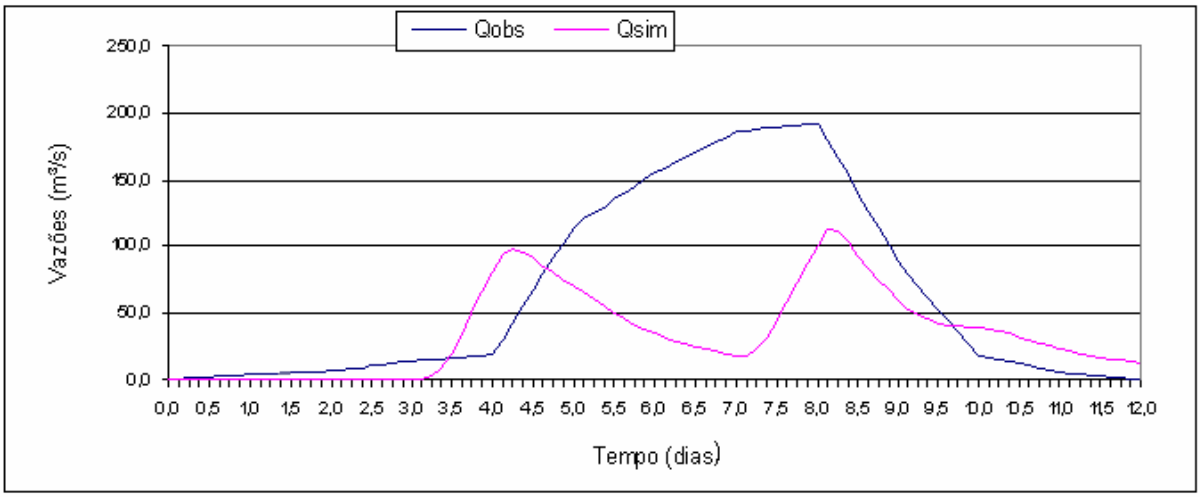


FIGURA D.4 – Simulação para o Evento 1 com uso de Fobj4.

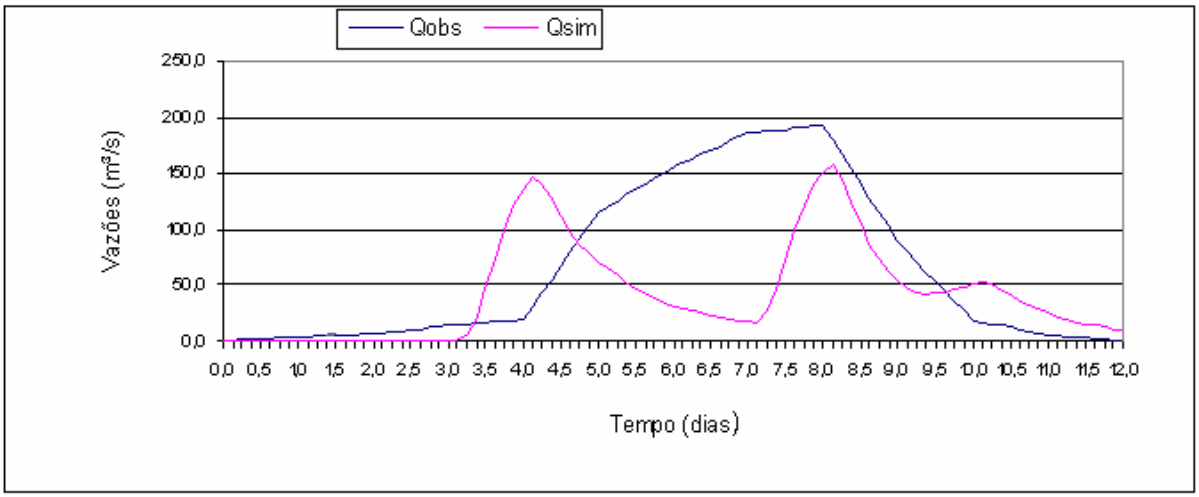


FIGURA D.5 – Simulação para o Evento 1 com uso de Fobj5.

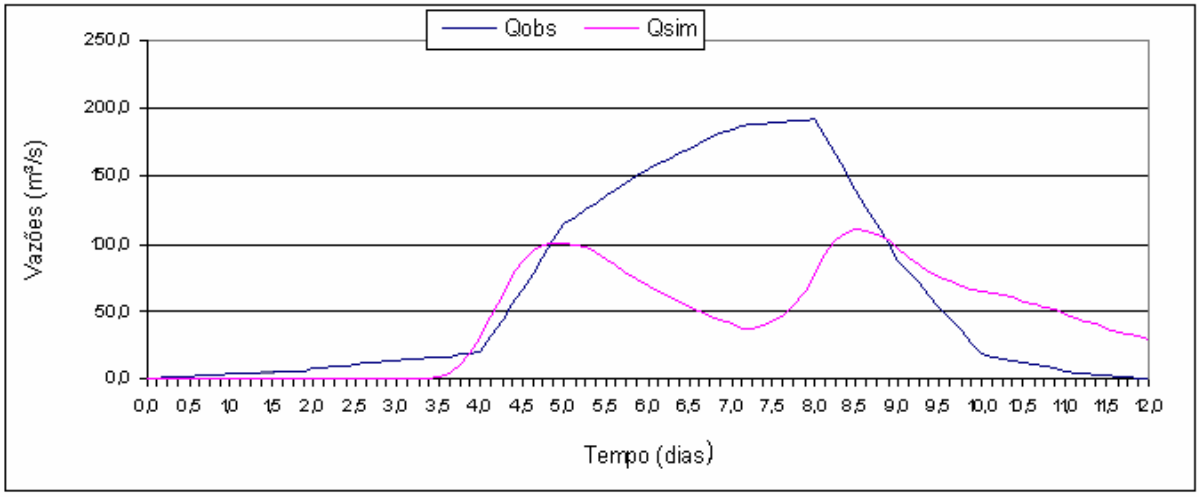


FIGURA D.6 – Simulação para o Evento 1 com uso de Fobj3 + Fobj4.

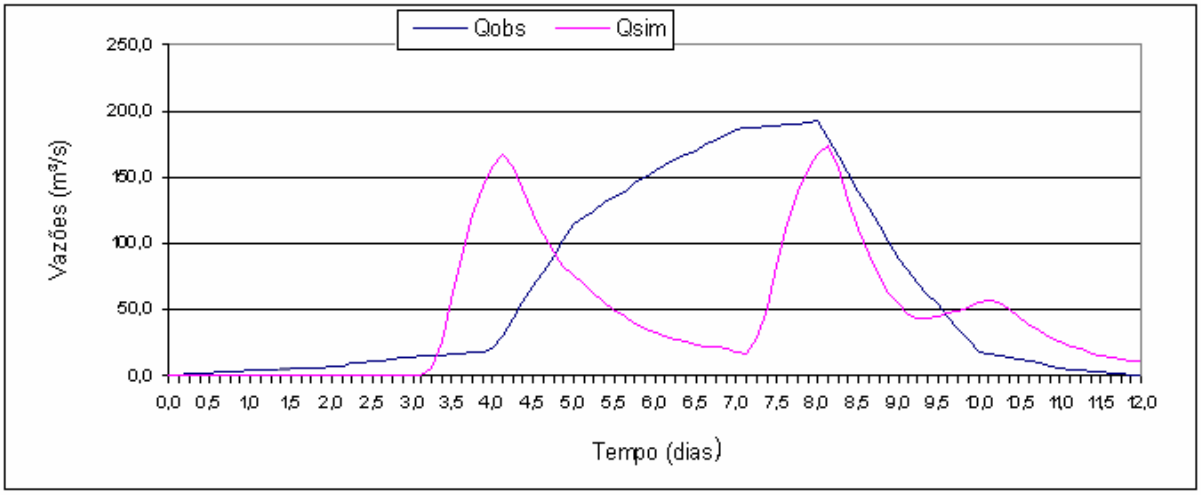


FIGURA D.7 – Simulação para o Evento 1 com uso de Fobj2 + Fobj3 + Fobj4.

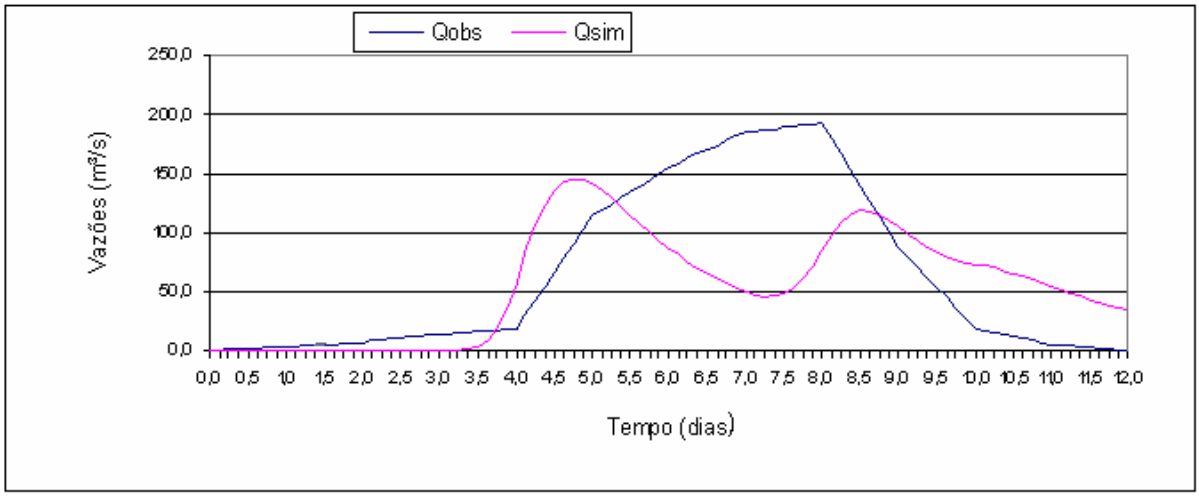


FIGURA D.8 – Simulação para o Evento 1 com uso de Fobj2 + Fobj3 + Fobj4 + Fobj5.

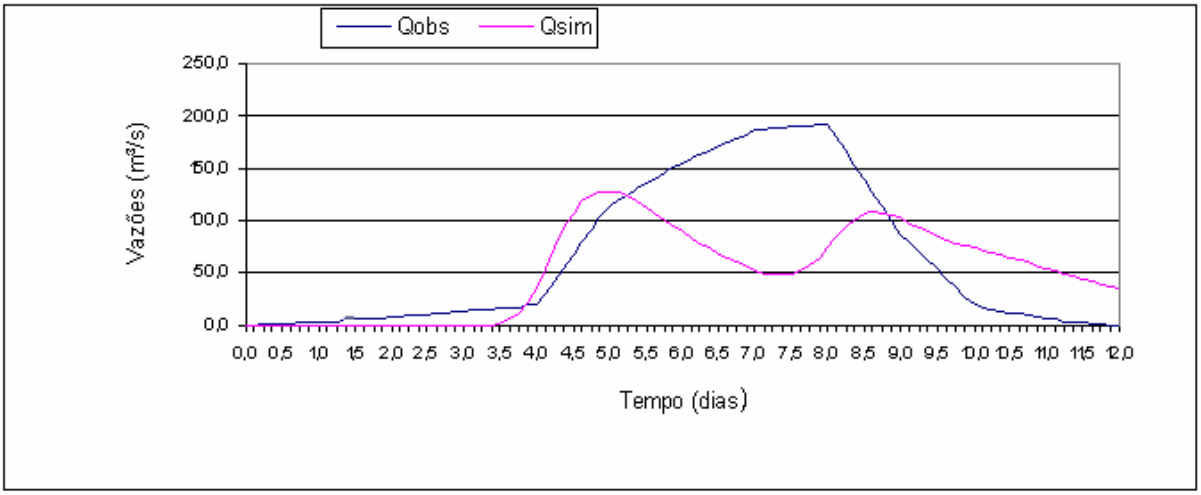


FIGURA D.9 – Simulação para o Evento 1 com uso de Fobj1 + Fobj5.

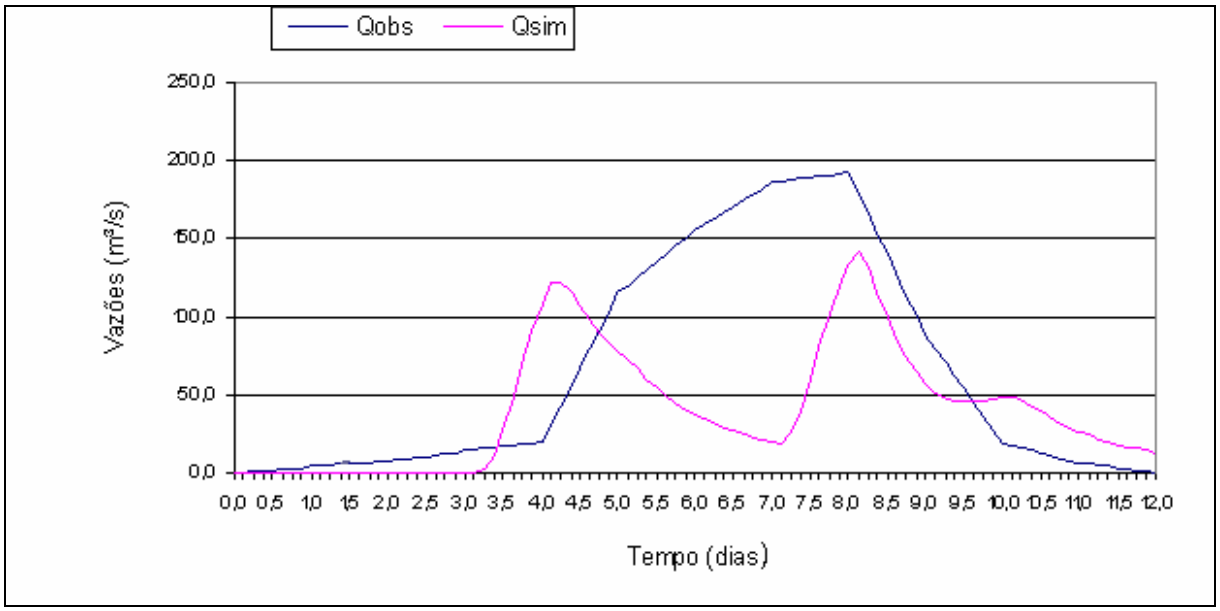


FIGURA D.10 – Simulação para o Evento 1 com uso de Fobj1 + Fobj2 + Fobj3 + Fobj4 + Fobj5.

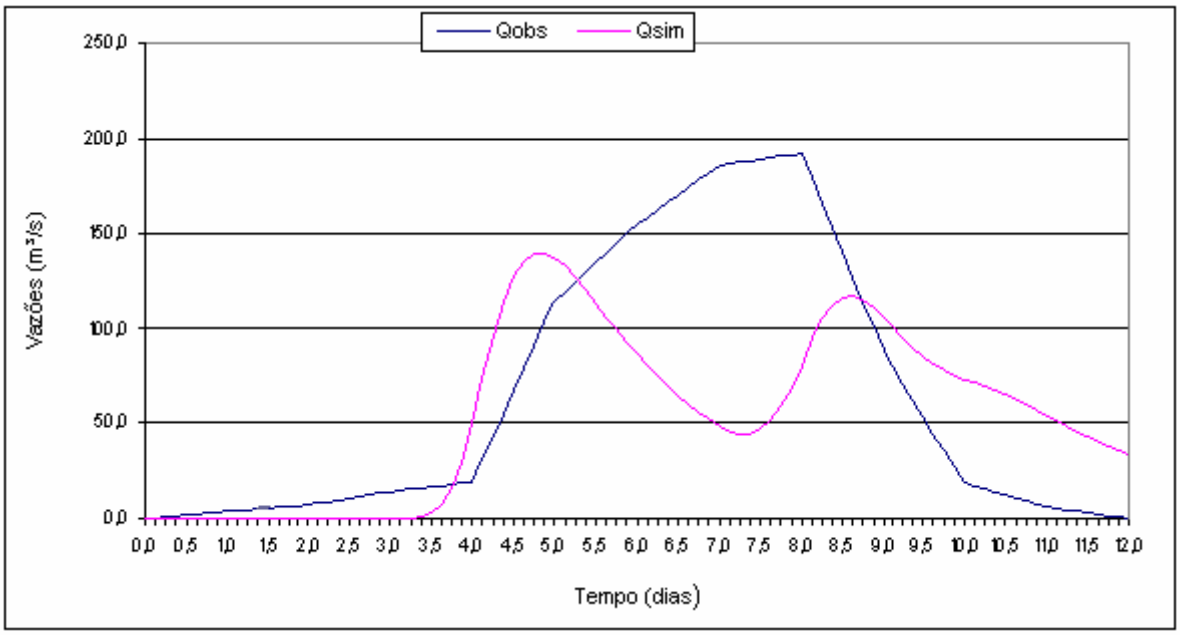


FIGURA D.11 – Simulação para o Evento 1 com uso de todas as funções .

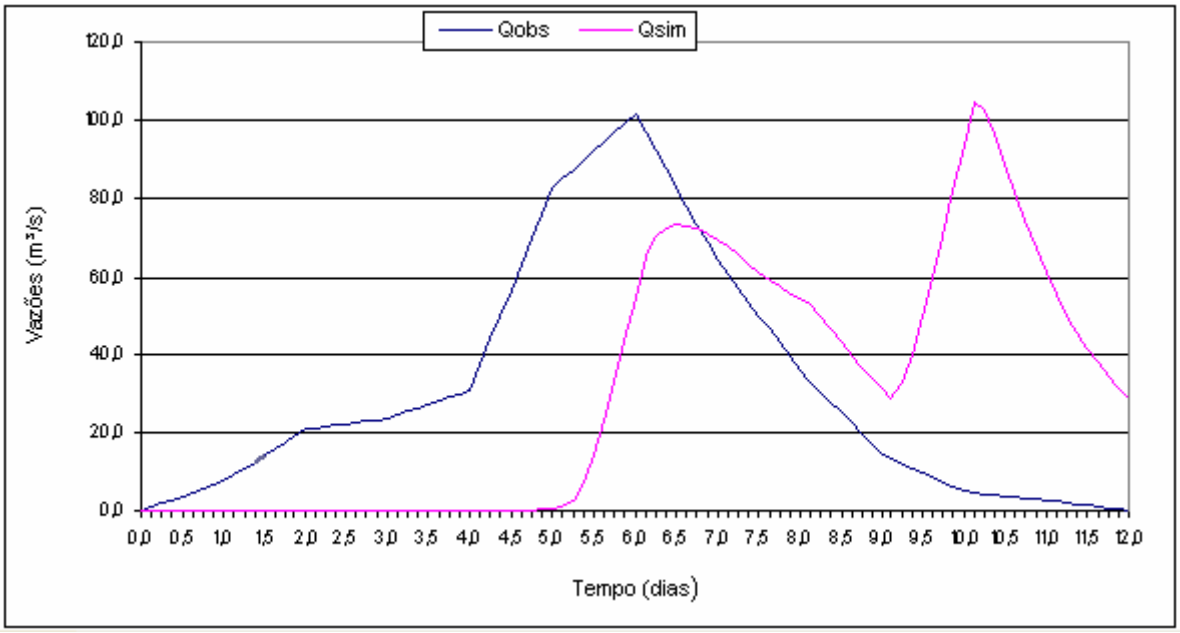


FIGURA D.12 – Simulação para o Evento 2 com uso de todas as funções .

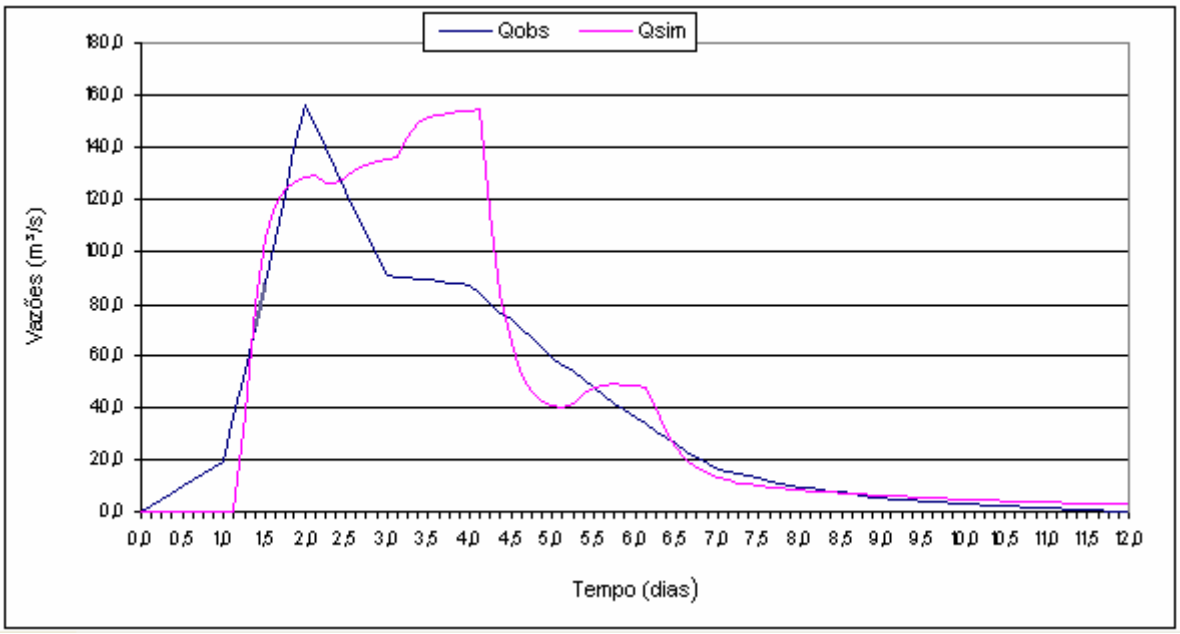


FIGURA D.13 – Simulação para o Evento 3 com uso de todas as funções .

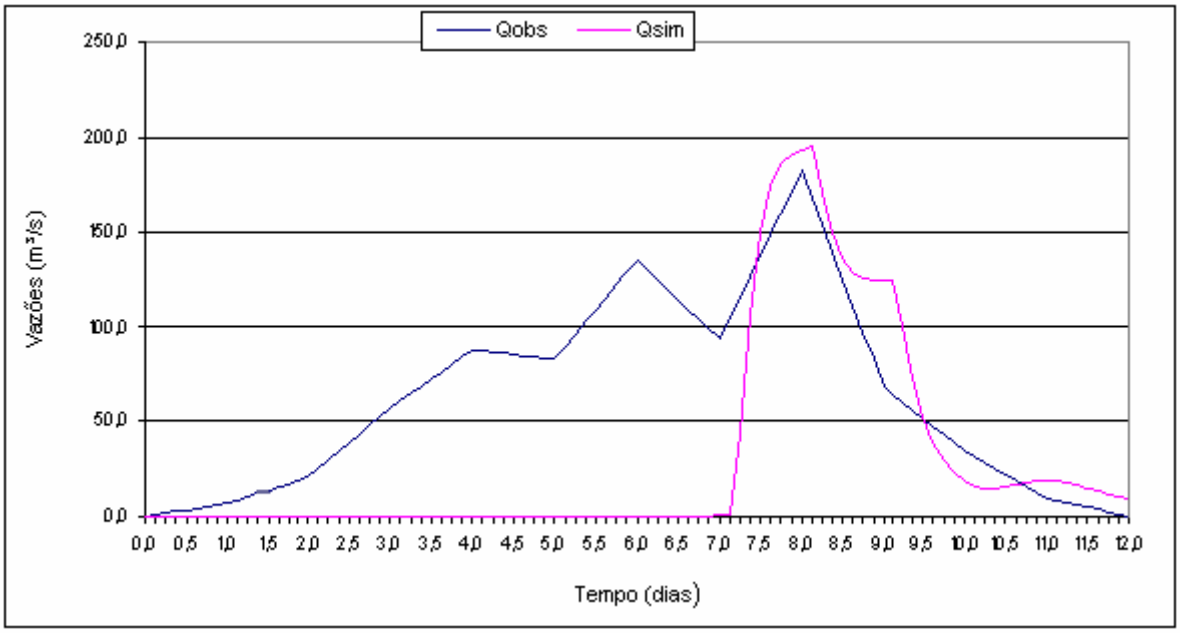


FIGURA D.14 – Simulação para o Evento 4 com uso de todas as funções .

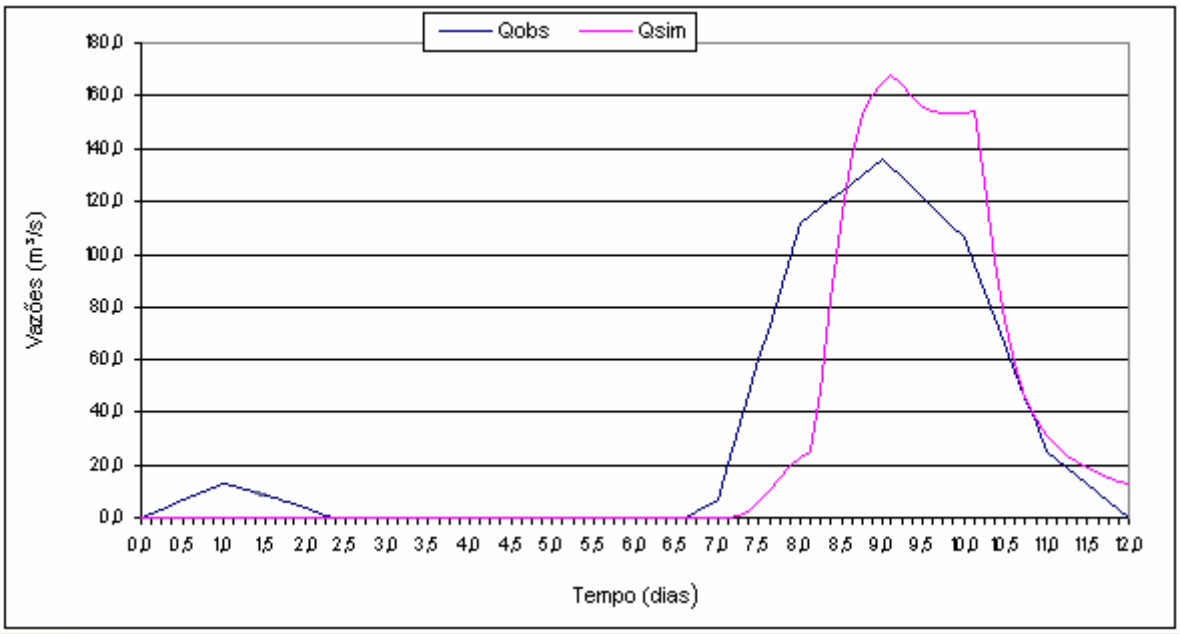


FIGURA D.15 – Simulação para o Evento 5 com uso de todas as funções .

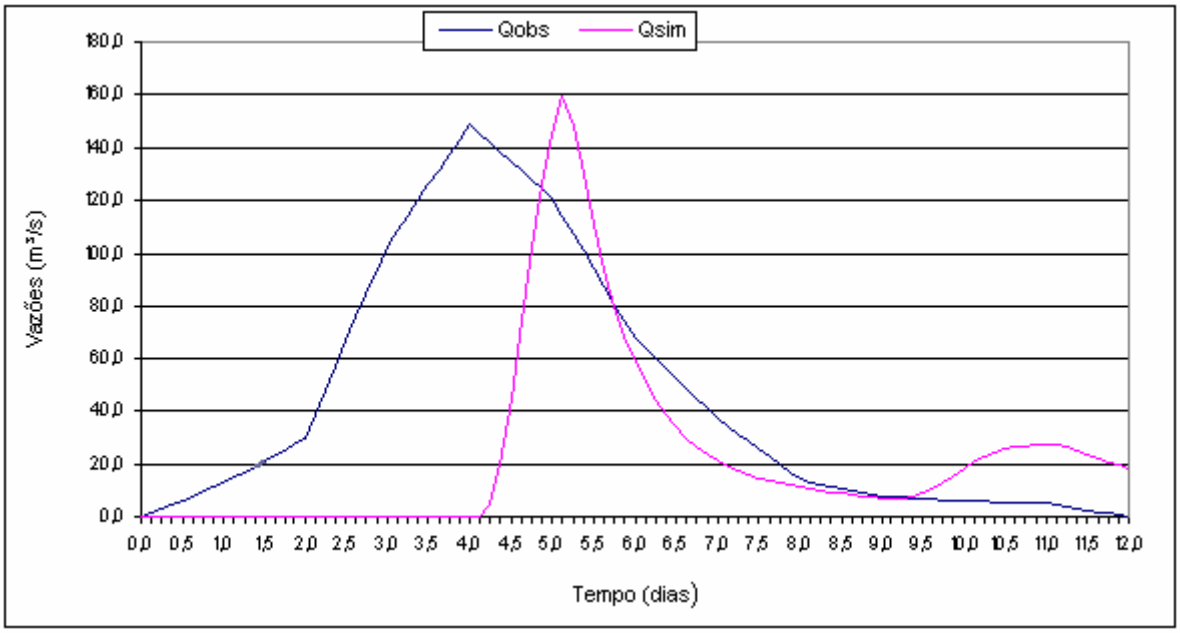


FIGURA D.16 – Simulação para o Evento 6 com uso de todas as funções .

ANEXO E – Resultados de Ajustes para todos os eventos

TABELA E.1 – Ajuste sucessivo de parâmetros para Evento 1, Evento 2 e Evento 3 com NMH = 100, NIT = 100 e considerando quatro funções objetivo além de CN variar inicialmente de 1 a 99.

Evento 1	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**Fobj1**	**Fobj2**	**Fobj3**	**Fobj4**	**Fobj**
1	15	17	22	16	16	25	41	40	36	25	0,0275	0,0253	0,0129	29,24	7,15	7,15	0,95	44,50
2	15	17	22	16	16	25	41	40	36	25	0,0275	0,0253	0,0129	29,24	7,15	7,15	0,95	44,50
3	15	17	22	16	16	25	41	40	36	25	0,0275	0,0253	0,0129	29,24	7,15	7,15	0,95	44,50
4	15	17	22	16	16	25	41	40	36	25	0,0275	0,0253	0,0129	29,24	7,15	7,15	0,95	44,50
5	15	17	22	16	16	25	41	40	36	25	0,0275	0,0253	0,0129	29,24	7,15	7,15	0,95	44,50
6	15	17	22	16	16	25	41	40	36	25	0,0275	0,0253	0,0129	29,24	7,15	7,15	0,95	44,50
7	15	17	22	16	16	25	41	40	36	25	0,0275	0,0253	0,0129	29,24	7,15	7,15	0,95	44,50
8	15	17	22	16	16	25	41	40	36	25	0,0275	0,0253	0,0129	29,24	7,15	7,15	0,95	44,50
9	15	17	22	16	16	25	41	40	36	25	0,0275	0,0253	0,0129	29,24	7,15	7,15	0,95	44,50
10	15	17	22	16	16	25	41	40	36	25	0,0275	0,0253	0,0129	29,24	7,15	7,15	0,95	44,50
Evento 2	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**Fobj1**	**Fobj2**	**Fobj3**	**Fobj4**	**Fobj**
1	15	27	30	50	31	37	43	49	44	39	0,0324	0,0342	0,0910	30,16	1,24	1,24	13,31	45,96
2	15	27	30	50	31	37	43	49	44	39	0,0324	0,0342	0,0910	30,16	1,24	1,24	13,31	45,96
3	15	27	30	50	31	37	43	49	44	39	0,0324	0,0342	0,0910	30,16	1,24	1,24	13,31	45,96
4	15	27	30	50	31	37	43	49	44	39	0,0324	0,0342	0,0910	30,16	1,24	1,24	13,31	45,96
5	15	27	30	50	31	37	43	49	44	39	0,0324	0,0342	0,0910	30,16	1,24	1,24	13,31	45,96
6	15	27	30	50	31	37	43	49	44	39	0,0324	0,0342	0,0910	30,16	1,24	1,24	13,31	45,96
7	15	27	30	50	31	37	43	49	44	39	0,0324	0,0342	0,0910	30,16	1,24	1,24	13,31	45,96
8	15	27	30	50	31	37	43	49	44	39	0,0324	0,0342	0,0910	30,16	1,24	1,24	13,31	45,96
9	15	27	30	50	31	37	43	49	44	39	0,0324	0,0342	0,0910	30,16	1,24	1,24	13,31	45,96
10	15	27	30	50	31	37	43	49	44	39	0,0324	0,0342	0,0910	30,16	1,24	1,24	13,31	45,96
Evento 3	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**Fobj1**	**Fobj2**	**Fobj3**	**Fobj4**	**Fobj**
1	37	28	19	61	34	36	43	35	39	43	0,0217	0,0389	0,0617	28,59	4,72	4,72	5,41	43,45
2	37	28	19	61	34	36	43	35	39	43	0,0217	0,0389	0,0617	28,59	4,72	4,72	5,41	43,45
3	37	28	19	61	34	36	43	35	39	43	0,0217	0,0389	0,0617	28,59	4,72	4,72	5,41	43,45
4	37	28	19	61	34	36	43	35	39	43	0,0217	0,0389	0,0617	28,59	4,72	4,72	5,41	43,45
5	37	28	19	61	34	36	43	35	39	43	0,0217	0,0389	0,0617	28,59	4,72	4,72	5,41	43,45
6	37	28	19	61	34	36	43	35	39	43	0,0217	0,0389	0,0617	28,59	4,72	4,72	5,41	43,45
7	37	28	19	61	34	36	43	35	39	43	0,0217	0,0389	0,0617	28,59	4,72	4,72	5,41	43,45
8	37	28	19	61	34	36	43	35	39	43	0,0217	0,0389	0,0617	28,59	4,72	4,72	5,41	43,45
9	37	28	19	61	34	36	43	35	39	43	0,0217	0,0389	0,0617	28,59	4,72	4,72	5,41	43,45
10	37	28	19	61	34	36	43	35	39	43	0,0217	0,0389	0,0617	28,59	4,72	4,72	5,41	43,45

TABELA E.2 – Ajuste sucessivo de parâmetros para Evento 4, Evento 5 e Evento 6 com NMH = 100, NIT = 100 e considerando quatro funções objetivo além de CN variar inicialmente de 1 a 99.

Evento 4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Fobj1	Fobj2	Fobj3	Fobj4	Fobj
1	45	15	30	56	34	17	30	72	48	45	0,0258	0,0323	0,1148	44,30	32,35	32,35	6,84	115,83
2	45	15	30	56	34	17	30	72	48	45	0,0258	0,0323	0,1148	44,30	32,35	32,35	6,84	115,83
3	45	15	30	56	34	17	30	72	48	45	0,0258	0,0323	0,1148	44,30	32,35	32,35	6,84	115,83
4	45	15	30	56	34	17	30	72	48	45	0,0258	0,0323	0,1148	44,30	32,35	32,35	6,84	115,83
5	45	15	30	56	34	17	30	72	48	45	0,0258	0,0323	0,1148	44,30	32,35	32,35	6,84	115,83
6	45	15	30	56	34	17	30	72	48	45	0,0258	0,0323	0,1148	44,30	32,35	32,35	6,84	115,83
7	45	15	30	56	34	17	30	72	48	45	0,0258	0,0323	0,1148	44,30	32,35	32,35	6,84	115,83
8	45	15	30	56	34	17	30	72	48	45	0,0258	0,0323	0,1148	44,30	32,35	32,35	6,84	115,83
9	45	15	30	56	34	17	30	72	48	45	0,0258	0,0323	0,1148	44,30	32,35	32,35	6,84	115,83
10	45	15	30	56	34	17	30	72	48	45	0,0258	0,0323	0,1148	44,30	32,35	32,35	6,84	115,83
Evento 5	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**Fobj1**	**Fobj2**	**Fobj3**	**Fobj4**	**Fobj**
1	50	37	8	47	33	48	54	35	38	49	0,0563	0,0345	0,0775	69,42	6,49	6,49	6,14	88,56
2	50	37	8	47	33	48	54	35	38	49	0,0563	0,0345	0,0775	69,42	6,49	6,49	6,14	88,56
3	50	37	8	47	33	48	54	35	38	49	0,0563	0,0345	0,0775	69,42	6,49	6,49	6,14	88,56
4	50	37	8	47	33	48	54	35	38	49	0,0563	0,0345	0,0775	69,42	6,49	6,49	6,14	88,56
5	50	37	8	47	33	48	54	35	38	49	0,0563	0,0345	0,0775	69,42	6,49	6,49	6,14	88,56
6	50	37	8	47	33	48	54	35	38	49	0,0563	0,0345	0,0775	69,42	6,49	6,49	6,14	88,56
7	50	37	8	47	33	48	54	35	38	49	0,0563	0,0345	0,0775	69,42	6,49	6,49	6,14	88,56
8	50	37	8	47	33	48	54	35	38	49	0,0563	0,0345	0,0775	69,42	6,49	6,49	6,14	88,56
9	50	37	8	47	33	48	54	35	38	49	0,0563	0,0345	0,0775	69,42	6,49	6,49	6,14	88,56
10	50	37	8	47	33	48	54	35	38	49	0,0563	0,0345	0,0775	69,42	6,49	6,49	6,14	88,56
Evento 6	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**Fobj1**	**Fobj2**	**Fobj3**	**Fobj4**	**Fobj**
1	34	18	22	53	41	35	22	42	25	40	0,0304	0,0874	0,1120	41,91	9,88	9,88	8,05	69,72
2	34	18	22	53	41	35	22	42	25	40	0,0304	0,0874	0,1120	41,91	9,88	9,88	8,05	69,72
3	34	18	22	53	41	35	22	42	25	40	0,0304	0,0874	0,1120	41,91	9,88	9,88	8,05	69,72
4	34	18	22	53	41	35	22	42	25	40	0,0304	0,0874	0,1120	41,91	9,88	9,88	8,05	69,72
5	34	18	22	53	41	35	22	42	25	40	0,0304	0,0874	0,1120	41,91	9,88	9,88	8,05	69,72
6	34	18	22	53	41	35	22	42	25	40	0,0304	0,0874	0,1120	41,91	9,88	9,88	8,05	69,72
7	34	18	22	53	41	35	22	42	25	40	0,0304	0,0874	0,1120	41,91	9,88	9,88	8,05	69,72
8	34	18	22	53	41	35	22	42	25	40	0,0304	0,0874	0,1120	41,91	9,88	9,88	8,05	69,72
9	34	18	22	53	41	35	22	42	25	40	0,0304	0,0874	0,1120	41,91	9,88	9,88	8,05	69,72
10	34	18	22	53	41	35	22	42	25	40	0,0304	0,0874	0,1120	41,91	9,88	9,88	8,05	69,72